

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELÉTRICA

OTAVIO DO AMARAL FIGUEIREDO

## **FATOR DE DESCLASSIFICAÇÃO PARA TRANSFORMADORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017

OTAVIO DO AMARAL FIGUEIREDO

## **FATOR DE DESCLASSIFICAÇÃO PARA TRANSFORMADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Otavio do Amaral Figueiredo**

**Fator de desclassificação para transformadores**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 24/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio - (Orientador)

---

Prof. Dr. Luiz Marcelo Chiesse da Silva - (Membro)

---

Prof. Me. Jancer Frank Zanini Destro - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho à minha família, amigos por acreditarem e a Deus por tornar este trabalho possível.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, por conduzir minha trajetória durante este trabalho e todo o curso de engenharia elétrica, me abençoando sempre, mesmo em momentos difíceis.

Ao Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio, que idealizou a pesquisa, pela orientação, apoio dado e paciência ao orientar este trabalho de conclusão de curso a ser desenvolvido, e se mostrou sempre disposto a me ajudar.

Agradeço também aos Professores Dr. Luiz Marcelo Chiesse da Silva e Me. Jancer Frank Zanini Destro por todo o auxílio dado, pela atenção, contribuição dedicada a este estudo e por terem aceitado fazer parte da banca examinadora.

A minha família e amigos pelo eterno apoio, acolhimento e bons pensamentos que colaboraram muito para o alcance deste objetivo.

## RESUMO

FIGUEIREDO, Otavio do Amaral. **Fator de desclassificação para transformadores**. 2017. 53 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

O transformador é um equipamento vital para o sistema elétrico. Devido à sua aplicação na elevação e abaixamento de tensão, sendo importante seu estudo em relação às suas condições de operação. Sabe-se que todo transformador em operação está conectado a cargas lineares e cargas não lineares, com estas apresentando componentes harmônicas. Assim, com o aumento das cargas não senoidais no sistema, o nível de corrente harmônica, bem como o fator K do transformador, é aumentado gerando perdas, diminuindo sua vida útil e até mesmo inutilizando equipamentos elétricos do sistema. Para esta situação, reduz-se sua carga mantendo seu funcionamento sob condições aceitáveis. Estas preocupações estão voltadas principalmente para os efeitos da distorção harmônica no funcionamento e vida útil do transformador. O fator de desclassificação para transformadores é uma avaliação das correntes distorcidas em relação à forma de onda senoidal conforme os efeitos de aquecimento do transformador, também conhecido por fator K. Assim, apresenta-se neste trabalho, um estudo com o intuito de demonstrar, por normas utilizadas internacionalmente, a importância do fator de perda harmônica ( $F_{HL}$ ) através das recomendações na IEEE Std. C57.110-2008, do fator de desclassificação, através da UL1561 – 1994, além da comparação com a norma europeia, segundo a CENELEC, nos transformadores de distribuição.

**Palavras-chave:** Transformadores de distribuição, fator de desclassificação, distorção harmônica.

## ABSTRACT

FIGUEIREDO, Otavio do Amaral. **Derating factor for transformers**. 2017. 53 p. Completion of Course Work (Graduate) – Electrical Engineering. Technological University Federal of the Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The transformer is a vital equipment for the electrical system. Due to its application in raising and lowering voltage. Its study is important in relation to its operating conditions. It is known that every transformer in operation is connected to linear loads and non-linear loads, the latter have harmonic components. Thus, with increasing non-sinusoidal loads in the system, the harmonic current level as well as the K-factor of the transformer is increased generating losses, decreasing its useful life and even being able to disable electrical equipment of the system. For this situation, its load is reduced keeping its operation under acceptable conditions. These concerns are focused primarily on the effects of harmonic distortion on the operation and life of the transformer. The derating factor for transformers is an evaluation of distorted currents in relation to the sinusoidal waveform according to the heating effects of the transformer, also known as factor K. Thus, a study is presented in order to demonstrate, by standards, the importance of the harmonic loss factor ( $F_{HL}$ ) through the recommendations in IEEE Std. C57.110-2008, of the derating factor, through UL1561 - 1994, in addition to the comparison with the European standard, according to CENELEC, in the distribution transformers.

**Key-words:** Distribution transformers, derating factor, harmonic distortion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito das Harmônicas em Equipamentos Elétricos.....	17
Figura 2 – Sistema Elétrico de Potência .....	24
Figura 3 – Diagrama de Perdas Ocorridas em Transformadores.....	25
Figura 4 – Campo eletromagnético produzido por correntes de carga em enrolamentos de transformador .....	28
Figura 5 – Simulação de Efeito Pelicular num condutor de cobre de seção circular com seção de 300mm <sup>2</sup> , percorrido por corrente com 20A.....	31
Figura 6 – Simulação de Efeito Pelicular num condutor de cobre de seção circular com seção de 300mm <sup>2</sup> , percorrido por corrente com 20A,60Hz.....	32
Figura 7 – Simulação de Efeito Pelicular num condutor de cobre de seção circular com seção de 300mm <sup>2</sup> , percorrido por corrente com 20A, 250Hz .....	32
Figura 8 – Densidade Uniformemente Distribuída, corrente contínua.....	33
Figura 9 –Distribuição da Densidade de Corrente Alternada, para a frequência de 60Hz .....	33
Figura 10 – Distribuição da Densidade de Corrente Alternada, para a frequência de 250Hz .....	33
Figura 11 – Representação Gráfica do Conteúdo Harmônico da Corrente.....	36
Figura 12 – Conteúdo Harmônico de Três Exemplos, cujo Valor Eficaz da Corrente é Idêntico.....	40
Figura 13 – Conteúdo Harmônico de Três Exemplos, cuja THD é idêntica .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo do fator K.....	20
Tabela 2 – Fator K .....	22
Tabela 3 – Principais Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica .....	24
Tabela 4 – Características Elétricas do Transformador TD630.....	34
Tabela 5 – Perdas em Vazio do Transformador TD630 .....	35
Tabela 6 – Perdas em Curto-Circuito e em Carga do TD630.....	35
Tabela 7 – Conteúdo Harmônico da Corrente e Respectiveos Cálculos ( $q=1,7$ ) .....	36
Tabela 8 – Resultado do Estudo de Caso .....	38
Tabela 9 – Resultado Obtido.....	40
Tabela 10 – Desclassificação do Transformador – % da Potência Nominal .....	41
Tabela 11 – Resultados .....	42
Tabela 12 – Declassificação do Transformador - % da Potência Nominal.....	42
Tabela 13 – Resultados da Relação entre Corrente da Harmônica e o Valor Eficaz da Corrente.....	43
Tabela 14 – Tabela de Cálculos Realizados Recorrendo à $I_{ef}$ .....	44
Tabela 15 – Tabela de Cálculos Realizados Recorrendo à $I_1$ .....	44
Tabela 16 – Resultados Obtidos com $I_{ef}$ .....	45
Tabela 17 – Resultados Obtidos com $I_1$ .....	45
Tabela 18 – Resultados Obtidos Usando TD1600 .....	45
Tabela 19 – Resultados Obtidos Usando TD630 .....	46

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.1 Justificativa</b> .....	12
<b>1.2 Objetivos</b> .....	13
1.2.1. Objetivo Geral .....	13
1.2.2. Objetivos Específicos .....	13
<b>1.3 Metodologia</b> .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
<b>2.1 Distorção Harmônica e Fator de Desclassificação</b> .....	16
<b>2.2 Qualidade da Energia Elétrica</b> .....	23
<b>2.3 Transformadores e Suas Perdas</b> .....	24
<b>2.4 Cargas Lineares e Não Lineares</b> .....	28
<b>3 COMPARAÇÕES E RESULTADOS</b> .....	30
<b>3.1 Forma da Onda de Corrente com Conteúdo Harmônico de Carga Não Linear</b> .....	36
3.1.1. Norma Europeia – fator K .....	37
3.1.2. Norma Americana IEEE - $F_{HL}$ .....	38
3.1.3. Norma Americana $K_{UL}$ .....	38
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	47
<b>4.1 Considerações</b> .....	47
<b>4.2 Publicações</b> .....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos, na década de 30, apresentavam perdas excessivas nos alimentadores, cujas cargas estavam distantes da geração. Dentre os vários equipamentos que compõem os sistemas elétricos, se sobressaem os transformadores de potência. Como componente significativo de um sistema de corrente alternada, o transformador possibilita a geração elétrica e a transferência de energia nas tensões com perdas reduzidas, além de permitir a utilização da energia na tensão mais adequada para um dado dispositivo em particular (FITZGERALD, 2006).

Os transformadores suprem cargas lineares e não lineares, sendo os que suprem cargas não lineares tendem a apresentar um sobreaquecimento que geram perdas adicionais e redução da sua vida útil (DALILA et. Al, 2009). Portanto, é necessário um estudo detalhado destas perdas adicionais para que se possa dimensionar o transformador de maneira eficiente em relação ao cálculo da potência máxima a ser fornecida.

A segurança da continuidade de energia elétrica em qualquer sistema está relacionada diretamente à confiabilidade e qualidade dos equipamentos. Tal fato leva a um contínuo aperfeiçoamento de suas características, aumentando sua confiabilidade, melhorando sua eficiência e diminuindo seu tamanho e, conseqüentemente, o seu custo (GODOY, 2006) (SCARPIM, 2013).

Assim sendo, o transformador converte corrente alternada (CA) de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica (CA) de mesma frequência, porém em outro nível de tensão. Este consiste em duas ou mais espiras de fio enroladas em um núcleo ferromagnético comum. Estas bobinas não estão conectadas diretamente entre si. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo (CHAPMAN, 2012).

Os sinais elétricos são equilibrados, com forma de onda senoidal e simétrica em um sistema de corrente alternada ideal. Contudo, em sistemas reais, existem desequilíbrios, assimetrias e distorções. Estas condições presentes no sistema tornaram-se mais significativas com o porte e a complexidade das redes elétricas, dois exemplos são a distorção harmônica e

o fator de desclassificação dos transformadores de distribuição. O fator de desclassificação para transformadores, também conhecido por fator K, é uma avaliação dos efeitos de aquecimento do transformador dados pelas correntes distorcidas em relação à forma de onda senoidal.

Graças à evolução tecnológica da eletrônica de potência e consequente utilização de cargas não lineares, a presença de distorções harmônicas nos sistemas de energia elétrica tem crescido substancialmente. Estudos indicam que as cargas não lineares são responsáveis por cerca de 70% da demanda dos consumidores residenciais, comerciais e industriais. (PORT, 2006). Assim, com o aumento das cargas não senoidais no sistema, o nível de corrente harmônica, bem como o fator K do transformador é aumentado gerando perdas, diminuindo a vida útil e até a inutilização dos equipamentos elétricos presentes no sistema.

Desde 1980, quando as perdas adicionais para dimensionar um transformador foram debatidas, no encontro da comissão de transformadores da sociedade de engenharia de potência do IEEE, as correntes não-senoidais de cargas não lineares aumentavam continuamente a uma porcentagem razoável da carga total do transformador dentro do processo industrial. Uma das conclusões desta reunião foi a da criação de uma norma para auxiliar na previsão da nova capacidade de carga do transformador baseado na sua quantidade de distorção harmônica. Posteriormente, diversos trabalhos com base nesta norma têm surgido. Atualmente, os métodos utilizados para o redimensionamento do transformador baseiam-se no fator de perda harmônica ( $F_{HL}$ ), norma europeia (CENELEC) e fator K (IEEE, 2008).

## 1.1 Justificativa

O estudo do fator de desclassificação para transformadores se faz necessário para que haja confiabilidade no equipamento, aumento de vida útil e fornecimento de energia de qualidade. Tendo em vista a necessidade das cargas cada vez maiores e não-lineares a serem atendidas, ou seja, cargas que geram um desequilíbrio na rede por estarem injetando corrente harmônica em frequência diferente da mesma, reduzindo a qualidade da energia

fornecida, equilíbrio, oscilações da rede, afundamentos, etc., Tais itens são importantes para os fabricantes de transformadores, que devem garantir um produto de qualidade. Para isso, deve-se garantir que as cargas não lineares injetadas na rede não diminuam sua vida útil, causando falhas e falta de confiabilidade.

## **1.2 Objetivos**

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desse trabalho.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Efetuar um estudo comparativo referente ao fator K utilizando as principais normas (americana e europeia) utilizando transformadores de distribuição que alimentam cargas não lineares.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Tendo como objetivos específicos para transformadores:

- Verificar e estimar seu fator de desclassificação;
- Realizar um estudo de caso de cargas em transformadores;
- Evidenciar a importância do fator de desclassificação;
- Estudar as principais causas geradoras de distorções harmônicas;
- Explicar a metodologia de avaliação de desclassificação do transformador;
- Comparação das normas americanas e europeias.

## **1.3 Metodologia**

Para a execução deste trabalho foram consideradas tanto normas internacionais como os protocolos de teste de transformadores.

Desta forma, realizou-se um estudo introdutório sobre transformadores de potência, tendo em vista seus aspectos construtivos e seu funcionamento para compreender os fenômenos que envolvem sua operação. Também foram estudados os conceitos referentes aos fatores de desclassificação para um transformador, cargas lineares, perdas associadas às cargas não lineares, e distorções harmônicas em transformadores sendo, este último tema a principal causa geradora na redução da vida útil de transformadores de potência. Tendo esta base, fez-se o estudo sobre medições de fator K para transformadores.

Em seguida, obteve-se os dados referentes a cargas lineares e não lineares injetadas na rede e os níveis de classificação do fator K para equipamentos através de consulta com o fabricante. O dimensionamento do transformador baseia-se no levantamento do espectro harmônico da carga individual, linear e não linear, bem como da corrente total referente a estas cargas combinadas.

Através desta monografia, ficou evidente a relação entre um protocolo de ensaio de transformadores e as normas, sendo possível analisar informações cujos conteúdos não podem ser diretamente aplicados nos cálculos efetuados com as normas internacionais. Para que seja possível estudar um transformador são necessários os resultados do protocolo de ensaios.

Desta forma, fez-se uma análise que utiliza um transformador de distribuição e um conteúdo harmônico presente numa forma de onda de corrente de carga não linear, com simulações e comparações aplicando-se as normas Americanas e Europeia.

Com os dados coletados, realizaram-se cálculos de acordo com o procedimento de medição, para obter os valores ponderados do valor aceitável do fator de desclassificação de modo a assegurar a vida útil do transformador. Nesta etapa notou-se a necessidade repetitiva da realização de cálculos. Com o intuito de facilitar e diminuir a probabilidade de erros foi utilizado o *software Matlab®*, com a elaboração de um algoritmo capaz de executar os cálculos necessários para a obtenção dos resultados. A validação do algoritmo foi realizada comparando-se os resultados fornecidos pelo fabricante com os resultados obtidos pelo algoritmo, sendo expressos na forma de tabela e

gráficos, com os quais se tornou possível analisar os valores de fator k obtidos em relação aos níveis tolerados pelo fabricante e especificados pelas normas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será abordada a desclassificação de transformadores e suas perdas fundamentadas por normas americanas *Underwriters Laboratory - UL*, IEEE C57.110-2008 (IEEE, 2008), e a norma europeia (CENELEC). Os efeitos das correntes de cargas não lineares nas perdas dos transformadores, fundamentos de qualidade de energia elétrica, cargas lineares e não lineares, distorção harmônica e fator K.

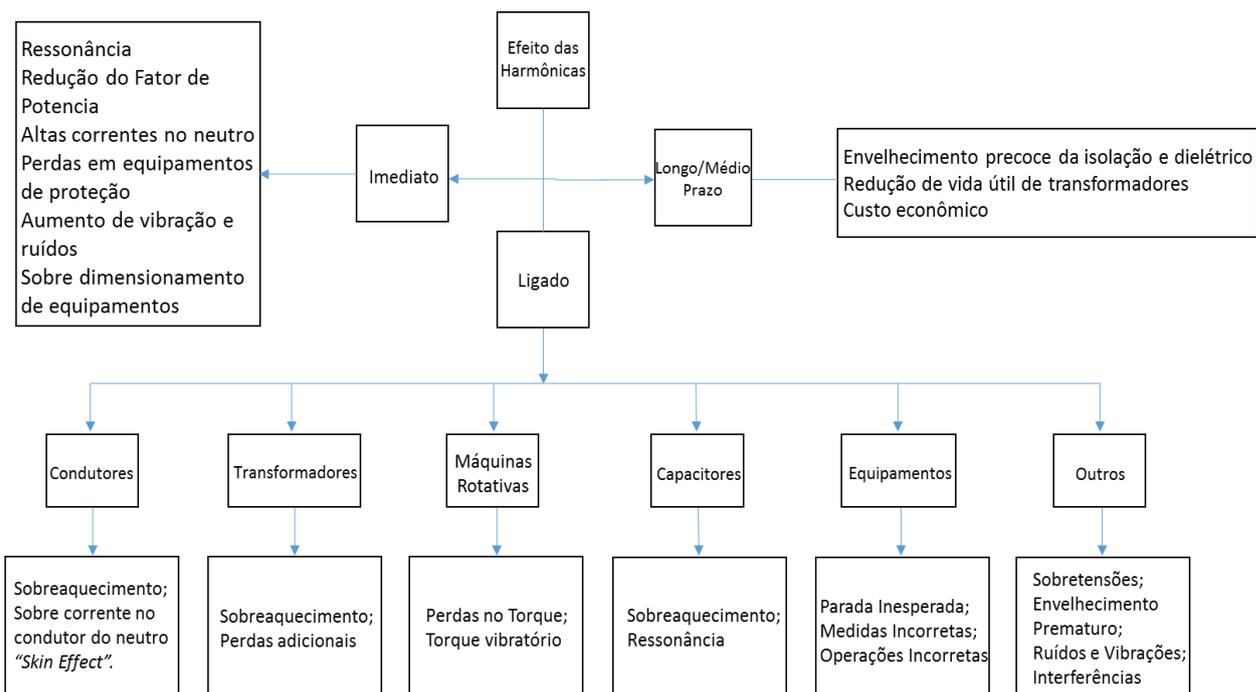
### 2.1 Distorção harmônica e fator de desclassificação

A fim de compreender uma harmônica, esta é conceituada como uma componente da onda periódica, na qual a frequência é multiplicada pela frequência fundamental. As fontes geradoras de harmônicos no sistema de potência são variadas, estas vão desde equipamentos das concessionárias, até os consumidores residenciais, comerciais e industriais.

As cargas não lineares ligadas às redes podem ser uma fonte de correntes harmônicas. As circulações das correntes harmônicas geram tensões harmônicas por meio das impedâncias da rede, e então, uma deformação da tensão de alimentação (SCHNEIDER, 2003).

Na Figura 1, observam-se os efeitos das harmônicas em instalações elétricas, ilustrando o que pode ocorrer com os equipamentos em curtos, médio e longos prazos.

**Figura 1 -Efeito das harmônicas em equipamentos elétricos.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Os principais problemas relacionados às harmônicas, em transformadores, são o aquecimento e o ruído audível. Os transformadores, quando submetidos às harmônicas de tensão aumentam as perdas no ferro. Quando os transformadores são submetidos às harmônicas de corrente geram perdas no cobre e nas partes estruturais (KASSICK, 2008).

Uma das formas mais utilizadas para a determinação dos níveis de distorção presentes nos sinais de correntes ou de tensões é através da “Distorção Harmônica Total”. As definições da Distorção Harmônica Total de Tensão ( $THD_V$ ) e distorção harmônica total de corrente ( $THD_i$ ) são mostradas nas Equações (2.1) e (2.2).

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h \text{ máx}} V_h^2}{V_1^2}} \quad (2.1)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h \text{ máx}} I_h^2}{I_1^2}} \quad (2.2)$$

onde,

$h$ : ordem da harmônica;

$V_h$ : tensão harmônica de ordem h;  
 $h_{max}$ : ordem máxima da harmônica;  
 $V_1$ : tensão fundamental eficaz;  
 $I_h$ : corrente harmônica de ordem h;  
 $I_1$ : corrente fundamental eficaz.

A circulação de 3ª harmônica e seus múltiplos pode levar à sobrecarga de enrolamentos conectados em delta, caso esse tipo de harmônicas não tenha sido considerado no projeto deste transformador. No restante do sistema, as correntes harmônicas podem causar disparo anormal de chaves e disjuntores, medição incorreta por equipamentos e ressonância de banco de capacitores (LISITA, 2004; KASSICK, 2008).

Fizeram-se estudos para quantificar os problemas gerados pelas distorções harmônicas. Existem normas internacionais para obtenção de índices que permitem quantificar esta desclassificação. Constantes em uma Norma Europeia (CENELEC) e duas Americanas. Estas normas estão relacionadas com o espectro harmônico da corrente de carga que as origina.

É aplicado um fator de compensação, com o intuito de atenuar os efeitos das perdas do transformador causadas pelo conteúdo harmônico da corrente da carga não linear, calculado conforme uma das normas. Através da norma CENELEC existe o fator K, já pela IEEE tem-se um fator de perdas devido a harmônicas ( $F_{HL}$ ) e segundo *Underwriters Laboratory*- UL tem-se um *K-factor*,  $K_{UL}$ .

A norma Europeia (CENELEC) é constituída por seis partes, onde a terceira parte permite a redução de potência do transformador, também conhecida por desclassificação, quando este alimenta cargas não lineares. Este documento informa que quando o transformador de distribuição é exposto a cargas não lineares, este apresenta um fator de desclassificação dado pela relação  $1/K$ , sendo o fator K obtido pela Equação (2.3).

$$K = \left[ 1 + \frac{e}{1+e} \left( \frac{I_1}{I_{ef}} \right)^2 \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^q \left( \frac{I_h}{I_{ef}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$DR_K = \frac{1}{K} \quad (2.4)$$

onde,

$e$  = Estimativa dada através da divisão das perdas por correntes parasitas à frequência fundamental de 60Hz, pelas perdas por efeito de Joule;

$h$  = Índice de harmônica de corrente;

$I_{ef}$  = valor eficaz da corrente aplicada [A], obtido através de:

$$I_{ef} = \left[ \sum_{h=1}^{h=hm\max} I_h^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

onde,

$I_h$  = Magnitude da harmônica da corrente [A];

$I_1$  = Magnitude da harmônica fundamental da corrente [A];

$q$  = Constante, dependente da frequência e do enrolamento. O valor adotado é de 1,7 para os transformadores com enrolamentos de cabo de seção retangular.

$DR_K$  = Índice de desclassificação de transformador dada pela a norma europeia.

Já segundo a *UL*, que foi a responsável pela criação de uma forma de medida da intensidade destes harmônicos em um sistema, obtendo um parâmetro denominado fator de desclassificação (fator K). Para equipamentos sensíveis à presença de distorções harmônicas em uma rede elétrica se tornou possível devido ao valor de fator K. Assim, dimensionando, instalando-se filtros, ou mesmo isolando-os do resto do sistema, caso a quantidade de harmônicos presentes na rede não possa ser suportada por esses aparelhos para que não ocorra uma falha generalizada no sistema (UL-1562, 1994).

O cálculo do fator K para transformadores é definido pelas *Underwriters Laboratory Standards*, foi escrita em 1961 e aperfeiçoada em 1962. Diferentemente do fator de perdas harmônicas ( $F_{HL}$ ) esse método se baseia somente nas correntes parasitas ou correntes de Foucault (UL-1562, 1994).

Nesses artigos foi definido que o fator K é uma medição opcional aplicada a um transformador indicando sua estabilidade mediante cargas não lineares, confirme a Equação (2.6).

$$Fator K = \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right) = \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \cdot I_{h,pu} \quad (2.6)$$

onde,

$I_{h,pu}$ : corrente eficaz (rms) na harmônica;

$I_1$ : corrente fundamental eficaz;

$h$ : valor da harmônica.

A norma IEEE Std. 1100, 2008 preconizam que a corrente rms de qualquer harmônica maior que a décima ordem seja considerada não superior a  $1/h$  da corrente rms fundamental. A limitação é para equilibrar resultados excessivamente conservadores para harmônicas de maior frequência. Um exemplo de cálculo do fator K é mostrado na Tabela 1 para o valor de corrente rms verdadeiro igual a 73,72A. No exemplo, observa-se que os valores de corrente das componentes de 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordens são maiores que  $I_1/h$  devendo ser adequado para o cálculo do fator K (IEEE, 2008).

**Tabela 1 - Cálculo do fator K**

Valor rms verdadeiro = 73,72 A					
h	$I_{rms}(A)$	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	$h^2$	$h^2(I_h/I_1)^2$
1	52,45	1,000	1,0000	1	1,000
3	42,27	0,806	0,6496	9	5,846
5	24,97	0,476	0,2266	25	5,665
7	9,44	0,180	0,0324	49	1,588
9	3,72	0,071	0,0050	81	0,405
11	5,51	0,091	0,0083	121	1,004
13	4,77	0,077	0,0059	169	0,997
$\sum = 1,9278$				$Fator K = 16,505$	

Fonte: IEEE, 2008.

Os equipamentos de medição do espectro harmônico medem as componentes harmônicas em relação à componente fundamental. Se não observado o limite da corrente rms para componentes acima da 10ª ordem, o valor calculado do fator K resultaria em  $K = 17,24$  ao invés de  $K = 16,505$ , como mostrado na Tabela 1. O valor adquirido para o fator K aponta para o uso de um transformador com fator  $K = 20$ .

O fator K é sensível ao valor de corrente de referência usado no cálculo de  $I_h/I_1$ . Se ao invés de  $I_1$ , o valor rms verdadeiro ( $I_{RMS} = 73,72A$ ) fosse usado no cálculo de  $I_{h,pu}$ , o fator K resultante seria 8,84.

A classificação de transformadores pelo fator K não é desenvolvida para harmônicas maiores que a décima, e quando esta é maior que  $1/h$  do valor da corrente eficaz (rms) da fundamental.

O fator K, conforme a recomendação da ANSI/IEEEC57.110-2008, tornou-se útil como forma de caracterizar um equipamento especialmente voltado para suportar as tensões e correntes não senoidais presentes em um circuito elétrico. Os transformadores convencionais, pela mesma recomendação da IEEE, têm sua potência reduzida para que operem sem problemas sob um determinado fator K, são desclassificados em sua potência, visto que estes não dependem exclusivamente do seu projeto, mas da operação efetiva da carga (TACI e DOMIJAN,2004).

Outro método de cálculo, apresentado pelas normas UL-1561 (UL-1561, 1994) e UL-1562 (UL-1562, 1994), utiliza o fator K como multiplicador das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos sob condição de carga linear de potência nominal na determinação da perda por correntes parasitas em enrolamentos para a condição de cargas não-lineares. Este fator representa uma avaliação opcional aplicada ao transformador indicando sua conveniência na alimentação de cargas com correntes não-senoidais. Uma relação entre o fator K e o fator de perda harmônica ( $F_{HL}$ ) é representada pela Equação (2.7) (IEEE, 2008).

$$\text{Fator de Perdas} = \frac{[\sum_{h=1}^{hmax} I_h^2]}{I_R^2} \cdot (F_{HL}) \quad (2.7)$$

onde,

$I_h$ : corrente harmônica de ordem  $h$ ;

$I_R$ : corrente fundamental eficaz;

$h$  : valor da harmônica;

$F_{HL}$ : fator de perda harmônica.

A diferença entre o fator de perda harmônica e o fator K é a corrente adotada como base. O  $F_{HL}$  é normalizado pela fundamental e o fator K é normalizado pela corrente nominal (IEEE, 2008).

Os valores padrões de fator K para transformadores e suas cargas típicas são fornecidas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Fator K**

Carga	Fator K
Lâmpadas incandescentes	K-1
Aquecedores com resistências elétricas	K-1
Motores	K-1
Controles de transformadores/ dispositivos com controles eletromagnéticos	K-1
Geradores	K-1
Iluminadores Elétricos de descarga	K-4
Equipamentos com aquecimento por indução	K-4
Soldadores	K-4
CLP e controladores de estado sólido	K-4
Equipamentos de telecomunicação	K-13
Circuitos com receptores multi-fios	K-13
Linhas de produção	K-13
Drives de motores	K-20
Circuitos de áreas críticas (Hospitais)	K-20
Circuitos industriais	K-30
Circuitos médicos	K-30
Circuitos de laboratórios educacionais	K-30
Circuitos de micro/mini escritórios	K-30
Outras cargas com alto índice de harmônicos	K-40

**Fonte: A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation, ETASR, 2011.**

Através dos valores expostos na Tabela 2 é possível que o transformador suporte as cargas harmônicas sem sobreaquecer, mantendo sua vida útil.

Ao reduzir sua potência nominal, em uma aplicação que apresenta distorção de corrente e tensão, permite que o transformador passe a suportar o aquecimento causando às perdas geradas pelos harmônicos. Entretanto, não é uma solução econômica, porque implica na redução da capacidade do transformador. Devido ao aumento de equipamentos que gera harmônicos, a indústria criou o conceito de transformador de fator K (FRANK,1997).

## **2.2 Qualidade da energia elétrica**

A qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi objeto de interesse. Porém, até há algum tempo atrás, a qualidade tinha a ver sobretudo com a continuidade dos serviços, ou seja, a principal preocupação era que não houvesse interrupções no fornecimento de energia, e que as tensões e frequências fossem mantidas dentro de determinados limites considerados aceitáveis. Durante vários anos a maioria dos receptores ligados às redes elétricas eram cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são senoidais, as correntes consumidas são senoidais com mesma frequência, podendo apenas encontrar-se defasadas relativamente à tensão (AFONSO; MARTINS, 2003).

Distúrbios associados à qualidade da energia elétrica podem ser agrupados em categorias de acordo com a magnitude e duração dos fenômenos. Estes têm natureza específica, porém pode-se estabelecer um procedimento geral para avaliação do problema de qualidade. Posteriormente, são feitas simulações e medições, avaliando as medições e preparando as soluções para a questão de qualidade, para realizar posteriormente uma análise de viabilidade econômica, a fim de identificar a alternativa que propicie a melhor relação de custo-benefício. A Tabela 3 contém fenômenos de qualidade de energia elétrica (DUNGAN et al., 2002).

Tabela 3 - Principais Distúrbios associados à qualidade da energia.

Principais fenômenos de qualidade de energia elétrica		
Categorias	Duração	Amplitude (p.u.)
<b>Transitórios</b>		
Impulsivo	50 ns - 1ms	-
Oscilatórios	5us - 50ms	0 - 0,8
<b>Variações de curta duração</b>		
Interrupção transitória	> 1 minuto	0
Afundamento de tensão	> 1 minuto	0,8 - 0,9
Salto de tensão	> 1 minuto	1,1 - 1,2
Desequilíbrios	Regime permanente	0,02 - 0,05
<b>Distorção de forma de onda</b>		
Harmônicas	Regime permanente	0 - 0,2
Corte de tensão	Regime permanente	-
Ruído	Regime permanente	0 - 0,01
<b>Flutuação de tensão</b>	Intermitente	0,001 - 0,07
<b>Variação de frequência</b>	< 10 s	-

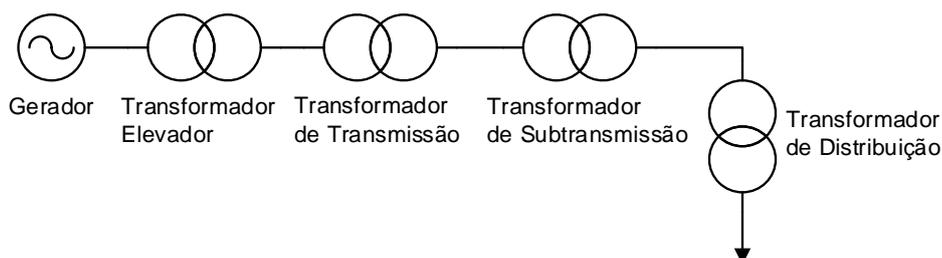
Fonte: DUNGAN et al., 2002

### 2.3 Transformadores e suas perdas

No sistema elétrico moderno, a energia é gerada com tensões de 12 a 25kV. Os transformadores elevam a tensão a níveis de 110kV a 1000kV para realizar a transmissão à longa distância com perdas muito baixas, reduzindo a tensão para a faixa de 13,8 a 34,5kV para a distribuição local, e finalmente permitir que a energia elétrica seja usada de forma segura em lares, escritórios e fábricas com tensões baixas com 127V (CHAPMAN, 2012).

No sistema elétrico, a energia flui por vários transformadores, com as respectivas classes de tensão e potência, segundo a Figura 2 (BARBOSA, 2017).

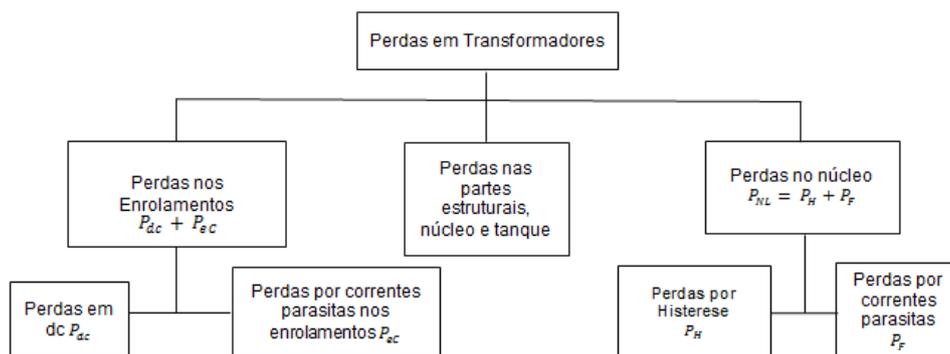
Figura 2 – Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Barbosa, 2017

Os transformadores sob carga dissipam calor por efeito Joule nas resistências dos enrolamentos relativas às correntes que circulam neles (correntes de cargas e correntes parasitas). Existem perdas de dispersão presentes em partes que não são enrolamentos, tais como núcleo, estrutura metálica e tanque (IEEE, 2008). A Figura 3 descreve as perdas.

**Figura 3 -Diagrama das Perdas ocorridas em Transformadores**



**Fonte: Autoria Própria.**

As perdas do transformador versam de perdas no núcleo e na carga. Estas podem ser expressas pela Equação (2.8).

$$P_T = P_n + P_L \quad (2.8)$$

Onde,

$P_T$ : perda total;

$P_n$ : perdas no núcleo ou sem carga;

$P_L$ : perdas de carga.

A corrente no núcleo do transformador possui harmônicas, mas são pequenas comparadas com a corrente de carga e seus efeitos sobre as perdas é mínimo. Como resultado, assume-se o padrão da ANSI/IEEE C57.110 que na presença de harmônicas não aumenta a perda do núcleo (IEEE, 2008).

As perdas de carga são compostas por perda Joule ( $RI^2$ ), perda por corrente parasita no enrolamento e perda por dispersão, segundo a Equação (2.9).

$$P_L = RI^2 + P_{CE} + P_D \quad (2.9)$$

onde,

$RI^2$ : perdas devido a corrente de carga e a resistência d.c dos enrolamentos

$P_{CE}$ : perda da corrente parasita no enrolamento

$P_D$  : perdas de dispersão (histerese) nas braçadeiras, tanque, etc.

As perdas  $RI^2$  são associadas ao fluxo da corrente e das resistências dos enrolamentos. Outra denominação para a este fenômeno é chamar de perdas ôhmicas (RAVOT, 1988) e (BLUME, 1951). Sendo está perda proporcional ao quadrado da amplitude da corrente de carga, incluindo as componentes harmônicas, porém é independente da frequência.

A perda no núcleo dos transformadores é ocasionada pelo fluxo principal do circuito magnético. Esta perda é dividida em duas. Uma é a perda por histerese e a outra por correntes parasitas (OLIVEIRA, 1984). Perdas por histerese ( $P_H$ ) e perdas por correntes parasitas ( $P_F$ ) conforme as Equações (2.10) e (2.11) (GUIMARÃES , 2006).

$$P_H = \upsilon f B^n K_h \quad (2.10)$$

$$P_F = K_e f^2 B^2 \tau_{chapa}^2 \quad (2.11)$$

onde,

$K_e$  e  $K_h$  são constantes que dependem do material que compõe o núcleo;

$\upsilon$  é o volume do material ( $m^3$ );

$\tau_{chapa}$  espessura da laminação ( $mm$ );

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

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

O cálculo estimado da perda por correntes parasitas nos enrolamentos, gerada pelo vetor campo magnético paralelo à seção do condutor, pode ser expresso pela Equação (2.12) (MAKAROV, 2000).

$$P_{CE} \approx \frac{\pi f^2 \tau^2 \mu_0 H^2}{3\rho} (W/m^2) \quad (2.12)$$

onde,

$\tau$  é a dimensão do condutor, que é perpendicular ao campo magnético ( $m$ );

$\rho$  é a resistividade do material do condutor ( $\Omega \cdot m$ );

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar ( $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ );

$H$  é a intensidade do campo magnético (H).

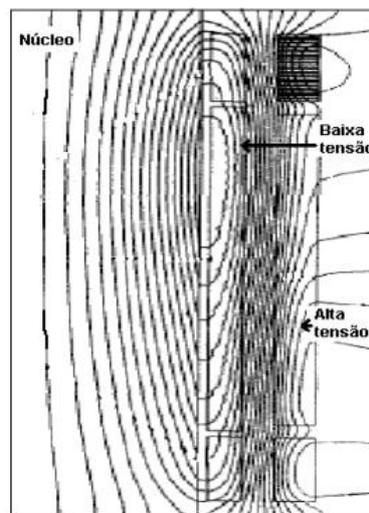
Dependendo da frequência de operação o fluxo magnético pode não penetrar totalmente no condutor, assim para altas frequências a Equação (2.12) se torna conservadora (MAKAROV, 2000).

Nas equações de perdas no núcleo e enrolamentos, a frequência está presente em todas. Havendo harmônicos de correntes, existem harmônicas na onda de fluxo induzido. As perdas são maiores frente as correntes harmônicas. O transformador sob carga não linear apresenta sobreaquecimento, que compromete seu isolamento e vida útil (GUIMARÃES, 2006).

Dependendo do tipo de carga, pode-se ter uma considerável predominância de harmônicos. Cargas que prevaleçam harmônicas de ordem ímpar e múltiplas de três e componente de corrente contínua ( $dc$ ) da corrente de carga podem gerar, em alguns transformadores conectados em estrela (Y), um aumento da corrente de excitação, eleva as perdas no núcleo (IEEE-2008).

As perdas por correntes parasitas em transformadores são geradas devido aos fluxos magnéticos dispersos que induzem tensões através de cada condutor, conforme a Figura 4. Estas tensões são responsáveis pela circulação de correntes parasitas nestes enrolamentos. A concentração de fluxos magnéticos produz correntes parasitas com maior intensidade no início e no final dos enrolamentos de tensão superior e de tensão inferior, o que produz um aquecimento além do normal nestas regiões (LISITA, 2004).

Figura 4 - Campo eletromagnético produzido por correntes de carga nos enrolamentos.



Fonte: Lisita, 2004

O efeito do aumento das perdas por correntes parasitas produzidas pelas correntes de cargas não lineares em enrolamentos é o calor gerado. Esta alta temperatura é o que mais afeta o bom funcionamento do transformador, assim, ela é vista como o aspecto mais crítico em relação as perdas produzidas por correntes harmônicas. Principalmente porque este aumento é dado por condutores que transportar as correntes não-senoidais. A elevação de temperatura em pontos já quentes do transformador torna-se um fator de limitação no projeto de transformadores (LISITA, 2004).

## 2.4 Cargas lineares e não lineares

Quando cargas lineares são conectadas ao sistema elétrico e recebem sinais senoidais puros de tensão, obtêm-se formas de onda de corrente com a frequência fundamental da rede. Estes sinais, sem deformação, fazem com que o transformador opere em condições satisfatórias, evitando o aumento das perdas pertinentes a ele. Quando cargas do tipo não linear são ligadas a essa máquina, correntes múltiplas da fundamental são geradas, denominadas correntes harmônicas. O somatório destas correntes gera uma deformação na forma de onda, gerando problemas ao transformador, como o aumento do aquecimento e das perdas, a redução da capacidade de conversão de potência e a redução da sua vida útil (MOHAMMAD et al., 2008; MATTOS, 2011).

A existência de cargas não lineares é a principal causa de perturbações como distorções harmônicas, flutuações de tensão e desequilíbrios. A característica não linear entre tensão e corrente ocorre em equipamentos com núcleos saturados, em fontes chaveadas, em controladores de estado sólido, transformadores, reatores eletrônicos, computadores, acionamentos de velocidade variável e lâmpadas fluorescentes compactas.

O uso de cargas que não apresentam uma relação linear entre tensão e corrente caracterizam estas cargas como não lineares. Outra causa da não linearidade são as descontinuidades em decorrência do chaveamento das correntes em pontes retificadoras, compensadores estáticos e conversores eletrônicos (DECKMANN; POMILIO, 2010).

Os números de equipamentos eletrônicos vêm aumentando significativamente. Equipamentos como reatores, equipamentos de comunicação, conversores eletrônicos, e outras cargas que utilizam chaves semicondutoras criam um problema para projetistas e usuários devido ao formato não senoidal de suas cargas. Ao ser definida como carga não linear, a alimentação necessária a estes equipamentos possui harmônicos de corrente que causam sobreaquecimento e perda de potência nos transformadores, desgaste de isolamentos, torques oscilatórios em motores de indução, dentre outras anomalias que podem causar danos ao sistema elétrico (PHIPPS, 1994).

### 3. COMPARAÇÕES E RESULTADOS

Transformadores alimentando cargas não lineares geram fluxos adicionais dispersos que produzem correntes parasitas em enrolamentos, núcleo e partes estruturais, aumentando as perdas. Estas perdas podem ser verificadas através da camada em um condutor elétrico onde a corrente se distribui, aumentando a resistência do condutor, estas perdas são definidas através do efeito peculiar. Por exemplo, um cilindro carregado com uma carga  $Q$ , através do princípio da simetria e da Lei de Biot-Savart, apresentará uma carga uniformemente distribuída por toda a sua superfície, fato válido se considerar a corrente elétrica invariante no tempo. O condutor cilíndrico é sujeito ao campo elétrico constante, com carga uniformemente distribuída pela seção do cilindro condutor.

O efeito pelicular está relacionado com a distribuição não uniforme de corrente elétrica variável no tempo, o que resulta em um campo elétrico e magnético variáveis no tempo. Uma variação de campo magnético induz forças eletromotrizes que dão origem a correntes e estas correntes por sua vez dão origem a novas forças eletromotrizes e campos magnéticos que são opostos ao campo magnético original, gerando uma diminuição da seção efetiva por onde a corrente elétrica está distribuída.

A relação entre a espessura  $\delta$  desta camada e a frequência  $\omega$  das correntes é traduzida pela Equação (3.1).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.1)$$

onde,

$\delta$ : espessura da coroa fictícia de distribuição da corrente [m];

$\sigma$ : condutividade do material [S/m];

$\mu$ : permeabilidade magnética do material [H/m];

$\omega$ : frequência angular [rad/s].

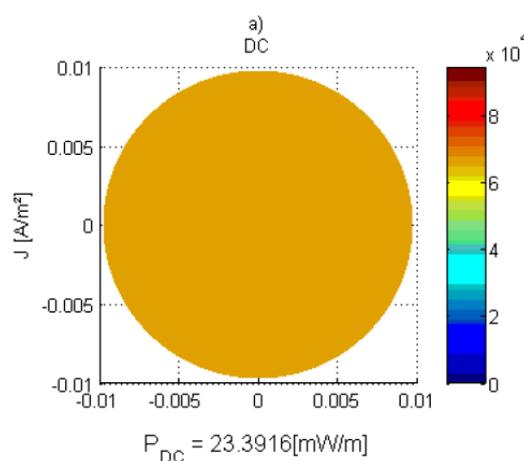
A espessura da coroa fictícia afeta absolutamente a área efetiva da seção do cabo condutor, e se estiver submetido a elevadas frequências, a espessura diminuirá conjuntamente com sua seção efetiva.

Assim, foram realizadas três simulações em que, considerando um condutor de seção circular, aplicou-se uma corrente nominal com diferentes frequências. Observou-se o comportamento da corrente na seção do condutor em relação à sua frequência em cada um destes casos. Para a execução deste exemplo foi utilizado a ferramenta de *software MatLab®*, onde foi criado um *grid* com 1000 pontos em formato circular e aplicado a função de Bessel normalizada com a Equação (3.1), objetivando obter a distribuição de corrente ao longo da seção do condutor para as diferentes frequências analisada.

Considerou-se um condutor com seção circular de  $300\text{mm}^2$ , e uma corrente nominal de 2A percorrendo-o. Nas Figuras 5 a 10 estão representadas as distribuições da densidade de corrente por metro quadrado na seção do condutor circular e as densidades de corrente em relação ao centro do condutor.

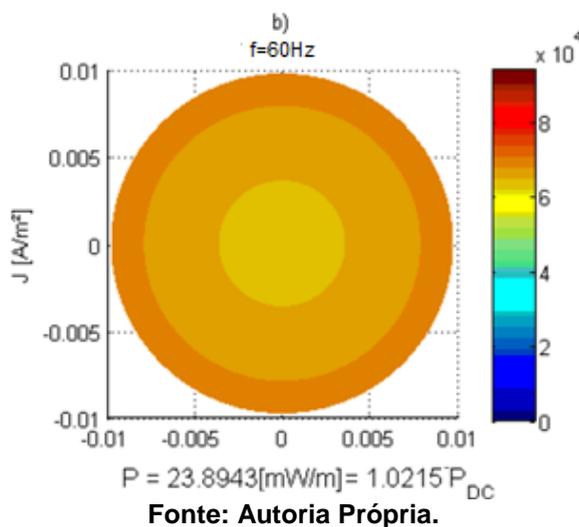
A Figura 8 representa a distribuição da densidade de corrente contínua no condutor, sendo possível observar uma distribuição uniforme ao longo da seção do condutor.

**Figura 5 - Simulação do Efeito Pelicular no condutor de cobre de seção circular de  $300\text{mm}^2$ , com corrente de  $20^{\text{a}}$**



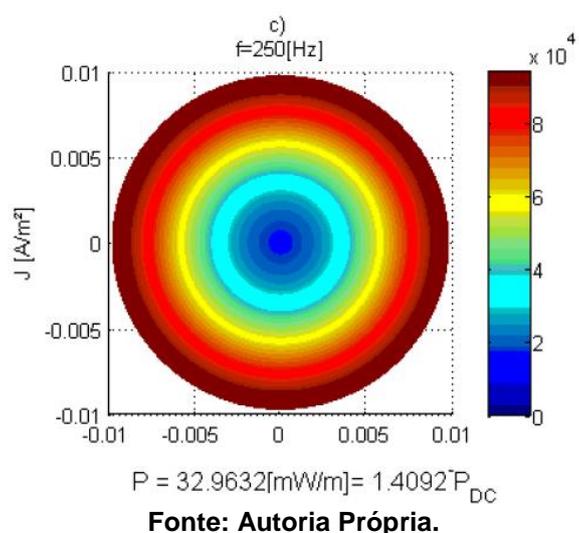
A Figura 6 representa a distribuição da densidade de corrente alternada ao ser submetido a uma frequência de 60Hz. É possível observar de 7,4% do aumento da concentração de corrente na periferia do condutor.

**Figura 6 - Simulação de Efeito Pelicular do condutor de cobre de seção circular de 300mm<sup>2</sup>, com corrente de 20A, 60Hz**



A Figura 7 representa a distribuição da densidade de corrente alternada com uma frequência de 250Hz. Neste caso, é possível notar uma variação do valor absoluto da densidade de corrente em 428%.

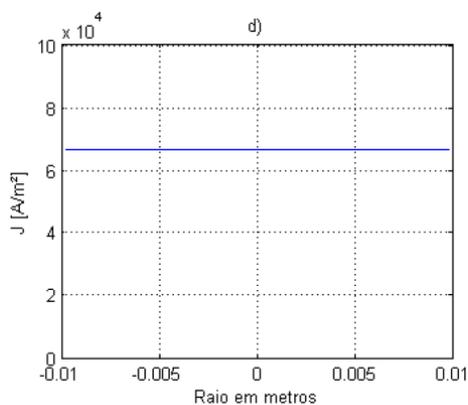
**Figura 7 - Simulação de Efeito Pelicular do condutor de cobre de seção circular de 300mm<sup>2</sup>, com corrente de 20A, 250Hz**



A Figura 8 representa o valor da distribuição da densidade de corrente contínua em relação ao centro do condutor de seção circular. Assim, como

verificado anteriormente, a densidade encontra-se uniformemente distribuída por toda a seção do condutor. Assim sendo, espera-se que a relação no centro do condutor seja constante, dando origem a uma reta.

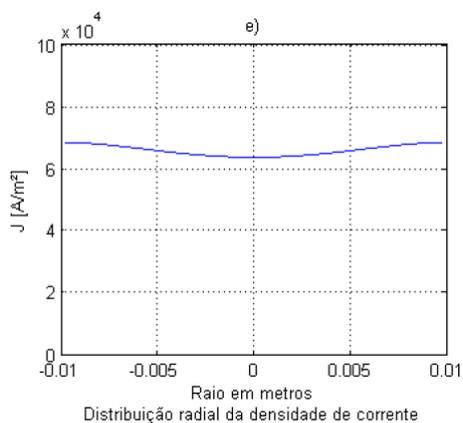
**Figura 8 - Densidade uniformemente distribuída, corrente contínua**



**Fonte: Autoria Própria.**

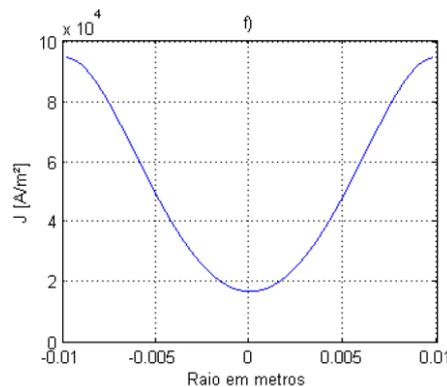
As Figuras 9 e 10 representam a densidade de corrente alternada em relação ao centro do condutor. Elas se diferenciam através do valor de densidade de corrente obtido em cada um dos casos.

**Figura 9 - Distribuição da densidade de corrente alternada, para frequência de 60 Hz**



**Fonte: Autoria Própria.**

**Figura 10 - Distribuição da densidade de corrente alternada, para frequência de 250Hz**



**Fonte: Autoria Própria.**

Por este exemplo verifica-se que quando se aumenta a frequência da corrente, ocorre um aumento de densidade da mesma na periferia do condutor. Esta concentração de corrente na periferia em prejuízo da área restante de seção disponível pode ser modelada pelo aumento da resistência do cabo, onde a corrente circula e aumenta as perdas do condutor por efeito de Joule.

O efeito peculiar é caracterizado por esta diminuição de fluxo total é representada pela criação de uma camada onde a corrente se distribui.

Um transformador de distribuição que alimenta cargas não lineares está sujeito a perdas adicionais, ou seja, uma desclassificação do mesmo, existem normas internacionais (uma europeia (CENELEC) e duas americanas) que permitem quantificar esta desclassificação através de índices, estes são quantificados pelo espectro harmônico da corrente de carga que as originam.

A fim de minimizar os efeitos das perdas no transformador, causadas pelo conteúdo harmônico de carga não linear, é aplicado um fator de compensação, calculado conforme a norma a ser aplicada. Segundo a IEEE existe um fator de perdas devido a harmônicas ( $F_{HL}$ ), já a norma europeia CENELEC estabelece o conceito do fator K, e através da *Underwriters Laboratory* pode-se obter o *K-factor*, ( $K_{UL}$ ).

Neste trabalho, considerou-se um transformador de 630kVA com as características elétricas, perdas em vazio e em curto-circuito descritas nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6. Estes valores utilizados foram obtidos através de um certificado de ensaio fictício, equivalente aos elaborados em laboratórios de alta tensão.

**Tabela 4 - Características elétricas do transformador 630kVA**

<b>Potência [kVA]</b>	630	
<b>Grupo de Ligações</b>	Dyn5	
	<b>Tensão [V]</b>	
Posição (Tap)	Alta Tensão	Baixa Tensão
1	10500	
2	10250	
3	10000	420
4	9750	
5	9500	
<b>Corrente Nominal [A]</b>	36,4	866

Fonte: Autoria Própria

Através deste certificado de ensaio fictício, obteve-se a tabela que mostra as perdas em vazio do transformador de 630kVA, expressa abaixo:

**Tabela 5 - Perdas em vazio do transformador 630kVA**

Medida de Perdas ( $P_o$ ) e da Corrente ( $I_o$ ) em Vazio							Ligação 2U-2V-2W
$U_N$ [%]	$U_N$	$I_o1$ [A]	$I_o2$ [A]	$I_o3$ [A]	Média[A]	$I_o$ [%]	$P_o$ [W]
	Tensão Nominal em vazio	Corrente Primária em vazio	Corrente Secundária em vazio				(Perdas em Vazio)
100	420	2,71	1,9	2,47	2,36	0,27	849

Fonte: Autoria Própria

Obteve-se também a tabela que mostra as perdas em curto-circuito do transformador de 630kVA e em carga do transformador de 630kVA, expressa abaixo:

**Tabela 6 - Perdas em curto-circuito e em carga do transformador de 630kVA.**

Medida da Tensão de Curto-Circuito e das Perdas em Carga											
Posição (Tap)	Corrente [A]	Tensão[V] U	Perdas [W] P	NORMALIZADO A 75° C							
				$P_{CC}$	$\sum RI^2$	$P_{Adicionais}$	T[°C]	$\sum RI^2$	$P_{Adicionais}$	$P_{CC}$	T[°C]
3	36,28	393,3	4686	4717	4239	478	19,4	5165	392	5557	3,97

Fonte: Autoria Própria

### 3.1. Forma da onda de corrente com conteúdo harmônico de carga não linear

Neste estudo considerou-se como carga não linear a corrente com o conteúdo harmônico. A forma de onda da corrente encontra-se representada na Figura 14, que foram utilizadas para seu esboço a corrente harmônica de ordem  $h$  e a relação entre esta corrente e seu valor de corrente eficaz.

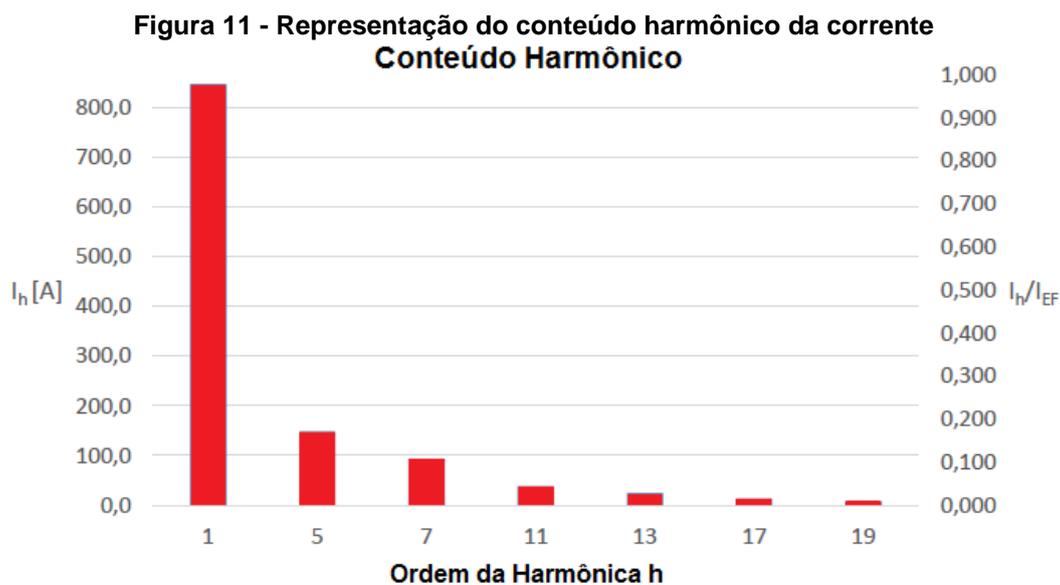
Através dos dados coletados e expostos na Tabela 7, consegue-se observar um comportamento para este conteúdo harmônico.

**Tabela 7 - Conteúdo harmônico da corrente e respectivos cálculos ( $q=1,7$ )**

A	B	C	D	E	F	G	H	I
$h$	$I_h$	$I_h/I_{ef}$	$(I_h/I_{ef})^2$	$h^2$	$(I_h/I_{ef})^2 * h^2$	$I_h^2$	$h^q$	$(I_h/I_{ef})^2 * h^q$
1	846,80	0,98	0,96	1	0,96	717067,24	1,00	0,96
5	148,09	0,17	0,03	25	0,73	21931,74	15,43	0,45
7	93,56	0,11	0,012	49	0,57	8753,59	27,33	0,32
11	38,11	0,04	0,002	121	0,23	1452,43	58,93	0,11
13	24,25	0,03	0,001	169	0,13	588,15	78,29	0,06
17	12,99	0,012	0,0002	289	0,07	168,74	123,53	0,03
19	8,49	0,01	0,0001	361	0,035	72,03	149,24	0,01

Fonte: Autoria Própria.

Através deste perfil de conteúdo harmônico de corrente, consegue-se observar um valor de corrente eficaz de 866A, que pode ser observada através da Figura 11.



Fonte: Autoria Própria.

Esta forma de onda apresenta um valor eficaz da corrente de 866 A, calculada através da Equação (2.5). Adicionalmente apresenta também uma taxa de distorção harmônica (THD) de 21,44% calculada através da equação (3.2) de distorção harmônica total de corrente, correlacionada com seu valor de corrente eficaz no denominador:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^h I_h^2}}{I_{ef}} \quad (3.2)$$

A seguir será mostrado como são feitos os cálculos de forma a determinar a desclassificação do transformador, de acordo com cada uma das normas e para uma mesma corrente harmônica.

### 3.1.1. Norma Europeia – fator K

Tendo como base os casos de estudo anteriormente apresentados, o fator K é obtido através da seguinte ordem:

- 1º. Obter as perdas por efeito de Joule do transformador em pu;
  - a. Recorrer à Tabela 6 e executar a divisão do somatório das perdas por efeito Joule com as perdas em curto-circuito, ambas normalizadas a 75°C.
- 2º. Com o resultado obtido encontrar o “e” através de  $e = \frac{1}{RI_{ef}^2} - 1$ ;
- 3º. Obter o somatório dos valores da coluna I da Tabela 7;
- 4º. Obter o quadrado da divisão do valor da corrente da 1ª harmônica com o valor eficaz da corrente;
- 5º. Aplicar a Equação (2.3) utilizando os valores anteriores.

Assim, tem-se o fator K do transformador em estudo, com base na forma de onda da corrente (igual a 1,0635).

O valor da desclassificação do transformador, DRK, é obtido pelo inverso do valor do fator K calculado. Neste caso, o transformador sujeito à

forma de onda apresentada irá sofrer uma desclassificação de 94%, ou seja, funcionará com 94% da potência nominal.

### 3.1.2. Norma Americana IEEE - $F_{HL}$

O fator harmônico da corrente  $F_{HL}$  é dado pela aplicação da Equação (2.7). O numerador desta equação é o somatório da relação entre corrente harmônica e eficaz ao quadrado, multiplicado pelo harmônico ao quadrado, valores expressos na coluna F da Tabela 7. O denominador obtém-se apenas pela relação entre correntes, que está expressa pela somatória da coluna D da mesma tabela.

Para este estudo de caso, esta divisão resulta no fator harmônico,  $F_{HL}$  igual a 2,7255. A desclassificação do transformador é obtida pela equação (21), considerando que:

$$P_{\text{carga-R}}(\text{pu}) = 0,9295, \text{ obtido através da Tabela 6;}$$

$$P_{\text{EC-R}}(\text{pu}) = 0,0705 \text{ obtido através da Tabela 6;}$$

Resultando numa desclassificação de 88,29%, ou seja, a corrente máxima permitida será 88,29% da corrente nominal do transformador.

### 3.1.3 Norma Americana $K_{UL}$

O  $K_{UL}$  é calculado pela Equação (2.6) sendo, obtido pelo somatório da coluna F da Tabela 7, de mesma maneira para a norma americana dada pela IEEE, porém o resultado é igual a 2,7258.

O valor da desclassificação do transformador  $DRK_{UL}$  é obtido da relação entre as perdas em carga calculadas com as perdas em carga do ensaio laboratorial.

$$DRK_{UL} = \sqrt{\frac{1+e}{1+K_{UL}*e}} \quad (3.3)$$

Recorrendo à Equação (3.3) obteve-se uma desclassificação do transformador de 94,42%.

Quando comparado com o valor obtido em laboratório (no certificado de ensaio), este valor de perdas permite concluir que este transformador terá uma desclassificação mostrada na Tabela 8, abaixo.

**Tabela 8 - Resultados do Estudo de Caso**

De-rating %			
DRKUL	DRFHL	DR <sub>K</sub>	Média
<b>94,42%</b>	88,29%	94,03%	92,25%

**Fonte: Autoria Própria.**

Para o exemplo em consideração, a norma americana  $DR_{F_{HL}}$  obteve a maior desclassificação, com valor de 88,29%. Isso significa que ela foi a mais conservativa, isto é, nestas condições de carga, o transformador que tem disponível 630kVA só poderá utilizar 556kVA de forma a não entrar em sobrecarga.

Assim sendo, um transformador está sujeito a perdas adicionais causadas pela presença de harmônicas de corrente. Estas provocam a desclassificação do transformador sendo necessário calcular o fator que conduz a esta desclassificação, e calculando o seu inverso surge o fator K.

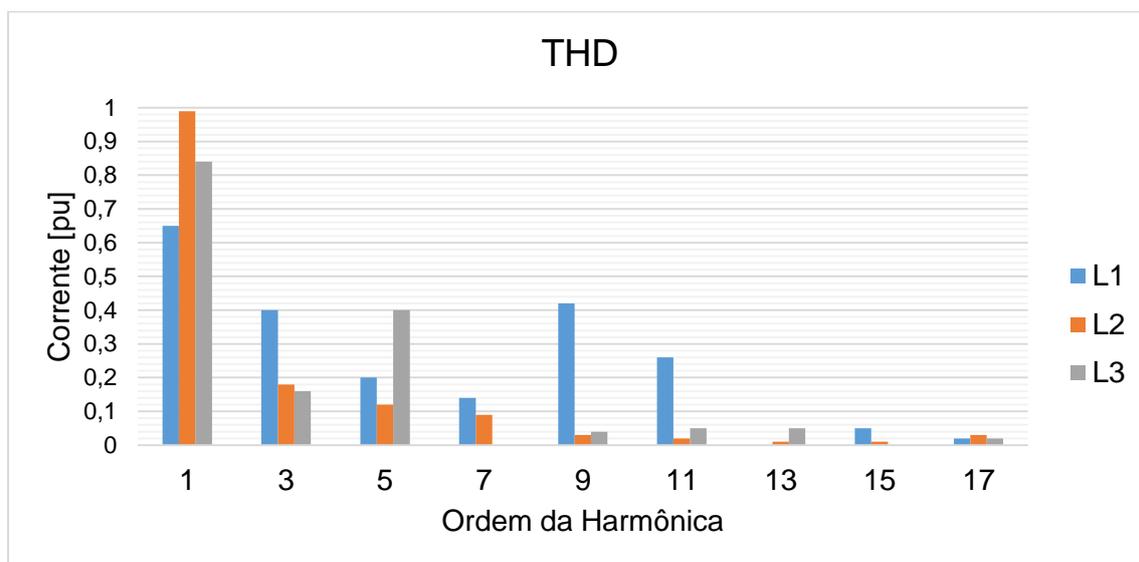
A presença de harmônicas de corrente geradoras de perdas, conduzem à introdução de um fator de compensação,  $F_{HL}$ , de forma a reestabelecer o equilíbrio do transformador que está comprometido pelo efeito das harmônicas de corrente. Após o cálculo deste fator, utilizando os resultados dos ensaios elétricos, pode-se calcular a corrente máxima do transformador, conhecendo-se o valor da desclassificação no qual está submetido.

A norma  $UL$  depende da distribuição harmônica da corrente e da amplitude da mesma. O valor do  $UL$  depende da corrente nominal no secundário do transformador. Caso os valores sejam calculados em unidades pu, o  $UL$  e o  $F_{HL}$  têm o mesmo valor numérico. O valor numérico do  $UL$  apenas é igual ao valor numérico do  $F_{HL}$  quando a raiz quadrada da soma das harmônicas de corrente ao quadrado for igual à corrente nominal no secundário do transformador. Nos capítulos 3.2 até 3.5 são feitas comparações importantes para entendermos o que cada aspecto (harmônico, construtivo, corrente eficaz, e etc.) influenciam em cada uma das normas.

### 3.2. Influência da THD

A presente análise faz comparação entre três formas de onda diferentes (L1, L2 e L3) cujo valor eficaz da corrente,  $I_{ef}$ , é idêntico (aproximadamente igual a 860A), mas com uma THD diferente, aplicadas ao transformador de 630kVA.

Figura 12 -Conteúdo harmônico de três exemplos cujo valor eficaz da corrente é idêntico



Fonte: Autoria Própria

Os resultados da Tabela 9 e Tabela 10 foram obtidos pelos métodos de cálculo desta monografia.

Analisando estes resultados, verifica-se que com um valor eficaz da corrente igual nos três casos, a diferença existente na THD influencia diretamente os resultados finais. Verifica-se também que as normas americanas refletem de forma mais acentuada as diferenças entre as harmônicas. Entre o caso L2 e o caso L3, ocorre um aumento de cerca do dobro da THD e os resultados obtidos pelas normas americanas refletem um aumento de aproximadamente quatro vezes, ou seja, uma desclassificação do transformador na ordem dos 15 a 20%.

Na norma europeia verifica-se que a THD influencia diretamente os resultados obtidos, contudo a diferença entre os casos de estudo é pouco significativa. O aumento para o dobro da THD expressa apenas um aumento

de aproximadamente de 0,1 unidades; resultando em ambos os aumentos (L2 para L3 e L3 para L1), para uma desclassificação inferior a 10%.

**Tabela 9 - Resultado obtido**

	I <sub>ef</sub>	THD	KUL	FHL	fator K
L1	863,80	102,36%	33,22	33,11	1,26
L2	861,16	22,07%	2,46	2,45	1,06
L3	861,46	49,55%	8,45	8,37	1,13

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 10 - Desclassificação do transformador – % da potência nominal**

	De-rating %			Média
	DR <sub>KUL</sub>	DR <sub>FHL</sub>	DR <sub>K</sub>	
L1	55,27%	52,79%	79,14%	62,4%
L2	95,22%	89,02%	94,59%	92,94%
L3	80,97%	76,44%	88,24%	81,83%

**Fonte: Autoria Própria**

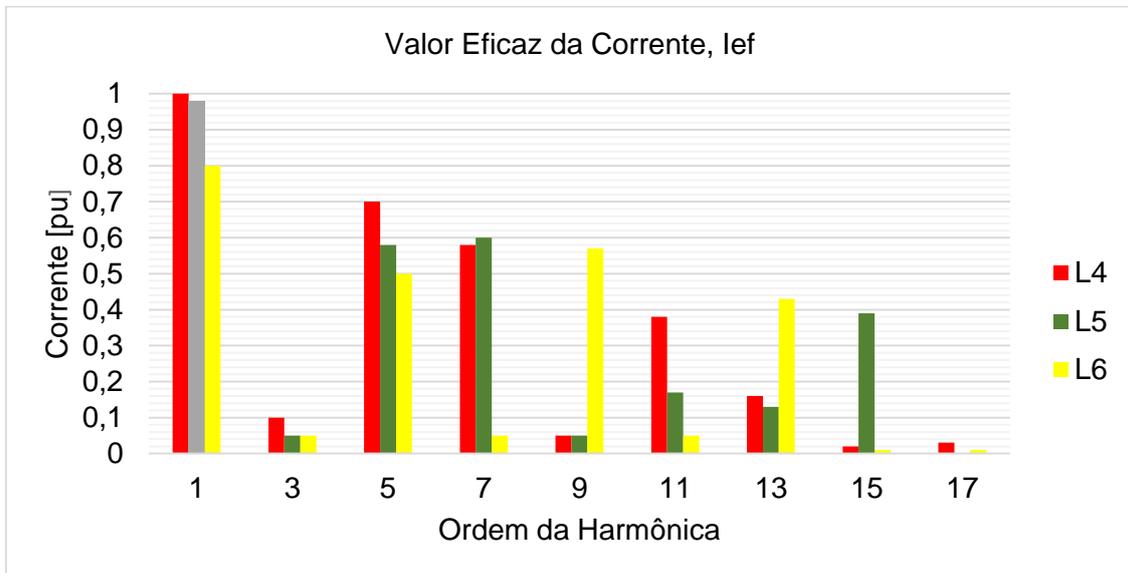
Com o auxílio da Tabela 10 verifica-se que dentre as normas analisadas, as americanas são as que mais elevam a desclassificação do transformador quando este é afetado por uma alta taxa de distorção harmônica da corrente.

A simulação ressalta que a desclassificação do transformador não pode ser apenas baseada no conhecimento do valor eficaz da corrente, porque o valor da THD é determinante para chegarmos a uma conclusão.

### 3.3. Influência do valor eficaz da corrente

A presente análise faz a comparação entre três formas de onda diferentes (L4, L5 e L6) cuja THD é idêntica ( $\approx 96,8\%$ ), mas com valor eficaz da corrente diferente, aplicadas ao transformador de 630kVA.

**Figura 13- Conteúdo harmônico de três exemplos cuja THD é idêntica**



Fonte: Autoria Própria

Os resultados expressos nas Tabelas 11 a 13 foram obtidos através da aplicação dos métodos de cálculo apresentados anteriormente.

**Tabela 11 - Resultados**

	I <sub>ef</sub>	THD	KUL	FHL	fator K
L4	1196,61	96,75%	43,79	22,62	1,38
L5	244,94	96,77%	54,32	43,82	1,41
L6	48,09	96,79%	64,38	36,08	1,48

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 12 - Desclassificação do transformador - % da potência nominal**

	De-rating [%]			Média
	DRKUL	DRFHL	DR <sub>K</sub>	
L4	49,88%	59,84%	72,71%	60,81%
L5	45,83%	47,67%	70,99%	54,83%
L6	42,75%	51,21%	67,59%	53,85%

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 13 - Resultados da relação entre corrente da harmônica e o valor eficaz da corrente**

	$I_{ef}$	$\sum \left( \frac{I_n}{I_{ef}} \right)^2$	FHL	DRFHL
L4	1196,61	1,9360	22,62	59,84%
L5	244,94	1,2396	43,82	47,67%
L6	48,09	1,7846	36,08	51,21%

Fonte: Autoria Própria

Analisando os resultados obtidos na Tabela 11, verifica-se através dos estudos de caso que, apesar de apresentarem uma THD quase idêntica, com o valor aproximadamente 96,7%, o valor eficaz da corrente influencia os resultados para a determinação do fator de desclassificação do transformador. Todos os fatores normativos são proporcionais ao valor eficaz da corrente, ou seja, a diminuição do valor eficaz da corrente resulta em aumento no valor do respectivo fator, o que expressa uma diminuição do valor da desclassificação do transformador, expressa através da Tabela 12.

No entanto, em ambas as tabelas pode-se verificar que na coluna respeitante aos resultados da norma americana,  $F_{HL}$ , a proporcionalidade anteriormente mencionada não se mantém. Para este fator, o somatório da relação entre o valor eficaz da corrente e a corrente da harmônica influencia o valor final. Estes resultados encontram-se demonstrados na Tabela 13.

### 3.4. Valor eficaz da corrente vs amplitude da 1ª harmônica

No desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso, houveram por diversas vezes a necessidade de evidenciar como eram realizados os cálculos. Isto é, qual o tipo de corrente seria utilizada como a corrente de referência, se seria o valor eficaz da corrente ( $I_{ef}$ ), Equação 2.5, ou se seria através da amplitude da corrente da 1ª harmônica,  $I_1$ .

Por exemplo, o fator da norma europeia, como descrito na Equação (2.3), recorre a ambas as variáveis. A relação fora do somatório utiliza o valor eficaz da corrente calculada conforme a Equação (2.5) e no somatório a divisão é feita com a amplitude da corrente da 1ª harmônica.

Por outro lado, os resultados das normas americanas são todos obtidos recorrendo à relação com a amplitude da 1ª harmônica.

Assim, apresentam-se as diferenças entre os cálculos efetuados com o valor eficaz da corrente e os cálculos recorrendo à magnitude da primeira harmônica da corrente.

**Tabela 14 - Tabela de cálculos realizados recorrendo à  $I_{ef}$**

A	B	C	D	E	F	G	H	I
$h$	$Ih$	$I_h/I_{ef}$	$(I_h/I_{ef})^2$	$h^2$	$(I_h/I_{ef})^2 * h^2$	$I_h^2$	$h^q$	$(I_h/I_{ef})^2 * h^q$
1	34,56	0,72	0,52	1	0,52	1194,39	1,00	0,52
3	1,80	0,04	0,00	9	0,01	3,24	6,47	0,01
5	20,30	0,42	0,18	25	4,45	411,90	15,43	2,75
7	21,60	0,45	0,20	49	9,88	466,56	27,33	5,51
9	1,80	0,04	0,00	81	0,11	3,24	41,90	0,06
11	5,40	0,11	0,01	121	1,53	29,16	58,93	0,74
13	3,60	0,07	0,01	169	0,95	12,96	78,29	0,44
15	13,83	0,29	0,08	225	18,61	191,27	99,85	8,26
17	0,36	0,01	0,00	289	0,02	0,13	123,53	0,01

Fonte: Autoria Própria

$$I_{ef} = \left[ \sum_{h=1}^{h=H} I_h^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 48A$$

**Tabela 15 - Tabela de cálculos realizados recorrendo à  $I_1$**

A	B	C	D	E	F	G	H	I
$h$	$Ih$	$I_h/I_{ef}$	$(I_h/I_{ef})^2$	$h^2$	$(I_h/I_{ef})^2 * h^2$	$I_h^2$	$h^q$	$(I_h/I_{ef})^2 * h^q$
1	34,56	1,00	1,00	1	1,00	1194,39	1,00	1,00
3	1,80	0,05	0,00	9	0,02	3,24	6,47	0,02
5	20,30	0,59	0,34	25	8,62	411,90	15,43	5,32
7	21,60	0,63	0,39	49	19,14	466,56	27,33	10,68
9	1,80	0,05	0,00	81	0,22	3,24	41,90	0,11
11	5,40	0,16	0,02	121	2,95	29,16	58,93	1,44
13	3,60	0,10	0,01	169	1,83	12,96	78,29	0,85
15	13,83	0,40	0,16	225	36,03	191,27	99,85	15,99
17	0,36	0,01	0,00	289	0,03	0,13	123,53	0,01

Fonte: Autoria Própria

Com os resultados das Tabelas 14 e 15 é possível observar:

O  $K_{UL}$  revela valores substancialmente diferentes devido a 7ª e 15ª harmônica de corrente. Estes resultados reforçam a ideia de que o  $K_{UL}$  modifica-se a medida que a magnitude das harmônicas dadas são de alta frequência.

Por outro lado, como descrito, o fator  $F_{HL}$  depende somente do conteúdo harmônico e não da magnitude da corrente, ou seja, não é levado em consideração a variável, revelando resultados iguais para ambos os casos.

O fator K possui a particularidade de usar ambos os casos na sua equação. Contudo e à semelhança da norma americana está associada à 7ª e à 15ª harmônica. A sua relação com a harmônica fundamental influencia o valor de desclassificação do transformador.

**Tabela 16 - Resultados obtidos com  $I_{ef}$**

KUL	K <sub>PT</sub>	F <sub>H<sub>L</sub></sub>	fator K
<b>36,08</b>	-	36,08	1,29
De-rating %			
DR <sub>KUL</sub>	DR <sub>KPT</sub>	DR <sub>FHL</sub>	DR <sub>K</sub>
<b>53,65%</b>	42,89%	51,21%	77,47%

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 17 - Resultados obtidos com  $I_1$**

K <sub>UL</sub>	K <sub>PT</sub>	F <sub>H<sub>L</sub></sub>	fator K
<b>69,86</b>	-	36,08	1,87
De-rating %			
DR <sub>KUL</sub>	DR <sub>KPT</sub>	DR <sub>FHL</sub>	DR <sub>K</sub>
<b>41,32%</b>	27,87%	51,21%	53,46%

Fonte: Autoria Própria

Adicionalmente deve-se atender à diferença entre o valor eficaz da corrente e a corrente da harmônica fundamental. Neste caso específico, a diferença obtida é de  $\approx 41\%$  do valor da corrente da harmônica fundamental. Assim, constata-se que o valor eficaz da corrente possui a melhor representação para o valor da magnitude de corrente do transformador.

### 3.5. Comparação entre transformadores

Para esta comparação, recorreu-se aos dados do transformador de distribuição adicional de 1600kVA. As cargas dos transformadores já foram descritas. Os resultados obtidos com o de 1600kVA foram expressas na Tabela 18.

**Tabela 18 - Resultados do transformador de 1600kVA**

KUL	K <sub>PT</sub>	F <sub>H<sub>L</sub></sub>	fator K
<b>2,726</b>	-	2,725	1,108
De-rating %			
DR <sub>KUL</sub>	DR <sub>KPT</sub>	DR <sub>FHL</sub>	DR <sub>K</sub>
<b>90,83%</b>	76,47%	81,04%	90,22%

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 19 reproduz os resultados do transformador de 630kVA.

**Tabela 19 - Resultados obtidos transformador 630kVA**

KUL	$K_{PT}$	$F_{HL}$	fator K
<b>2,726</b>	2,725	1,064	-
De-rating %			
$DR_{KUL}$	$DR_{KPT}$	$DR_{FHL}$	$DR_K$
<b>94,42%</b>	91,63%	88,29%	94,03%

**Fonte: Aatoria Própria**

Analisando os resultados observa-se que os valores obtidos pelas normas americanas não são afetados pelas características do transformador. Sendo a forma de onda idêntica entre os transformadores, o fator obtido será o mesmo. A norma europeia sofre uma alteração do seu valor, pois na Equação (2.3) a estimativa das perdas é obtida pela da relação de perdas por efeito Joule com as perdas totais de curto-circuito, dos ensaios do transformador.

Para o cálculo da desclassificação do transformador, tal como citado anteriormente, as características do equipamento são importantes para sua análise. Dos resultados obtidos, pode afirmar-se que, com o aumento da potência, ocorre um aumento da desclassificação do transformador. O transformador de 1600kVA tem valor superior de perdas obtidas em laboratório (afeta o  $K_{UL}$ ), uma relação entre perdas adicionais e perdas totais superiores (afeta o fator  $F_{HL}$ ) e uma estimativa de perdas superior (afeta o fator K).

Com os resultados é possível concluir que a norma europeia tem uma abordagem mais seletiva e personalizada e dependente do transformador em estudo. Os americanos apoiam os cálculos na análise da forma de onda, independentemente do tipo de equipamento, considerando as suas características elétricas apenas quando se executa o cálculo da desclassificação do transformador.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1 Considerações

Analisaram-se normas internacionais que especificam o cálculo da desclassificação de transformadores. Como a norma europeia da CENELEC, a norma americana da IEEE e a norma americana da *Underwriters Laboratory*.

Posteriormente, introduziram-se os estudos de casos para a execução dos cálculos das normas. Descreveu-se um transformador de distribuição, pela aquisição de informação presente no ensaio de um transformador. Descrevendo ainda uma forma de onda de corrente de uma carga não-linear fictícia. Finalmente comparou-se as metodologias através dos resultados obtidos.

Realizou-se então a comparação entre a metodologia das normas americana se norma europeia. Verificou-se que o  $K_{UL}$  depende da distribuição harmônica da corrente e da amplitude da mesma. O valor do  $K_{UL}$  depende da corrente nominal no secundário do transformador. Se os valores forem calculados em unidades pu, o  $K_{UL}$  e o  $F_{HL}$  possuem o mesmo valor numérico. Estes só possuem valores numéricos iguais quando a raiz quadrada da soma das harmônicas de corrente ao quadrado for igual à corrente nominal no secundário do transformador.

Foram feitas comparações utilizando três formas de onda diferentes objetivando identificar a influência do valor eficaz da corrente e da taxa de distorção harmônica na obtenção do fator de desclassificação do transformador.

Na comparação no qual o THD possui valores diferentes, as normas americanas refletiram um comportamento em que para um aumento de aproximadamente o dobro da THD, os resultados obtidos acarretam um aumento do seu valor em cerca de quatro vezes, evidenciando uma desclassificação do transformador na ordem de 15 a 20%. A norma europeia também demonstrou que a THD influência diretamente os resultados, mas a diferença entre os resultados foi menor que 10%, sendo esta considerada não significativa.

Na segunda comparação observou-se que o valor eficaz da corrente também influencia diretamente os resultados, já que todos os fatores normativos são proporcionais ao valor eficaz da corrente.

Com as comparações efetuadas é possível concluir que apesar de ambas as variáveis (THD e valor eficaz da corrente) afetarem a desclassificação do transformador, dos resultados obtidos é possível verificar que a THD tem maior influência sobre o equipamento.

Adicionalmente, foram feitas comparações das correntes  $I_{ef}$  e  $I_1$  e também comparou-se aspectos construtivos de dois transformadores diferentes, objetivando explicar questões que surgiram no decorrer do trabalho.

A primeira comparação permitiu concluir que o fator  $F_{HL}$  como depende somente do conteúdo harmônico e não da amplitude da corrente, revela resultados idênticos para ambos os casos. O fator K tem a particularidade de usar ambos os casos na sua equação. A sua relação com a harmônica fundamental influencia o valor de desclassificação do transformador. No entanto, dada a diferença obtida entre o valor eficaz da corrente e a corrente da harmônica fundamental, é possível concluir que o valor eficaz da corrente é o que melhor representa o valor da amplitude de corrente do transformador.

Através das comparações conclui-se que os fatores americanos não são afetados pelas características do transformador da carga não-linear, sendo a forma de onda idêntica entre os transformadores, o fator de desclassificação obtido será o mesmo. Por outro lado, pela norma europeia, o fator K sofre uma alteração em seu valor, pois a relação de perdas por efeito de Joule com as perdas totais de curto-circuito é obtida através dos ensaios laboratoriais no transformador.

Conclui-se as características do equipamento são cruciais para a análise do cálculo da desclassificação do transformador. Com base nos resultados obtidos, com o aumento da potência ocorre um aumento da desclassificação do transformador. O transformador de 1600kVA possui um valor superior de perdas obtidas em laboratório (afeta o  $K_{UL}$ ), uma relação entre perdas adicionais e perdas totais (afeta o fator harmônico  $F_{HL}$ ) e uma estimativa de perdas superior (afeta o fator K). Com estes resultados é possível concluir que a norma europeia tem uma abordagem mais qualitativa, assertiva, seletiva e personalizada, pois dependente do transformador em estudo. Já as

normas americanas não baseiam seus cálculos no tipo de equipamento. Estas utilizam exclusivamente a análise da forma de onda, considerando as suas características elétricas apenas quando se executa o cálculo da desclassificação do transformador.

## 4.2 Publicações

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira; FERREIRA, Jeferson Gonçalves; FIGUEIREDO, Otavio do Amaral; MENDONÇA, Marcio. **Comparação entre Transformadores a Óleo e a Seco**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC 2016. Foz do Iguaçu: COFEA/CREA, 2016.

FERREIRA, Jeferson Gonçalves; FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira; FIGUEIREDO, Otavio do Amaral; MENDONÇA, Marcio. **Simulação das Perdas a Vazio em Transformadores Trifásicos de Distribuição da Classe 15kV com Materiais Amorfo e Ferro Silício**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC 2016. Foz do Iguaçu: COFEA/CREA, 2016.

## REFERÊNCIAS

AFONSO, J. L.; & MARTINS, J. S. **Qualidade de Energia Elétrica na Indústria**. 2003. EUVEO.

BARBOSA, T. M.; FERREIRA, J. G.; FINOCCHIO, M. A. F. and ENDO, W. **Development of an Application Based on the Duval Triangle Method**. IEEE Latin America Transactions, Vol. 15, N<sup>o</sup>. 8, Aug. 2017

BLUME, L. F., BOYAJIAN, A., CAMILLI, G., LENNOX, T. C., MINNECI, S. and MONTSINGER, V. M. **Transformer Engineering**. 2nd edition, New York: Wiley, pp 55-65, 1951.

BRITISH STANDARD - CENELEC, BS EN 50464-3:2007 - **Three-phase oil-immersed distribution transformers 50Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV** - Part 3: Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents, United Kingdom: CENELEC, 2007.

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5<sup>a</sup> ed. Nova York: McGraw-Hill, 2012.

DALILA, M.S; KHALIDI, M. N.; MD SHAH M. **Distribution Transformer Losses Evaluation Under Non-Linear Load**. Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities, p. 1-6, September 2009.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Curso Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: Unicamp, 2010.

DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., BEATY, H. W., **“Electrical power systems quality”**, McGraw-Hill, USA, 2002.

ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, **A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation**. Vol. 1. Egypt, 2011.

FINOCCHIO, Marco A. F.; FRANÇA, José A. **Critério para escolha e avaliação de transformadores na presença de harmônicas**. VI ENDITEC - Encontro Nacional de Difusão Tecnológica – UTFPR, 2009.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas – com introdução a Eletrônica de Potência**. 6<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FRANK, Jerome. M. **Origin, Development, and design of K-factor transformers**. IEE Industry Applications Magazine, September / October 1997.

GUIMARÃES, M. B. **Comparação entre Métodos de Cálculo de Perdas em Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares**. 2006. Dissertação de

Mestrado – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

GODOY, M. V. **Transformadores de Potência**. Curso de combate ao desperdício de energia. Recife: Escola Politécnica de Pernambuco, 2006.

IEEE Std C57.110-2008. **Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents**. IEEE, New York, USA, February 2008.

KASSICK, E. V. **Harmônicas em sistema industriais de baixa tensão**. Florianópolis: Inep –EEL: UFSC, set. 2008.

LISITA, L. R. **Determinação de perdas, eficiência e potência máxima de transformadores de distribuição alimentando cargas não lineares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2004.

MAKAROV, S. N.; EMNUEL, A. E. **Corrected Harmonic Loss Fator For Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents**. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power – Proceedings, v.1, n.1, p. 87-90, October 2000.

MATTOS, M. M. **Estudo do Fator K em transformadores a seco**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MOHAMMAD, A. S. et al. **Derating of Asymmetric Three-Phase Transformers Serving Unbalanced Nonlinear Loads**. IEEE Transactions on power delivery, v. 23, n. 4, Oct. 2008.

NG, H. W.; HASEGAWA, R.; LEE, A. C.; LOWDERMILK, L. A. Amorphous Alloy Core Distribution Transformer. **Proceedings of the IEEE**, Vol. 79, No.11, p. 1608-1623, 1991.

OLIVEIRA, J.C.; COGO, J.R.; ABREU, J. P. G. **Transformadores: Teoria e Ensaios**, São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

PHIPPS, James K.; NELSON, John P.; SEN, Pankaj K. **Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems**. IEEE TransactionsonIndustryApplications, Vol. 30, N<sup>o</sup>. 2, 1994.

PORT, R.J. **Uma Análise Aplicada sobre Medição e Faturamento de Potências e Energias Não Ativas**. 2006. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, 2006.

RAVOT, J. F. and KREUZER, J. **Losses in Rectifier Transformers: Factory Test Losses in Comparison with Actual Operating Losses**. In Proc. Cigre, paper 12-06, 1988.

SCHNEIDER ELETRIC. **Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão.** Qualidade de energia – Harmônicas. Mar. 2003. Disponível em: <[www.schneider-eletric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf](http://www.schneider-eletric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf)>. Acesso em: out. 2016.

TACI, M. Salih; DOMIJAN, Jr. Alexander. **The effects of linear and non-linear operation modes in transformers.** In: 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2004.

UL 1561, **Dry-Type General Purpose and Power Transformer.** Underwriters Laboratory, Inc., Northbrook – IL, US, 1994.

UL 1562, **Transformers, Distribution, Dry-Type – Over 600 Volts.** Underwriters Laboratory, Ins., Northbrook – IL, USA, 1994.

## ANEXO

Tabela 20 - Características elétricas do transformador TD1600kVA

Potência [kVA]	1600	
Gr. Ligações	Dyn5	
	<b>Tensão [V]</b>	
Posição	AT	BT
1	15750	
2	15375	
U <sub>N</sub> - 3	15000	400
4	14625	
5	14250	
Corrente Nominal [A]	61,6	2309

Fonte: Autoria Própria

Tabela 21 - Perdas em vazio do transformador TD1600kVA

Medida de Perdas ( $P_o$ ) e da Corrente ( $I_o$ ) em Vazio							Ligação 2U-2V-2W
$U_N$ [%]	$U_N$	$I_{o1}$ [A]	$I_{o2}$ [A]	$I_{o3}$ [A]	Média[A]	$I_o$ [%]	$P_o$ [W]
100	399,8	13,69	10,49	14,08	12,75	0,55	3196

Fonte: Autoria Própria

Tabela 22 - Perdas em curto-circuito e em carga do TD1600kVA.

Medida da Tensão de Curto-Circuito e das Perdas em Carga										
Posição	Corrente [A]	Tensão [V]	NORMALIZADO A 75° C							
			$P_{CC}I_N$	$\sum RI^2$	$P_{AD}$	T [°C]	$\sum RI^2$	$P_{AD}$	$P_{CC}$	T [°C]
3	61,6	921,5	9803	7686	2118	21,2	10770	1511	12280	6,14

Fonte: Autoria Própria