



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA**

FRANCISCO BRENO BARBOSA FREITAS

**ESTUDO DAS PERDAS EM TRANSFORMADORES OPERANDO COM CARGA
NÃO LINEAR**

**SOBRAL
2018**

FRANCISCO BRENO BARBOSA FREITAS

ESTUDO DAS PERDAS EM TRANSFORMADORES OPERANDO COM CARGA NÃO
LINEAR

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Campus Sobral, para obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira.

SOBRAL

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F936e Freitas, Francisco Breno Barbosa.
Estudo das Perdas em Transformadores operando com Carga Não Linear / Francisco Breno Barbosa
Freitas. – 2018.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira.

1. Transformadores. 2. Perdas. 3. Harmônicas. I. Título.

CDD 621.3

FRANCISCO BRENO BARBOSA FREITAS

ESTUDO DAS PERDAS EM TRANSFORMADORES OPERANDO COM CARGA NÃO
LINEAR

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do Ceará,
Campus Sobral, para obtenção do título de
bacharel em engenharia elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Leonardo Ponte Ferreira Gomes Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Trindade Santa, Pai, Filho e Espírito Santo. À Santa Mãre Igreja Católica Apostólica Romana. A todos os irmãos e irmãs com que Deus me presenteou nessa vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará, por todo o auxílio prestado no decorrer de minha graduação e pela oportunidade de fazer parte desta comunidade acadêmica.

À Prof. Dr. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira, por toda paciência e dedicação, tanto na orientação do presente trabalho, quanto na orientação na Bolsa de Iniciação a Docência.

Ao Professor Adson Bezerra Moreira e ao Engenheiro Leonardo Ponte, participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha mãe Claudia Ferreira que durante todos esses anos tem sido o porto seguro, meu e de meus irmãos.

À minha avó Tininha que é para mim o modelo mais perfeito de pessoa humana, meu modelo e minha guia.

Aos meus amigos: Igor, Vanessa Freire, Ádila, Lorena Oliveira e Valneide Matias.
Obrigado pelo companheirismo de vocês!

“Depositei a minha confiança na grande bondade de Deus que nunca deixa de ajudar a quem se determina a glória do mundo rejeitar, com Cristo a cruz carregar, por Ele tudo abandonar”

Santa Teresa de Jesus

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo das perdas nos transformadores na presença de harmônicas e uma avaliação do aumento no carregamento com o aumento da distorção da corrente de carga. Apesar dos transformadores serem dispositivos elétricos com grande eficiência, em torno de 98%, a necessidade de avaliar o comportamento dos transformadores se deve ao aumento das cargas não lineares conectadas à rede elétrica, que injetam correntes de carga cada vez mais distorcidas no sistema elétrico, aumentando também as perdas nestes dispositivos. O grande número de transformadores em operação conectados a cargas não lineares gera um desperdício acentuado de energia. As principais perdas em transformadores são as perdas no ferro e no cobre do transformador, também chamadas perdas no núcleo e perdas nos enrolamentos. Utilizando o software PSIM, o modelo de circuito equivalente e os parâmetros de um transformador de distribuição, essas perdas são analisadas. Os resultados mostram o aumento das perdas com o aumento da distorção e da frequência da tensão e da corrente, bem como predizem situações de sobrecarga para o modelo de transformador simulado.

Palavras-chave: Transformadores, Perdas, Distorção Harmônica.

ABSTRACT

This work presents a study of the losses in the transformers in the presence of harmonics and an evaluation of the increase in the load with the increase of the distortion of the load current. Although the transformers are electrical devices with great efficiency, around 98%, the need to evaluate the behavior of the transformers is due to the increase of the nonlinear loads connected to the electric grid, which inject increasingly distorted load currents in the system, increasing loss of these devices. The large number of transformers in operation connected to non-linear loads generates a considerable waste of energy. The main losses in transformers are the iron losses and copper losses, also called core losses and winding losses. Using the PSIM software, the equivalent circuit model and the parameters of a distribution transformer, these losses are analyzed. The results show increased losses with increased distortion and frequency of voltage and current, as well as predict overload conditions for the simulated transformer model.

Keywords: Transformers, Losses, Harmonic Distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito Equivalente de um Transformador.....	19
Figura 2 - Transdutor de Histerese.....	20
Figura 3 – Função não linear multirramos.....	21
Figura 4 – Representação dos momentos magnéticos em um átomo.....	22
Figura 5 – Representação da parede entre domínios.....	22
Figura 6 – Aspecto descontínuo da curva de histerese.....	23
Figura 7 – Correntes parasitas induzidas.....	25
Figura 8 - Formação de correntes parasitas dentro do condutor.....	29
Figura 9 - Formação de correntes parasitas e variação da densidade de corrente com o diâmetro do condutor.....	29
Figura 10 – Profundidade de penetração na área transversal do condutor.....	30
Figura 11 – Formação do Efeito Proximidade.....	32
Figura 12 – Resumo das perdas em transformadores.....	33
Figura 13 – Formas de onda de uma carga linear e não linear.....	34
Figura 14 – Decomposição da onda quadrada em suas componentes harmônicas.....	35
Figura 15 – Valor de pico e valor eficaz de uma função qualquer.....	36
Figura 16 – Circuito equivalente por fase de um transformador qualquer.....	41
Figura 17 – Modelo de transformador usado na simulação.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise em separado da contribuição de cada componente harmônica no aumento das perdas.....	44
Gráfico 2 - Comparação do aumento das perdas (W) em função da TDH entre ondas com componentes harmônicas individuais.....	45
Gráfico 3 – Aumento das perdas com o aumento da ordem harmônica.....	46
Gráfico 4 - Curva de Porcentagem de Potência nominal em função da TDH.....	47
Gráfico 5 – Porcentagem da Potência Nominal em função da TDH.....	48
Gráfico 6 - Perdas em função da TDH (V).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções do elemento $Z_{nonlinear}$ de acordo com a TDH para uma única componente de 3ª harmônica.....	42
Tabela 2 – Parâmetros do Circuito equivalente usado na simulação.....	43
Tabela 3 - Comparação do aumento das perdas (W) em função da TDH entre ondas com componentes harmônicas individuais.....	45
Tabela 4 - Carregamento equivalente por porcentagem da plena carga a TDHs fixas.....	46
Tabela 5 - Comparação entre os métodos para uma TDH fixa de 200%.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Organização do Trabalho	17
2	PERDAS NOS TRANSFORMADORES	19
2.1	Perdas a vazio em transformadores	19
2.1.1	<i>Perdas por histerese</i>	20
2.1.2	<i>Perdas por correntes parasitas</i>	24
2.1.3	<i>Perdas excedentes</i>	26
2.1.4	<i>Perdas totais a vazio</i>	26
2.2	Perdas com carga	27
2.2.1	<i>Perdas principais nas resistências dos enrolamentos</i>	27
2.2.2	<i>Perdas adicionais no cobre</i>	28
2.2.2.1	<i>Efeito skin</i>	28
2.2.2.2	<i>Perdas por efeito proximidade</i>	29
3	HARMÔNICAS	34
3.1	Harmônicas –efeitos	37
4	METODOLOGIA	39
4.1	Método de carregamento equivalente	40
4.2	Simulação das Perdas	41
5	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	44
5.1	Perdas por distorção na corrente de carga	44
5.2	Carregamento equivalente e consideração do aumento das perdas	46
5.3	Perdas por distorção na tensão de entrada do transformador	49
6	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são elementos responsáveis pela isolação entre sistemas elétricos e pela conversão entre níveis de tensão e corrente elétrica. São amplamente utilizados em todo o sistema elétrico de potência e em diversas aplicações de eletrônica de potência, como conversores cc/ca.

Esses dispositivos apresentam alta eficiência energética, principalmente quando considerados de maneira isolada do restante do sistema elétrico, operando a plena carga com tensão puramente senoidal na entrada e carga linear. Entretanto, quando operando com tensões não senoidais ou cargas não lineares, longe da condição de plena carga, situações verificadas quando estes estão inseridos no sistema elétrico, transformadores podem ter sua eficiência reduzida (BERNARDES et al., 2010).

Os primeiros estudos do comportamento de transformadores em regime não senoidal tinham como foco a análise da temperatura do transformador. Conforme se espera de um sistema conservativo, este aumento de temperatura nos transformadores resulta na diminuição de sua potência nominal.

Estudos feitos por Emmanuel (1985) propõem métodos de estimação de pontos quentes nas partes metálicas de transformadores e de predição de redução da vida útil. Os resultados apontaram que transformadores de menor potência são mais sensíveis aos efeitos das harmônicas que os de maior potência.

O cálculo das principais perdas nos transformadores obedece ao princípio da superposição, no qual supõe-se que essas perdas não estão inter-relacionadas e podem ser somadas separadamente a fim de encontrar um valor de perdas totais nos transformadores com cargas não lineares (HWANG; GRADY; SANDERS, 1987). O aumento das perdas no núcleo do transformador depende da distorção da tensão aplicada (KEFALAS; KLADAS, 2010), enquanto que o aumento das perdas nos enrolamentos tem relação com a distorção da corrente de carga (JAYASINGHE; LUCAS; PERERA, 2003).

Reforçando a tese de que as perdas no núcleo do transformador têm relação com a distorção da tensão de entrada, Fuchs et al. (1987) sugere que as perdas nas harmônicas de tensão de ordem mais baixa têm grande dependência com a espessura de laminação do núcleo. O tipo de carga pode causar o aumento das perdas no núcleo na medida em que insere componentes de corrente contínua, forçando a magnetização do núcleo sempre no mesmo sentido e comprometendo a curva de histerese (LISITA et al., 2004). As componentes de 5ª harmônica provenientes de cargas RC conectadas em estrela nos transformadores promovem

ressonância no circuito que gera perdas excessivas (MASOUM; MOSES; MASOUM, 2008). Porém, para Emmanuel et al. (1993) o que ocasiona o aumento excessivo das perdas é a ressonância entre a capacitância da carga e a indutância do transformador.

Li, Abdallah e Sullivan (2001) propõem uma análise que permite a estimação das perdas resultantes do processo de histerese magnética do núcleo com ondas de fluxo magnético não senoidais, evitando as anomalias da equação modificada de Steinmetz (MSE) e com maior precisão que a equação de Steinmetz original. Geralmente, as perdas no núcleo aumentam 3,5% devido a tensões de excitação não senoidais, enquanto que a corrente de excitação pode aumentar até 37,5% (KEFALAS; KLADAS, 2010). O impacto do aumento da corrente de excitação reflete-se no fato de que essas perdas aumentam de forma quadrática em função da corrente de excitação. Como consequência, ocorrem no núcleo do transformador, além da diminuição da potência que pode ser suprida, o aumento da temperatura, aumento do ruído sonoro e alteração do ponto de operação da curva de histerese (LISITA et al., 2004).

Uma análise do comportamento das perdas nos enrolamentos de transformadores na presença de harmônicos baseada no método dos elementos finitos, levando em consideração os efeitos proximidade e pelicular, foi usada para verificar que as perdas nos enrolamentos aumentam de maneira quadrática para 3ª a 9ª harmônicas e a uma potência de 1,98 para as demais componentes harmônicas (HWANG; GRADY; SANDERS, 1987).

O método proposto por Vandelac e Ziogas (1988) envolve teoria eletromagnética e gráficos FMM (força magneto-motriz) e se mostra mais eficaz que os métodos que utilizam conceitos de frequência efetiva e métodos de decomposição em componentes harmônicas. Este método abrange diferentes geometria de enrolamentos e foi validado utilizando um conversor fly-back. Os resultados deste estudo indicam que o entrelaçamento de condutores minimiza as perdas nos enrolamentos.

As perdas de potência ativa independem do espectro de frequência e as perdas por indução de correntes parasitas em componentes sólidos são proporcionais a potência 0,9 da frequência (YILDIRIM; FUCHS, 2000).

A presença de harmônicas de corrente provoca além do sobreaquecimento dos enrolamentos, aumento do fluxo magnético disperso fora das partes ativas, induzindo correntes parasitas em partes metálicas, ocasionado pontos quentes e perdas; a combinação do fluxo magnético principal, da dispersão aumentada e o fluxo magnético de sequência zero pode causar sobre-excitação; aumento da temperatura ocasiona a variação do conteúdo de umidade e gás no óleo de isolamento variam para transformadores a óleo (EMMANUEL et al., 1993)

Dentre os principais métodos para avaliar o impacto das harmônicas em

transformadores, está a utilização do fator K, um método empírico desenvolvido dentro de ambientes industriais e que tem demonstrado eficácia tanto no cálculo das perdas quanto na especificação de transformadores apropriados, os chamados transformadores K, para operação com harmônicos de tensão ou corrente (IEEE, 1984). A utilização do fator K apresenta um erro de estimação de perdas menor que 5% em comparação com métodos que monitoraram a temperatura do transformador. Os avanços propiciados pela utilização do fator K e dos transformadores K tornam desnecessário o cálculo do desgaste de transformadores e menor ocorrência de manutenção (HENDERSON; ROSE, 1994). Massey (1994) sugere uma expansão intuitiva do fator K, apresentado como mais adequado que o fator de crista e fator de perda harmônica, por considerar a frequência das harmônicas. O fator K, porém é muitas vezes de difícil cálculo, por necessitar de análises que determinem o perfil de carga do transformador.

De fato, o fator K é útil para o dimensionamento de transformadores apropriados para ambientes não senoidais, mas sua utilização não atende a algumas necessidades dos consumidores deste tipo de aplicação, já que o método não é capaz de avaliar o carregamento em transformadores comuns já em operação e sua aplicação limita-se aos transformadores K, que são mais caros que os transformadores comuns. Índices como o índice de Carregamento Equivalente(ELI) e índice de Impacto Harmônico no Carregamento do Transformador(HITL), desenvolvidos a partir de normas bem consolidadas na indústria tem ganhado espaço frente a outros índices que avaliam apenas o desgaste dos transformadores. Suas vantagens consistem na capacidade de avaliar o carregamento verdadeiro de um transformador e na sua simplicidade. Estudos realizados com estes índices revelam que o impacto das harmônicas depende apenas da natureza da carga e não do carregamento (BAGHERI; XU; SHALOUDEGI, 2018).

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é prestar um esclarecimento acerca dos efeitos das harmônicas de corrente e tensão nos transformadores do sistema elétrico.

Os objetivos específicos são:

- a) Compreender os princípios das perdas de potência ativa nos transformadores
- b) Verificar a relação entre aumento destas perdas e aumento da frequência
- c) Verificar a relação entre estas perdas e a distorção harmônica de tensão e corrente

- d) Verificar o impacto das distorções no carregamento do transformador e propor uma intervenção em um método de avaliação do carregamento já existente na literatura científica.

1.2 Justificativa

No Brasil, as perdas em todo o sistema elétrico somam aproximadamente 14% de toda a energia produzida. Enquanto as perdas comerciais ocorrem devido a ligações clandestinas, as perdas técnicas ocorrem devido ao transporte de energia através dos componentes do sistema e são inerentes às propriedades físicas dos materiais. Das perdas técnicas, estima-se que 30% ocorram nos transformadores de distribuição (SANTOS et al. 2006).

Com os avanços da eletrônica, é cada vez mais comum a conexão de dispositivos que produzam correntes não senoidais do lado da carga. Tais equipamentos são chamados elementos de carga não linear. Essa distorção de corrente de carga nos transformadores pode provocar efeitos indesejados nos transformadores além das perdas de potência e possíveis sobrecargas. Analisar como as perdas e o carregamento do transformador variam com o aumento da distorção é importante para verificar a eficiência energética do sistema, bem como manter os transformadores em níveis seguros de carga.

1.3 Organização do Trabalho

O capítulo 2 aborda os principais tipos de perda, como essas perdas se dividem em perdas no núcleo e nos enrolamentos, e aborda sua relação com a frequência a fim de fomentar um embasamento teórico para o estudo das perdas nos transformadores.

No capítulo 3, as ondas harmônicas são estudadas, mostrando que as ondas distorcidas podem ser decompostas em componentes fundamental e suas múltiplas, além de indicar os efeitos que as ondas distorcidas promovem nos transformadores.

No capítulo 4, é explicado o método utilizado para simular as perdas. O software escolhido nesse estudo foi o PSIM e o modelo de circuito equivalente foi simulado utilizando os parâmetros de um transformador de distribuição real.

No capítulo 5, os resultados de simulação são apresentados, mostrando a relação das perdas com a taxa de distorção harmônica (TDH) e com a frequência. Um método de

avaliação do carregamento é avaliado e uma intervenção nesse método é proposta.

O capítulo 6 resume as conclusões desse estudo.

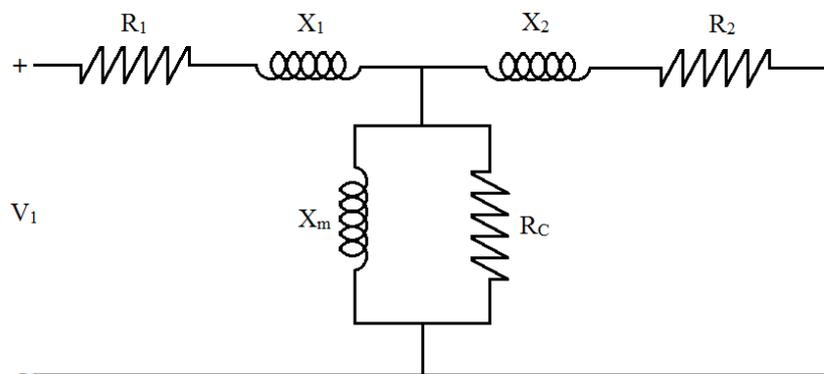
2 PERDAS NOS TRANSFORMADORES

As perdas nestes equipamentos podem ser divididas em dois grandes grupos: perdas no núcleo e nos enrolamentos. Como se verificará na seção 2 do presente trabalho, as perdas à vazio ocorrem basicamente no núcleo do transformador e podem ser divididas em perdas por histerese, perdas por correntes parasitas e perdas excedentes. Na seção 3, serão estudadas as perdas no núcleo, divididas em perdas principais na resistência do condutor e perdas adicionais. Será verificado que ambas as perdas, no núcleo e nos enrolamentos, apresentam relação proporcional com a frequência. A partir destas relações, algumas considerações são feitas com relação a transformadores operando com cargas não lineares.

2.1 Perdas no núcleo em transformadores

As perdas no núcleo são melhor observadas nos transformadores quando estes não alimentam uma carga em seu secundário. Assim, toda energia fornecida ao transformador é utilizada apenas para magnetizar o núcleo e suprir as perdas no enrolamento primário. A corrente fornecida pela rede é então muito pequena, cerca de 5% da corrente nominal do transformador. Isso se deve a resistência de perdas no núcleo R_C e reatância de magnetização X_m , conforme o circuito equivalente monofásico apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Circuito Equivalente de um Transformador



Fonte: Autor

Geralmente o valor da resistência de perdas no núcleo R_C e da reatância de

magnetização X_m é muito maior que os da resistência no enrolamento primário R_1 e perdas por dispersão no primário X_1 . A corrente que flui pelo circuito elétrico é então muito pequena, dados os altos valores de R_c e X_m e considerando que nenhuma carga é alimentada no secundário. Com um valor baixo de corrente, as perdas no enrolamento primário são mínimas, podendo até mesmo ser desprezadas neste caso. Isto implica que as perdas à vazio devem-se principalmente ao processo de excitação do transformador elétrico.

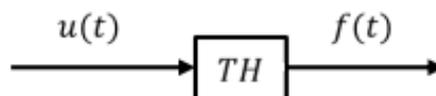
As duas perdas mais relevantes referentes ao processo de excitação são as perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas no núcleo. Ambas serão estudadas nas seções 2.1 e 2.2, respectivamente. Entretanto, somente essas duas perdas não resumem as perdas verificadas nos transformadores operando à vazio. Nos processos de magnetização práticos, é constatada mais um tipo de perda, chamadas anômalas ou excedentes, a serem estudadas na seção 2.3.

2.1.1 Perdas por histerese

A palavra histerese tem raiz no grego e quer dizer “atraso”. Desta forma, o termo refere-se a fenômenos nos quais os efeitos são atrasados em relação às causas que os geraram. Ao se falar em histerese nos estudos de engenharia, a ideia comumente associada é o processo de formação de laços, o que não sintetiza a essência do fenômeno.

De acordo com MAYERGOYZ, Isaak D (2003), a histerese pode ser entendida através de uma analogia com um transdutor, conforme mostra a Figura 2. O elemento TH fornece uma grandeza de saída $f(t)$ com relação a uma grandeza de entrada $u(t)$. Se a relação entre a entrada $u(t)$ e a saída $f(t)$ é uma relação não linear, então elemento TH é definido com um transdutor de histerese escalar.

Figura 2 - Transdutor de Histerese



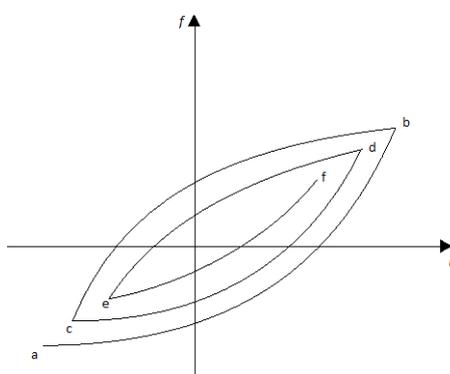
Fonte: Autor

No caso do transdutor de histerese escalar, a relação $f - u$ apresenta várias

ramificações e a transição entre essas ramificações ocorre depois que a entrada $u(t)$ atinge um valor arbitrário a partir do qual o valor da entrada começa a regredir, conforme mostra a Figura 3. Assim, por exemplo, a transição do ramo a-b para o ramo b-c ocorre depois que a entrada $u(t)$ aumenta até chegar a seu valor correspondente ao ponto b e a partir desse ponto começa a diminuir. Da mesma forma, a transição do ramo b-c para o ramo c-d ocorre depois que a entrada $u(t)$ diminui até chegar ao seu valor correspondente ao ponto c e a partir desse ponto começa a aumentar novamente.

Além disso, quando os ramos são determinados apenas pelos valores extremos passados da entrada, a não linearidade multirramos é chamada independente da taxa. Isto é, considerando o ramo a-b, independentemente da taxa de variação da entrada $u(t)$, a relação entre $f-u$ é dada pelo ramo a-b até atingir o extremo b. Caso a entrada comece a diminuir seu valor antes de atingir o extremo b, num ponto b' arbitrário, por exemplo, será formado um novo ramo tendo como valor extremo inicial o ponto b' (PINHEIRO, 2016).

Figura 3 – Função não linear multirramos



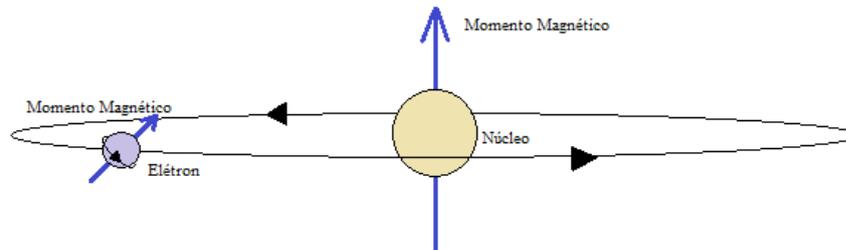
Fonte: Autor

A histerese magnética é a relação entre a intensidade de campo magnético \mathbf{H} e a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} . Tal relação se enquadra no que aqui foi definido como não linearidade multirramos independente da taxa, uma vez que, esta é definida apenas pelos pontos extremos de um ramo, ou laço, como mais comumente é chamado.

Para entender as perdas por histerese, é necessário entender o processo de magnetização do material magnético. O processo de magnetização ocorre devido à existência de um certo grau de magnetização inerente ao átomo, devido à presença de um momento magnético resultante. Este momento magnético resultante surge da movimentação dos elétrons no interior do átomo, que por serem partículas carregadas eletricamente, induzem momento

magnético ao movimentar-se. O elétron realiza dois movimentos: um ao redor do núcleo atômico e outro em torno de si mesmo. Ambos movimentos geram momentos magnéticos que implicam em um momento magnético resultante no átomo do material. A Figura 4 ilustra a formação dos momentos magnéticos.

Figura 4 – Representação dos momentos magnéticos em um átomo

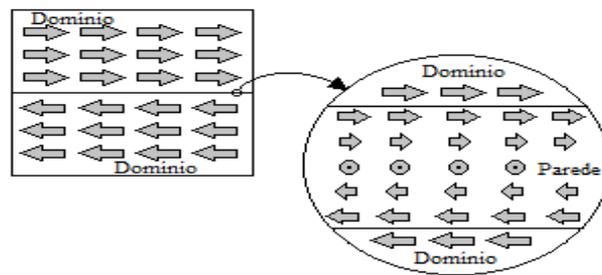


Fonte: Autor

Os materiais mais indicados para aplicações magnéticas são os ferromagnéticos, caracterizados por possuírem regiões em que todos os momentos magnéticos estão orientados em uma mesma direção. Estas regiões são chamadas domínio magnético. Geralmente estes domínios estão ordenados de tal forma que o momento magnético é nulo.

Entre dois domínios de diferentes orientações, existe uma região em que os momentos magnéticos dos átomos mudam gradualmente sua direção, do sentido do domínio de origem para o sentido do domínio vizinho. A Figura 5 mostra um exemplo de parede entre dois domínios de momento magnético antiparalelo. Conforme mostra a figura, os momentos magnéticos da região de parede mais próximos do domínio orientado para a direita tendem a se orientar nessa mesma direção. Os momentos magnéticos mais distantes deste domínio apresentam orientação cada vez mais orientada na direção do domínio vizinho.

Figura 5 – Representação da parede entre domínios



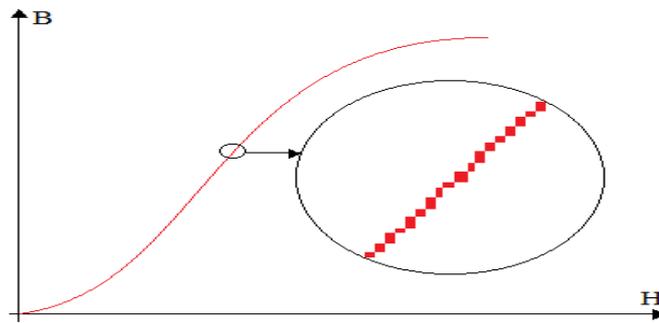
Fonte: Autor

Ao aplicar um campo magnético externo ao material ferromagnético, os domínios do material tendem a se alinhar no mesmo sentido que o campo aplicado. Os domínios que apresentam o mesmo sentido que o campo aplicado tendem a se expandir com a reorientação dos momentos da região de parede na direção do campo aplicado, enquanto que os domínios com direção distinta à do campo externo tendem a diminuir pelo mesmo motivo. Ao final do processo de magnetização, com o material em saturação, todos os domínios estão orientados na mesma direção do campo externo (MORGAN, 2013).

A curva de histerese surge da interação entre o campo externo aplicado e a reorientação no sentido dos domínios magnéticos. Entretanto, no decorrer do processo de magnetização a curva de histerese apresenta uma forma descontínua. A forma descontínua da curva se deve aos chamados saltos de Barkhausen (CHÁVEZ, 2009). Estes saltos ocorrem quando os átomos de uma região de parede estão alinhando seu momento magnético com o campo aplicado e encontram em seu trajeto uma tensão mecânica ou um defeito na estrutura cristalina do material. Tais condições na estrutura do material são chamadas pontos de ancoragem.

Ao encontrar um ponto de ancoragem, o processo de reorientação dos momentos magnéticos estaciona até atingir um valor energético para ultrapassagem do ponto. A energia gasta pela parede de domínio para ultrapassar um ponto de ancoragem é um dos fatores que acrescentam perdas no processo de histerese magnética. As perdas por histerese tem aspecto metalúrgico e são função do volume, tamanho, distribuição das impurezas, orientação dos cristais, níveis de estresse do material e de outras características micro-estruturais do material (MEURER, 2005). A Figura 6 indica o aspecto descontínuo da curva de histerese.

Figura 6 – Aspecto descontínuo da curva de histerese



Fonte: Autor

O processo de magnetização tem caráter irreversível no sentido de que, uma vez magnetizado o material e com a retirada do campo magnético externo aplicado, os domínios do material tendem a se organizar não mais de maneira arbitrária. O que se verifica é os domínios magnéticos se orientam espontaneamente de forma que exista uma densidade de fluxo remanescente na direção do campo outrora aplicado. Para retornar à condição de indução nula, seria necessário que o material atingisse a temperatura de Curie, na qual a excitação térmica é suficiente para eliminar a organização espontânea dos domínios (MORGAN, 2013) ou aplicar um campo coercitivo.

A equação que modela as perdas por histerese é chamado equação de Steinmetz e garante resultados muito próximos para este tipo de perda energética:

$$P_h = f \cdot k_h \cdot B^\alpha \quad (1)$$

onde P_h são as perdas por histerese, f é a frequência e k_h e α são constantes definidas empiricamente de acordo com o material magnético utilizado na fabricação do núcleo do transformador. Estas perdas também podem ser expressas pela área da curva de histerese, ou seja, quanto maior a área da curva, maiores as perdas no processo.

2.1.2 Perdas por correntes parasitas

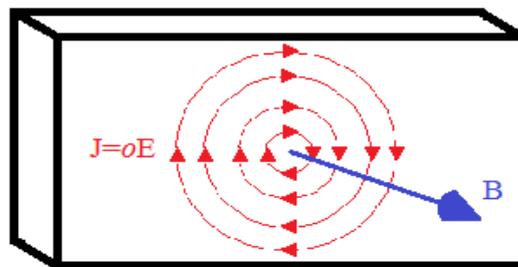
Outro tipo de perda à vazio é a indução de correntes parasitas no núcleo do material magnético. O processo de indução ocorre devido ao fluxo magnético que atravessa a seção

transversal do material do núcleo. A lei de Faraday é dada por:

$$\text{rot } E' = -\frac{dB'}{dt} \quad (2)$$

De acordo com a equação 2, um fluxo magnético variável no tempo B' gera um campo elétrico E' em um caminho fechado. O sentido do campo elétrico é o contrário daquele indicado pela regra da mão direita, o que na equação é mostrado pelo sinal negativo. A Figura 7 demonstra o surgimento de correntes induzidas em um material de condutividade elétrica “ σ ” percorrido por uma densidade de fluxo B :

Figura 7 – Correntes parasitas induzidas



Fonte: Autor

A potência em um dado volume de material pode é expressa por (3)

$$P_f = \iiint_v \sigma [E(t)]^2 dv \quad (3)$$

onde σ é a condutividade elétrica do material, $E(t)$ é o campo elétrico induzido e v é a variável de volume do material. Resolvendo o determinante do lado esquerdo da equação (2) chega-se a (4), considerando que não existe descontinuidade do campo elétrico nem da densidade de corrente.

$$E(x, t) = -\frac{dB(t)}{dt} \cdot x \quad (4)$$

Adotando as dimensões de uma lâmina de material magnético do núcleo l_z , l_y , e sendo $l_x=d$, onde d é a espessura da lâmina, a equação (3) pode ser desenvolvida como sendo (5) e possui como resultado (6).

$$P_f = \sigma \int_0^{l_z} \int_0^{l_y} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \cdot x^2 \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (5)$$

$$P_f = \sigma \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \cdot l_y \cdot l_z \cdot \frac{d^3}{12} \quad (6)$$

a equação (6) pode ser dividida pelo volume do material a fim de encontrar a perda instantânea do material em função do volume. Para cálculo da perda média, calcula-se a média da equação (6) em um período T, considerando a densidade de fluxo magnético $B(t)$ senoidal pura como em (7). O resultado do desenvolvimento matemático é expresso em (8):

$$B(t) = \mathbf{B} \cdot \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$P_f = \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot d)^2}{6 \cdot m_v} \mathbf{B}^2 \cdot f^2 \quad (8)$$

onde “ m_v ” é a massa por unidade de volume do material e “ \mathbf{B} ” é o valor de pico da densidade de fluxo. A equação (8) já considera a laminação do núcleo magnético, medida adotada para diminuir os efeitos das correntes parasitas. A equação, conforme dito anteriormente, considera valor de densidade de fluxo puramente senoidal. Para consideração de $B(t)$ não senoidal, é possível acrescentar fatores de correção para que a equação (8) contemple também este caso (AMAR, 1994).

2.1.3 Perdas excedentes

Considerando os dois tipos de perdas à vazio mais relevantes que ocorrem em um material magnético, ainda não se chega a uma boa aproximação das perdas observadas empiricamente. De maneira a complementar as perdas a vazio, estudos apontam para um terceiro tipo de perda a vazio, chamado perdas excedentes ou perdas anômalas. Segundo PINHEIRO (2016), ABDALLAH e SULLIVAN (2001) e BASTOS (2007), essas perdas ocorrem devido a indução de correntes parasitas devido à rotação dos momentos magnéticos durante o processo de movimentação das paredes de domínio descrito na seção 2.1. Tais perdas dependem de propriedades do material como tamanho de grão, condutividade elétrica, campo coercitivo e outros. A equação que modela as perdas excedentes é (9).

$$P_e = k_e \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (9)$$

onde “ k_e ” é uma constante determinada de acordo com o material do núcleo (BASTOS, 2007).

2.1.4 Perdas totais no núcleo

Supondo que as perdas acima listadas são lineares e não entre si, de maneira que possa ser aplicado o princípio da superposição, é possível aplicar o princípio da superposição para quantificar as perdas totais no processo de magnetização do núcleo magnético de transformadores em um modelo simplificado, como em (11).

$$P_t = P_h + P_f + P_e \quad (10)$$

$$P_t = f \cdot k_h \cdot B^\alpha + \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot d)^2}{6 \cdot m_v} B^2 \cdot f^2 + k_e \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (11)$$

A correta quantificação de cada uma dessas componentes de perdas a vazio depende de ensaios de separação de perdas, realizados a diferentes frequências. Os métodos de separação de perdas são objetos de pesquisa e não existe ainda um método totalmente eficaz. Entretanto, a literatura acadêmica propõe alguns métodos com esse intuito, como em (BATISTELA, 2001). Nos estudos de engenharia tais métodos são importantes, uma vez que os fenômenos magnéticos microscópicos associados ao processo de magnetização ocorrem com distribuição aleatória, de modo que a estimação destas perdas resulta de análises estatísticas dos efeitos destes fenômenos e os métodos de separação de perdas dispensam esse tipo de análise.

2.2 Perdas nos Enrolamentos

As perdas nos enrolamentos, também chamadas perdas no cobre, são aquelas referentes à resistência dos enrolamentos primário e secundário do transformador. Para efeitos de simplificação do estudo de transformadores, geralmente tais perdas são consideradas proporcionais à resistência do enrolamento e variam com o quadrado da corrente de carga. Como se verá na seção 2.3.2, esta consideração somadas às perdas no núcleo não resume a totalidade das perdas presentes no funcionamento com carga do transformador e dependendo

do perfil de carga, se é ou não uma carga puramente senoidal, algumas considerações necessitam ser feitas (SANTOS, 2006).

2.2.1 Perdas principais nas resistências dos enrolamentos

As perdas resistivas nos enrolamentos do transformador são modeladas pelas resistências R_1 e R_2 conforme circuito equivalente mostrado anteriormente na Figura 1. Tais perdas são inerentes aos enrolamentos do transformador e são dadas pela clássica fórmula de potência (12):

$$P_{cu} = Ri^2 \quad (12)$$

onde “ i ” é o valor eficaz da corrente que percorre o condutor e “ R ” é a resistência elétrica do material condutor. Em algumas aplicações é vantajoso obter uma relação da potência dissipada por unidade de massa, deduzida a partir de (13) cujo resultado é (14):

$$P = Ri^2 = i^2 \frac{\rho L}{A} = (J \cdot A)^2 \frac{\rho L}{A} = J^2 \rho AL = J^2 \rho V \quad (13)$$

$$\frac{P}{m} = \frac{J^2 \rho V}{m} = \frac{J^2 \rho}{\gamma} [W/kg] \quad (14)$$

onde ρ é a resistividade elétrica do material, J é a densidade de corrente, V é o volume, m é a massa, L é o comprimento do material, A é a área da seção transversal e γ é a massa específica do material. Como se vê pelas equações (12) e (14), as perdas principais nos enrolamentos do transformador independem da frequência e são proporcionais à temperatura.

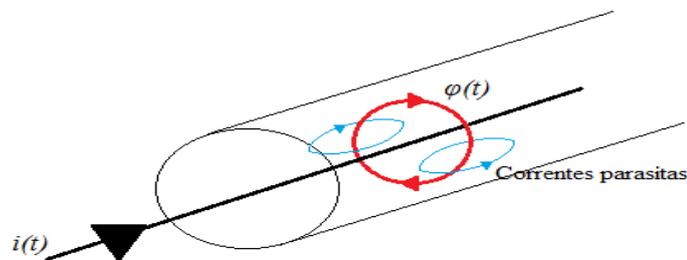
2.2.2 Perdas adicionais no cobre

As perdas adicionais no cobre geralmente são computadas em altas frequências, sendo que para baixas frequências são desprezíveis. Os principais efeitos observados juntamente com essas perdas são a densidade de corrente não uniforme, a circulação de correntes parasitas nos enrolamentos e a modificação da resistência dos enrolamentos. Esses efeitos são gerados pelo efeito skin e efeito proximidade, discutidos nas seções 3.2.1. e 3.2.2.

2.2.2.1 Efeito skin

O efeito *skin* tem este nome devido ao fato de os elétrons que circulam em um meio condutor se agruparem cada vez mais próximos da superfície do condutor com o aumento da frequência. Isso deve à formação de campos magnéticos paralelos à seção transversal do condutor devido a circulação de correntes alternadas. Estes campos por sua vez induzem correntes dentro do próprio condutor, conforme mostra a Figura 8:

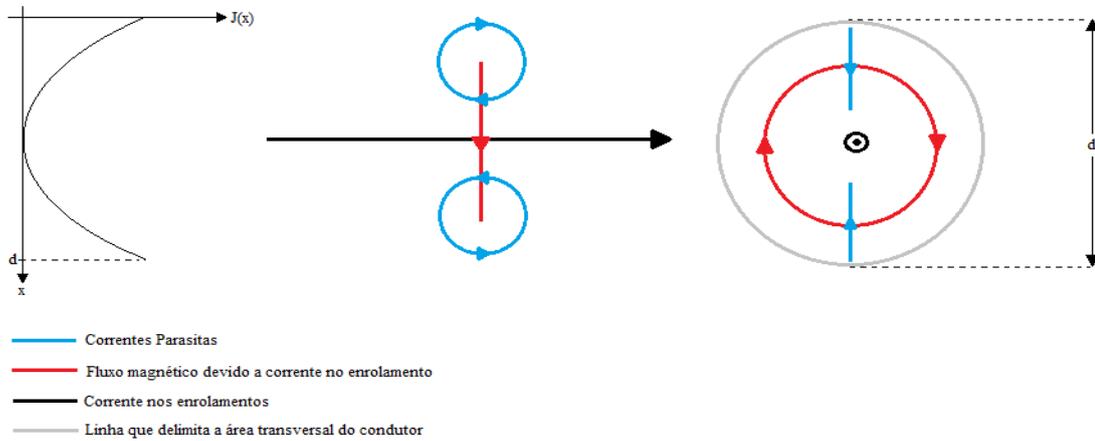
Figura 8 - Formação de correntes parasitas dentro do condutor.



Fonte: Autor

A formação de correntes parasitas no interior do condutor leva a uma modificação da densidade de corrente que atravessa os enrolamentos. Isso acontece porque próximo ao centro do condutor, as correntes parasitas se opõem ao sentido da corrente de carga que produziu o fluxo magnético. Da mesma forma, próximo à superfície do condutor, as correntes parasitas fluem no mesmo sentido que a corrente de carga. Isto é melhor exemplificado na Figura 9, que mostra uma vista superior do processo descrito.

Figura 9 - Formação de correntes parasitas e variação da densidade de corrente com o diâmetro do condutor.



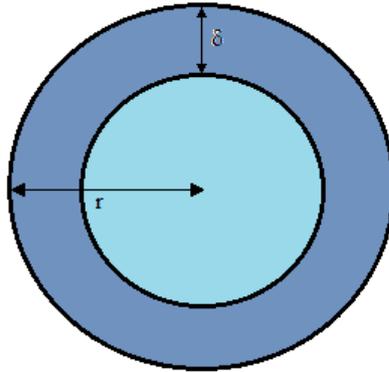
Fonte: Autor

De acordo com a Figura 9, a densidade de corrente é menor no centro da área transversal do condutor. O efeito *skin* tem como resultado uma diminuição da área da seção transversal útil do condutor para a condução dos elétrons. A diminuição dessa área útil resulta por sua vez em um aumento da resistência dos enrolamentos, gerando assim maiores perdas. A resistência é dada por (15):

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{L}{\sigma \cdot A} \quad (15)$$

onde σ é a condutividade do material. Para relacionar a definição de resistência de (15) com a frequência da corrente, deve-se encontrar uma expressão para a área em função da profundidade de penetração δ . A profundidade de penetração em comparação com a área do condutor é mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Profundidade de penetração na área transversal do condutor



Fonte: Autor

a área em função da profundidade de penetração é dada por (16):

$$A = \pi \cdot (2 \cdot \delta \cdot r - \delta^2) \quad (16)$$

lembrando que a profundidade de penetração é dada por (17):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \mu \cdot \omega}} \quad (17)$$

Ou seja, a profundidade na qual a corrente circula no condutor é inversamente proporcional a raiz da condutividade elétrica (σ), da permeabilidade magnética (μ) e da frequência (ω). Assim, quanto menor a frequência, maior a área transversal do condutor aproveitada. Quanto maior a frequência, mais próximo da superfície a corrente tende a se concentrar. Substituindo (17) em (16) obtém-se (18):

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{r \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \omega} - 1}{\sigma \cdot \mu \cdot \omega} \right] \quad (18)$$

aplicando (18) em (15), a resistência elétrica é definida em função da frequência, como mostra (19):

$$R = \frac{L \cdot \mu \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot (r \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \omega} - 1)} \quad (19)$$

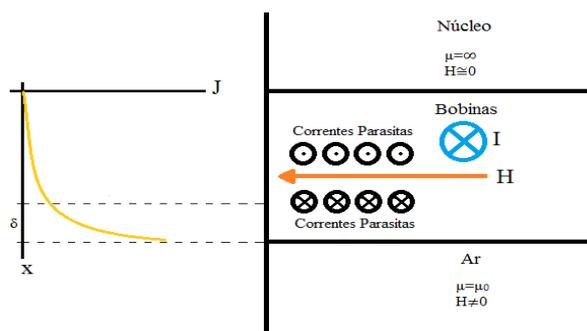
Observa-se na equação (19) que a resistência do material varia aproximadamente com a raiz da frequência, quando esta apresenta valores muito altos. Quanto maior a frequência, maior a resistência do condutor, devido a diminuição da área útil para condução de corrente. Conforme demonstra (19), o efeito *skin* tem influência na resistência do condutor, que por sua vez está associada às perdas nos enrolamentos através da equação (12).

2.2.2.2 Perdas por efeito proximidade

As perdas por efeito proximidade também alteram a densidade de corrente que atravessa um condutor. O efeito proximidade ocorre devido ao fato de que no interior do material magnético a intensidade de campo \mathbf{H} é aproximadamente zero, devido à grande permeabilidade magnética deste tipo de material. Por outro lado, na região fora do núcleo de transformadores, geralmente preenchida com óleo ou ar, o campo \mathbf{H} apresenta valor diferente de zero já que a permeabilidade do ar é alta. Isto é mostrado na Figura 11, onde a região do núcleo do transformador possui intensidade de campo aproximadamente zero e a região de entreferro ou janela do transformador possui intensidade de campo diferente de zero.

Ao atravessar o material condutor dos enrolamentos, este campo induz correntes parasitas que atuam no sentido de formar um campo que se opõe ao campo magnético que as induziu. Estas correntes parasitas, conforme verificado no efeito *skin*, ora atuam no mesmo sentido que a corrente principal do enrolamento, ora atuam no sentido contrário. A Figura 11 ilustra corte transversal das bobinas, do núcleo de material magnético e do entreferro, assim como a formação de correntes parasitas e a respectiva densidade de corrente em função da distância do núcleo:

Figura 11 – Formação do Efeito Proximidade



As correntes parasitas que aparecem nos enrolamentos agem no sentido de induzir um campo magnético que se oponha ao campo que atravessa a bobina. O sentido dessas correntes é o mostrado na Figura 11. Assim verifica-se que as correntes parasitas à esquerda da linha de campo fluem no sentido contrário da corrente principal e as correntes parasitas formadas à direita da linha de campo fluem no mesmo sentido que a corrente principal dos enrolamentos. Quanto mais próximo do núcleo, menor é o campo \mathbf{H} que atravessa os condutores. Assim, existe a tendência de a corrente de carga se agrupar em regiões das espiras mais distantes do núcleo de material magnético.

A relação entre a frequência e as perdas por efeito proximidade no caso em que o comprimento da seção transversal formada pelo conjunto de espiras “h” é muito maior que a profundidade de penetração δ é verificada pela relação da resistência em corrente alternada e a resistência em corrente contínua, conforme definido em (20):

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \frac{h}{\delta} \quad (20)$$

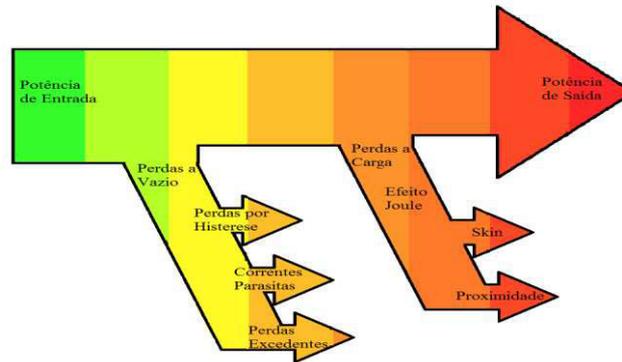
onde δ é dado pela equação (17) e tem relação com o inverso da raiz quadrada da frequência. Assim, a resistência dos enrolamentos aumenta com a raiz quadrada da frequência, aumentando as perdas nos enrolamentos dadas por (12).

2.3 Perdas totais (Núcleo e Enrolamentos)

Embora as perdas em transformadores sejam pequenas em comparação com outras máquinas elétricas, o fato dos mesmos serem utilizados em larga escala nos sistemas de transmissão e distribuição, como também em aplicações de eletrônica de potência, torna o estudo destas perdas relevante no que se refere ao uso mais eficiente de energia elétrica.

Além disso, como se verificou ao longo do texto, tais perdas apresentam uma relação intrínseca com a frequência, apresentando variações com o quadrado da frequência. A Figura 12 resume cada uma dessas perdas, de acordo com o tipo.

Figura 12 – Resumo das perdas em transformadores



Fonte: Autor

As perdas no núcleo são estudadas de maneira independente das perdas nos enrolamentos, uma vez que a corrente nessa situação é considerada muito pequena, apenas o suficiente para excitar o núcleo, o que minimiza estas perdas, devido ao efeito Joule na resistência do material condutor. Já as perdas nos enrolamentos são basicamente perdas por efeito Joule, uma vez que efeito *skin* e efeito proximidade apenas aumentam a resistência elétrica do material condutor, não caracterizando um tipo diferente de perda.

Tanto as perdas no núcleo quanto as perdas nos enrolamentos variam em função da frequência. Sabendo disso e considerando o crescente uso de transformadores operando com cargas não lineares, é necessário estudar o comportamento dos transformadores na presença de harmônicas, considerando que tal tipo de carga pode ser vista como a soma de várias senóides de frequências de ordem distinta da fundamental.

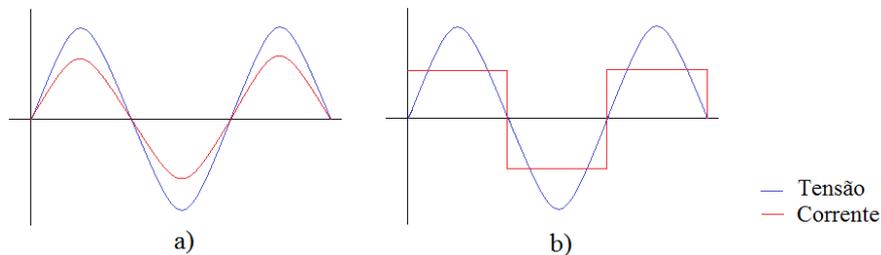
3 HARMÔNICAS

Com os avanços em eletrônica de potência, torna-se cada vez mais comum a operação do sistema elétrico de em ambientes de cargas não lineares. A presença de cargas não lineares indica que a relação entre a corrente que circula no circuito e a tensão imposta tem relação não proporcional. A relação proporcional entre tensão e corrente é definida pela lei de Ohm:

$$V = Ri \quad (21)$$

Conversores e inversores de frequência, retificadores, transformadores operando em regime de saturação, *No-Breaks* e fontes chaveadas são exemplos de cargas não lineares. No caso deste tipo de carga, a corrente que circula no circuito apresenta forma de onda diferente da tensão imposta. A Figura 13 exemplifica os dois tipos de carga no sistema.

Figura 13 – Formas de onda de uma carga linear (a) e não linear (b).



Fonte: Autor

A Figura 13 - b, ilustra a forma de onda de corrente diferente de uma senóide, caracterizando uma carga não-linear. Conforme definido por Fourier, qualquer forma de onda pode ser decomposta em somas de ondas senoidais de diferentes frequências. Para isso utiliza-se a transformada de Fourier, que possibilita tratar sinais periódicos ou não.

Um caso particular da transformada de Fourier é a série de Fourier, caso em que equações e propriedades matemáticas são introduzidas de maneira a converter a transformada na série de Fourier, utilizada no caso de sinais periódicos. Desta forma, qualquer função periódica pode ser representada conforme (22):

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) \quad (22)$$

onde T é o período da forma de onda analisada, n representa os múltiplos correspondentes à frequência fundamental.

Os coeficientes a_0 , a_n e b_n são determinados por meio de (23) – (25):

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) dx \quad (23)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos(n\omega_0 x) dx \quad (24)$$

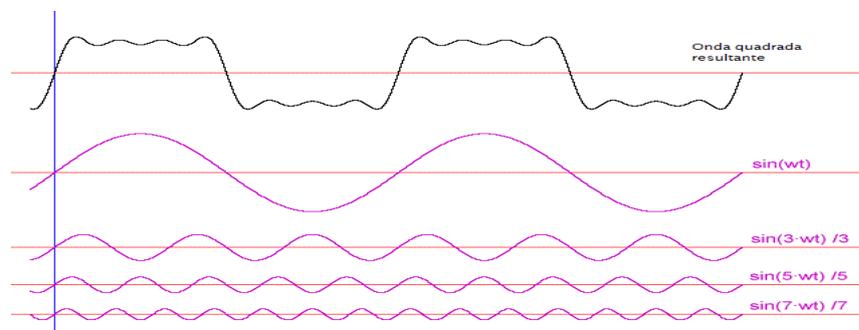
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin(n\omega_0 x) dx \quad (25)$$

em que $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ é dita a frequência fundamental da onda.

Assim, observa-se que uma forma de onda não senoidal atuando nos enrolamentos de um transformador pode ser vista como formas de ondas senoidais de diferentes frequências e amplitudes. Cada termo do somatório, a partir do segundo, é chamado de harmônico, isto é, o segundo termo é chamado de segundo harmônico, o terceiro termo de terceiro harmônico e etc.

Quanto mais distinta uma forma de onda é de uma senoidal pura, mais componentes em frequências harmônicas ela possui somadas à componente fundamental. É o caso da onda quadrada da corrente da Figura 13-b, a qual pode ser decomposta graficamente como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Decomposição da onda quadrada em suas componentes harmônicas



Fonte: [https://www.embarcados.com.br/processamento-digital-de-sinais-dsp-parte-](https://www.embarcados.com.br/processamento-digital-de-sinais-dsp-parte-2/)

A primeira forma de onda da Figura 14 representa a aproximação para onda quadrada composta da primeira à sétima componente harmônica. As formas de ondas seguintes representam, respectivamente, a componente fundamental, de mesma frequência que a forma de onda quadrada, e suas harmônicas, com frequências múltiplas da fundamental.

O valor eficaz é uma medida útil nos cálculos de potência. Sua definição corresponde ao valor de corrente ou tensão contínua capaz de fornecer a mesma potência elétrica que uma forma de onda alternada. O valor eficaz é dado pelo valor RMS como em (26):

$$f_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 dt} \quad (26)$$

onde f_{eficaz} é o valor eficaz de uma função $f(t)$ qualquer.

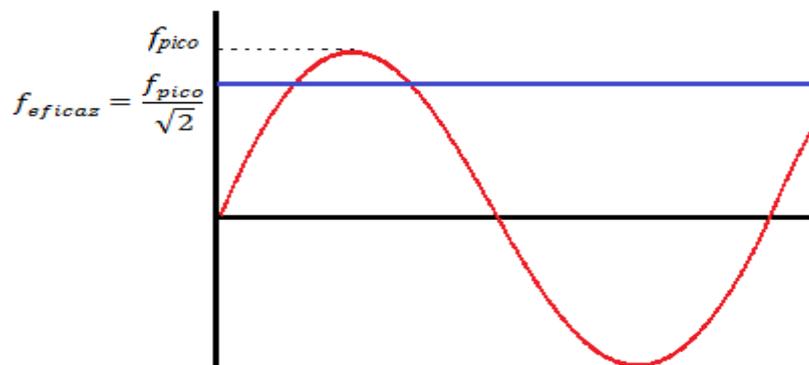
O uso do valor eficaz no cálculo das perdas traz algumas simplificações. Conforme verificado na seção 2, o valor da resistência é variável com a frequência da corrente. Ao utilizar o valor eficaz da corrente, o valor da resistência torna-se constante e igual ao valor da resistência para uma corrente contínua. Para uma forma de onda senoidal pura, o valor eficaz torna-se igual a (27):

$$f_{eficaz} = \frac{f_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

onde f_{pico} é o valor de pico de uma onda senoidal qualquer.

A Figura 15 mostra uma representação gráfica do valor eficaz de uma função f senoidal qualquer.

Figura 15 – Valor de pico e valor eficaz de uma função qualquer



Fonte: Autor

Ao serem acrescentadas componentes harmônicas à componente fundamental, o valor eficaz não mais é dado pela equação (27), devendo ser calculada pela equação (28).

$$f_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} f_{n(rms)}^2} \quad (28)$$

onde $f_{n(rms)}^2$ é o valor eficaz da n ésima componente a partir da fundamental.

Nota-se, a partir de (28) que o acréscimo de componentes harmônicas aumenta o valor eficaz. Além disso, formas de ondas distorcidas apresentam fator de potência menor se comparado ao fator de potência da fundamental. O fator de potência total de uma onda distorcida é dado por (29).

$$FP = \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{1 + TDH^2}} \quad (29)$$

onde TDH é a taxa de distorção harmônica da onda distorcida e θ_1 é o ângulo entre as componentes fundamentais de tensão e corrente.

A TDH é uma medida de quão distorcida uma forma de onda é em comparação com sua componente fundamental. A TDH é calculada por (30).

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} f_{n(rms)}^2}}{f_{1(rms)}} \quad (30)$$

Alternativamente, o valor eficaz total pode ser calculado em função da taxa de distorção harmônica por (31).

$$f_{rms} = f_{1(rms)} \cdot \sqrt{1 + TDH^2} \quad (31)$$

3.1 Harmônicas – efeitos

Conforme apresentado no capítulo 1, as perdas em transformadores podem ser

resumidas em perdas no cobre (enrolamentos) do transformador e perdas no ferro (núcleo do transformador). A inclusão de componentes harmônicas à fundamental da corrente de carga é um fator que propicia um aumento nessas perdas, pois gera um aumento considerável no valor eficaz da corrente de carga do transformador.

Sabe-se que as perdas na resistência dos enrolamentos são proporcionais ao quadrado do valor eficaz da corrente de carga, resultando numa participação maior das perdas nos enrolamentos na presença de correntes distorcidas. Além disso, com o aumento do valor eficaz da corrente de carga, pode ocorrer uma sobrecarga no transformador, ultrapassando as especificações nominais de operação.

As perdas no núcleo do transformador por sua vez possuem maior relação com as distorções de tensão na entrada do transformador. Distorções de tensão com níveis CC comprometem o ciclo de histerese ao forçar a magnetização do núcleo sempre no mesmo sentido que o fluxo associado ao nível de tensão CC, aumentando as perdas no processo.

De acordo com o PRODIST, módulo 8, as tensões na entrada dos transformadores permaneçam com níveis controlados, por volta de 5%. Logo, é possível afirmar que as perdas provocadas por distorções de tensão sejam baixas ao se manter nessa faixa de distorção.

As perdas excedentes, são proporcionais à frequência. A estas, somam-se as perdas por corrente parasita induzidas em partes metálicas do transformador e outras perdas por dispersão. As perdas por correntes induzidas nos enrolamentos do transformador são proporcionais ao quadrado da componente harmônica de corrente e ao quadrado da ordem harmônica. Já as perdas por dispersão em partes metálicas também são proporcionais ao quadrado da componente harmônica de corrente, porém variam proporcionalmente com a frequência com uma taxa de no máximo 0,8.

A presença de harmônicos na operação dos transformadores também aumenta o efeito de fluxo magnético disperso devido às reatâncias de dispersão, já que a reatância é um parâmetro que tem forte dependência com a frequência.

Além do aumento nas perdas ativas e no fluxo magnético de dispersão, as harmônicas podem ocasionar ainda o sobreaquecimento dos transformadores, diminuição da isolamento entre seus enrolamentos e lâminas, ressonância entre as reatâncias, vibrações no núcleo, geração de pontos quentes, diminuição do fator de potência, sobre-excitações, além de variações na umidade e gás no óleo de isolamento para transformadores a óleo.

4 METODOLOGIA

A norma PC57.110TM/D6.2 da IEEE recomenda práticas para o estabelecimento da capacidade de potência para transformadores de distribuição do tipo seco e imerso em óleo ao fornecer corrente de carga não senoidal. Para efeito de cálculo das perdas na presença de harmônicas a norma estabelece (32):

$$P_{TL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \quad (32)$$

em que P_{TL} são as perdas totais com carga, P as perdas ôhmicas na resistência dos enrolamentos, P_{EC} as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos e P_{OSL} as perdas por correntes parasitas induzidas nas partes metálicas do transformador.

A parcela de potência devido as perdas ôhmicas nos enrolamentos são dadas por (33).

$$P = RI^2 \quad (33)$$

em que R é a resistência do enrolamento do transformador e I é a corrente de carga.

A parcela de perdas por correntes parasitas nos enrolamentos é calculada de acordo com (34):

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

sendo P_{EC-R} o valor das perdas por correntes parasitas na condição nominal, I_h a componente harmônica de corrente, a partir da fundamental, I_R o valor da corrente nominal e h a ordem harmônica.

Já as perdas por correntes parasitas induzidas nas partes metálicas do transformador são dadas por (35):

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \cdot h^{0,8} \quad (35)$$

onde P_{OSL-R} é o valor das perdas por correntes induzidas nas partes metálicas para condição nominal.

4.1 Método de carregamento equivalente

Utilizando as definições da norma PC57.110TM/D6.2, Bagheri, Xu e Shaloudegi (2018) sugerem uma análise utilizando o conceito de índice de carregamento equivalente. Considerando um transformador operando com X amperes na frequência fundamental e Y amperes de correntes harmônicas produzindo uma quantidade de perdas P_{loss} , é possível substituir esse carregamento por uma corrente de $X+\Delta X$ composta somente da componente fundamental e que produza a mesma quantidade de perdas P_{loss} . Define-se, desta forma, uma corrente equivalente na componente fundamental (I_{eq}) que produz a mesma quantidade de perdas que uma corrente distorcida.

Sabendo que no caso da carga apresentar corrente puramente senoidal as perdas são proporcionais ao valor eficaz da corrente, a razão entre as perdas na situação com corrente distorcida e as perdas na situação puramente senoidal a plena carga é dada por (36):

$$\frac{P_{TL}}{P_{TL-R}} = \frac{I_{eq}^2}{I_R^2} \quad (36)$$

onde P_{TL-R} são as perdas nas condições nominais para a corrente nominal I_R puramente senoidal e são calculadas por (37).

$$P_{TL-R} = RI_R^2 + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (37)$$

onde, para a corrente nominal sem distorção, P_{EC-R} e P_{OSL-R} são constantes que indicam as perdas por corrente parasita nos enrolamentos e as perdas por corrente induzida nas partes metálicas.

O valor da corrente equivalente em pu é a razão entre a corrente I_{eq} e a corrente nominal I_R encontrado como segue:

$$I_{eq}(pu) = \frac{I_{eq}}{I_R} = \sqrt{\left(\frac{I_{eq}}{I_R}\right)^2} = \sqrt{\frac{P_{TL}}{P_{TL-R}}} \quad (38)$$

Considerando os valores em pu, considerando as perdas de base como sendo RI_R^2 ,

a fórmula final para a corrente equivalente em pu é dada por (39):

$$I_{eq}(pu) = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2(pu) + P_{EC-R} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \cdot h^2 + P_{OSL-R} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \cdot h^{0,8}}{1 + P_{EC-R} + P_{OSL-R}}} \quad (39)$$

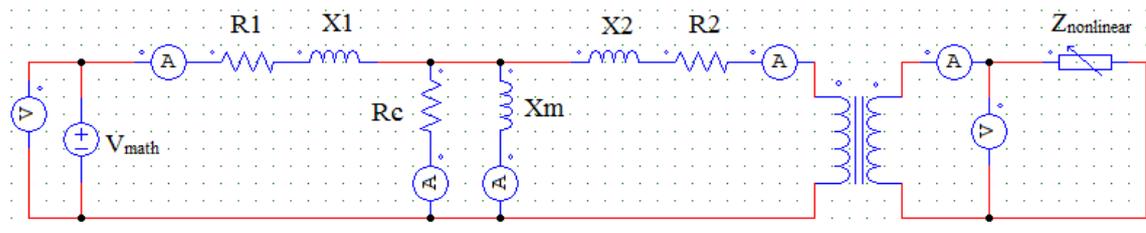
Observa-se que ao desconsiderar as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos e em outras partes metálicas do transformador, a equação 39 se torna simplesmente:

$$I_{eq}(pu) = I_{RMS}(pu) \quad (40)$$

4.2 Simulação das Perdas

A análise das perdas nos transformadores é realizada através de simulação do circuito equivalente de um transformador, utilizando o software PSIM. A Figura 16 mostra o circuito equivalente no ambiente de trabalho do PSIM.

Figura 16 – Circuito equivalente por fase de um transformador qualquer.



Fonte: Autor

As resistências R_1 e R_2 representam as resistências ôhmicas nos enrolamentos, que geram perdas por efeito Joule, X_1 e X_2 representam as reatâncias de dispersão, R_c representa a resistência de perdas no núcleo e X_m representa a reatância de magnetização. A distorção da corrente de carga se dá através do elemento $Z_{nonlinear}$, o qual é definido como um elemento que apresenta relação não linear entre tensão e corrente. O elemento V_{math} permite que qualquer função matemática seja implementada na tensão de entrada do transformador, permitindo distorcer a tensão de entrada.

Como o foco da simulação são as perdas de potência ativa, os principais ramos do circuito a serem monitorados são aqueles nos quais estão conectadas as resistências R_1 , R_2 e R_C . A Tabela 1 mostra as funções implementadas no elemento $Z_{nonlinear}$ considerando somente a 3ª harmônica somada a componente fundamental.

Tabela 1 - Funções do elemento $Z_{nonlinear}$ de acordo com a TDH para uma única componente de 3ª harmônica

TDH (i)	Função de corrente a ser implementada no elemento $Z_{nonlinear}$
0.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t)$
5.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 12.09 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$
10.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 24.17 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$
15.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 36.25 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$
20.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 48.34 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$
25.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 60.43 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$
30.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 72.51 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$
99.00%	$241.72 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t) + 239.30 \cdot \sin((3) \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 60 \cdot t))$

Fonte: Autor

Note da Tabela 1 que para simular a contribuição nas perdas de cada componente harmônica individual para ordens harmônicas diferentes de três, basta modificar o valor da ordem harmônica na parcela de componente harmônica da onda implementada por $Z_{nonlinear}$. De uma maneira geral, a corrente distorcida a ser implementada no elemento de carga não linear é dado por (41):

$$I_{Distorcida}(t) = I_{fund} \cdot [\sin(\omega t) + TDH \cdot \sin(h\omega t)] \quad (41)$$

onde $I_{Distorcida}$ é a corrente distorcida, I_{fund} é o módulo da componente fundamental de corrente, ω é a frequência angular.

Na simulação, a contribuição de uma corrente distorcida composta por várias componentes harmônicas também foi verificada. Neste caso a função a ser implementada pelo elemento $Z_{nonlinear}$ é dada por (42):

$$I_{Distorcida}(t) = I_{fund} \cdot \left[\sin(\omega t) + \frac{TDH}{2} \cdot \sum_{h=2}^{\infty} \sin(h\omega t) \right] \quad (42)$$

O elemento V_{math} é semelhante ao elemento $Z_{nonlinear}$, onde os valores de I_{fund} são substituídos pelo valor da Tensão nominal de alimentação do transformador considerado.

De maneira a simplificar, as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos e em outras partes metálicas do transformador, definidas em (34) e (35) e aplicadas em (39), são desconsideradas, resultando na equação do carregamento equivalente dada por (40).

O modelo de transformador utilizado na simulação foi um transformador WEG com as especificações do fabricante mostradas na Figura 17:

Figura 17 – Modelo de transformador usado na simulação

		FOLHA DE DADOS	Data : 7 / nov / 2018
Linha de Produto: Transformadores de Distribuição			
Características			
Potência: 112,5 kVA Norma de Fabricação: NBR 5440 Refrigeração: ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral Classe de Tensão (kV): 15 kV Tensão Primária: 13,8/13,2/12,6 kV Tensão Secundária: 380/220 V		Freqüência nominal: 60 Hz Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos 60° C no topo do óleo Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5 Perdas em vazio (perdas no ferro): 390 W Perdas totais: 1890 W Corrente de excitação: 2,5 % Impedância a 75° C: 3,5 % Comprimento (C) : Consultar Vendas T&D Largura (L) : Consultar Vendas T&D Altura (A) : Consultar Vendas T&D Peso: Consultar Vendas T&D	
Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30°		Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão	

Fonte: Autor

Utilizando as especificações da Figura 17, é possível determinar os parâmetros necessários para a simulação. A Tabela 2 mostra os parâmetros calculados do transformador de acordo com as especificações do fabricante, com os parâmetros do secundário referidos ao primário.

Tabela 2 – Parâmetros do Circuito equivalente usado na simulação

Parâmetro	R_1	R_2	R_C	X_m	X_1	X_2
Valor (Ω)	33,79	33,79	23,354k	3,26158k	82,1424	82,1424

Fonte: Autor

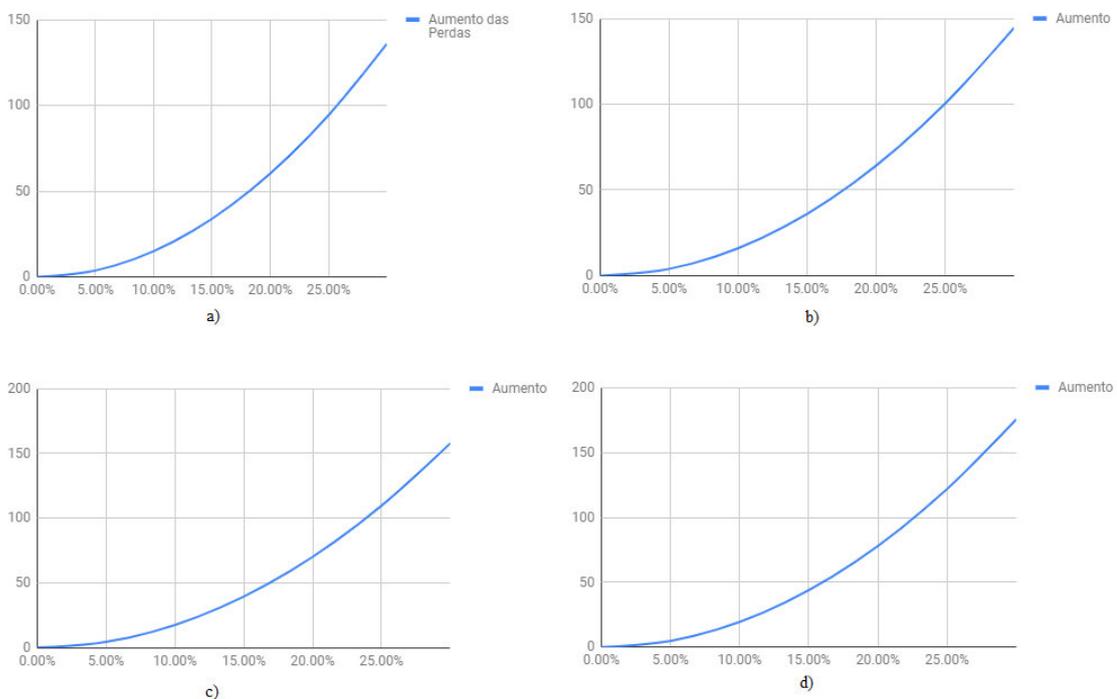
5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A simulação foi dividida em etapas nas quais foram verificados os seguintes aspectos: variação das perdas com o aumento da TDH e frequência de corrente de carga, análise das perdas pelo método do carregamento equivalente e método do carregamento equivalente acrescido das perdas por distorção e variação das perdas por distorção de tensão.

5.1 Perdas por distorção na corrente de carga

Nesta etapa, cada componente harmônica foi adicionada à componente fundamental em separado, avaliando como cada componente contribuiu individualmente para o aumento das perdas de acordo com a TDH de corrente. O Gráfico 1 mostra o aumento das perdas para cada componente harmônica.

Gráfico 1 – Análise em separado da contribuição de cada componente harmônica no aumento das perdas. a) somente 3^a harmônica. b) somente 5^a harmônica. c) somente 7^a harmônica. d) somente 9^a harmônica



Fonte: Autor

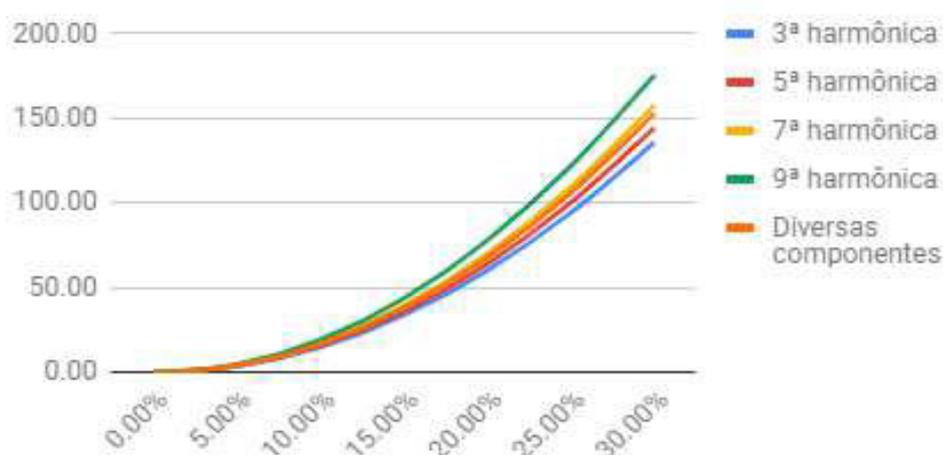
Nota-se que em todas as curvas o aumento da TDH ocasiona um aumento das perdas de forma quadrática. Analisando a influência do aumento da frequência nas perdas, a Tabela 3 mostra que quanto maior a ordem, e, portanto, quanto maior a frequência, maiores as perdas para uma mesma TDH. O Gráfico 2 é uma sobreposição das curvas do Gráfico 1, com a inclusão da curva de perdas devido a uma onda composta por várias componentes harmônicas.

Tabela 3 - Comparação do aumento das perdas (W) em função da TDH entre ondas com componentes harmônicas individuais.

TDH (i)	3ª harmônica	5ª harmônica	7ª harmônica	9ª harmônica
0.00%	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00%	3.72	3.96	4.35	4.88
10.00%	15.02	15.96	17.47	19.50
15.00%	33.88	36.02	39.38	43.88
20.00%	60.32	64.14	70.07	78.02
25.00%	94.33	100.31	109.54	121.91
30.00%	135.90	144.54	157.80	175.55

Fonte: Autor

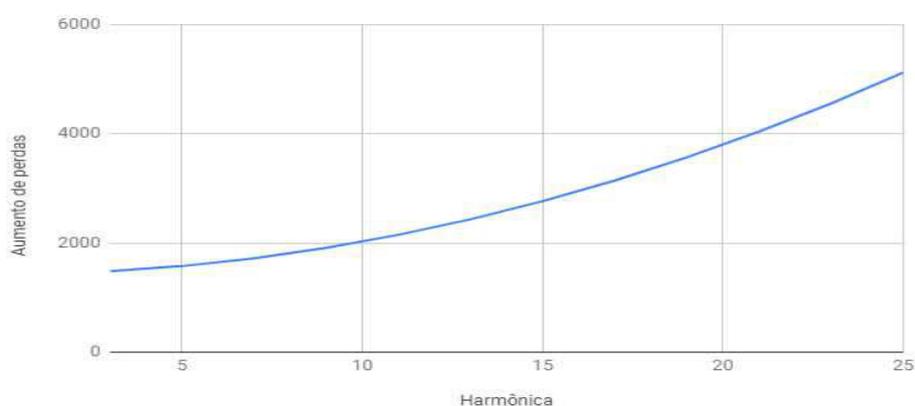
Gráfico 2 - Comparação do aumento das perdas (W) em função da TDH entre ondas com componentes harmônicas individuais.



Fonte: Autor

Pelo Gráfico 2, nota-se que uma forma de onda composta da fundamental e da 9ª harmônica ocasiona mais perdas que as demais. Percebe-se ainda que uma forma de onda de corrente composta por diversas componentes harmônicas gera mais perdas que as formas de ondas compostas pela fundamental e 3ª harmônica e fundamental e 5ª harmônica. No Gráfico 3, a TDH permaneceu fixa em 99% e foram simuladas as perdas para a fundamental e uma única componente harmônica, da 3ª até a 25ª harmônica.

Gráfico 3 – Aumento das perdas com o aumento da ordem harmônica



Fonte: Autor

O Gráfico 3 fortalece a tese de que com o aumento da frequência, as perdas também aumentam.

5.2 Carregamento equivalente e consideração do aumento das perdas

De acordo com o método de avaliação proposto por Bagheri, Xu e Shaloudegi (2018), foram simulados os perfis de carregamento do transformador em porcentagem da plena carga para taxas de distorção harmônica fixas de 200%, 120%, e 30% respectivamente. A Tabela 4 mostra o carregamento equivalente por porcentagem da plena carga a TDHs fixas:

Tabela 4 - Carregamento equivalente por porcentagem da plena carga a TDHs fixas

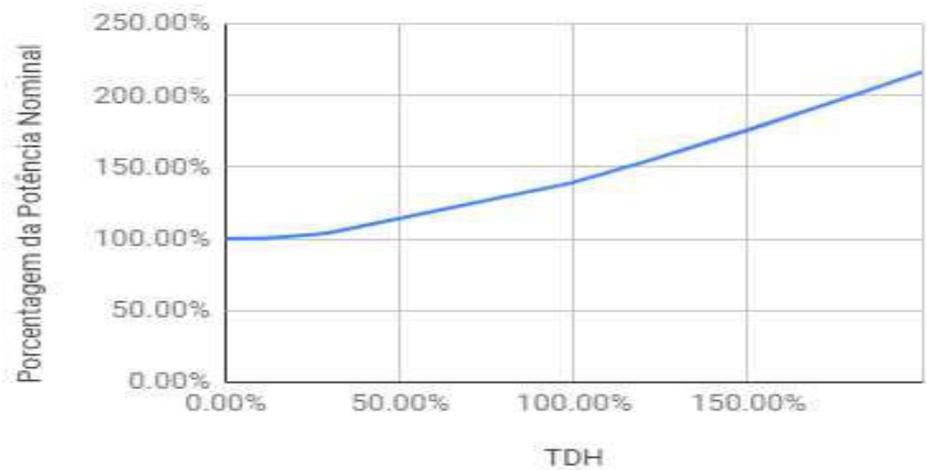
% da carga	leq (pu) (TDH 200%)	leq (pu) (TDH 120%)	leq (pu) (TDH 30%)
0.00%	0.00	0.00	0.00
10.00%	0.22	0.16	0.10
20.00%	0.45	0.31	0.21
30.00%	0.67	0.47	0.31
40.00%	0.89	0.62	0.42
50.00%	1.12	0.78	0.52
60.00%	1.34	0.94	0.63
70.00%	1.56	1.09	0.73
80.00%	1.79	1.25	0.84
90.00%	2.01	1.41	0.94
100.00%	2.23	1.56	1.04

Fonte: Autor.

Segundo a decisão técnica DT-072/2006 da Enel, a sobrecarga máxima admissível em transformadores de distribuição é de 20% em um período de 4 horas para áreas comerciais e de 40% em um período de 2 horas para áreas residenciais. Levando isso em consideração, a Tabela 4 mostra que transformadores com cargas com taxas de distorção de 30% são capazes de operar com 100% da carga nominal em áreas residenciais e comerciais, dado o aumento percentual de apenas 4% acima do valor nominal de potência. Já para taxas de distorção de 200% e 120% o transformador é capaz de fornecer apenas 50% e 70% da potência nominal para áreas comerciais e 60% e 80% para áreas residenciais respectivamente.

Por outro lado, fixando-se a porcentagem do carregamento do transformador a 100% do valor de plena carga, isto é, fixando o valor da componente fundamental igual ao valor de plena carga, e variando-se a taxa de distorção, é possível obter a curva da potência aparente a ser entregue pelo transformador em função da taxa de distorção harmônica, como mostra a Gráfico 4.

Gráfico 4 - Curva de Porcentagem de Potência nominal em função da TDH

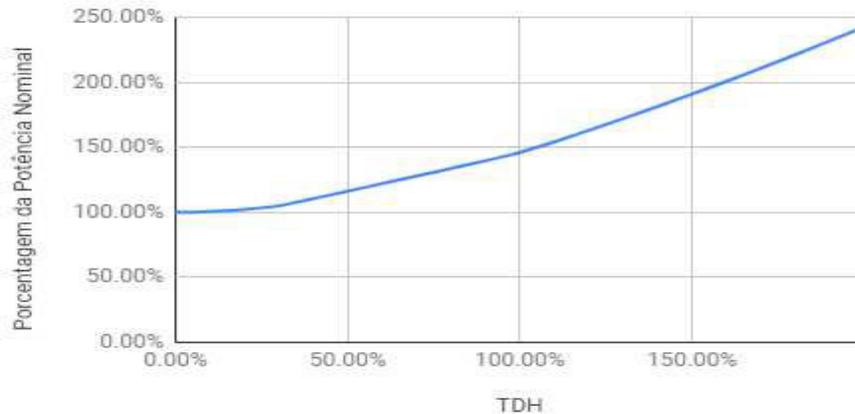


Fonte: Autor

De acordo com a Gráfico 4, o transformador simulado pode operar com taxa de distorção de corrente de até 40% aproximadamente sem sobrecarregar o equipamento. Esta é uma abordagem interessante no dimensionamento de transformadores comuns para operação na presença de cargas que produzam harmônicas. O método apresentado é bom para avaliar a sobrecarga na presença de harmônicas, entretanto não considera o aumento das perdas no transformador devido a distorção da corrente.

Com a finalidade de contabilizar as perdas nos enrolamentos e no ferro com o aumento da taxa de distorção, o valor da potência aparente equivalente para cada taxa de distorção é calculado multiplicando-se o valor da potência nominal pelos valores de corrente equivalente por unidade. Estes valores são somados com os das perdas para cada taxa de distorção. A Gráfico 5 mostra a porcentagem da potência nominal em função da TDH com o acréscimo das perdas.

Gráfico 5 – Porcentagem da Potência Nominal em função da TDH



Fonte: Autor

Observe que no Gráfico 5 a porcentagem de potência nominal para uma determinada TDH é maior que aquela correspondente à mesma TDH dada pelo Gráfico 4, fornecida pelo método do carregamento equivalente. Para uma TDH fixa de 200%, por exemplo, o transformador está operando a quase 225% no método do carregamento equivalente. Considerando-se o aumento das perdas, esse valor sobe para aproximadamente 250%. A Tabela 5 mostra uma comparação da avaliação de carregamento pelos dois métodos para um TDH de 200%.

Tabela 5 - Comparação entre os métodos para uma TDH fixa de 200%

% da carga	I(pu) (carregamento equivalente)	S(pu) (somado às perdas devido às harmônicas)
0.00%	0.00	0.00
10.00%	0.22	0.23
20.00%	0.45	0.45
30.00%	0.67	0.69
40.00%	0.89	0.92
50.00%	1.12	1.16
60.00%	1.34	1.41
70.00%	1.56	1.65
80.00%	1.79	1.90
90.00%	2.01	2.16
100.00%	2.23	2.42

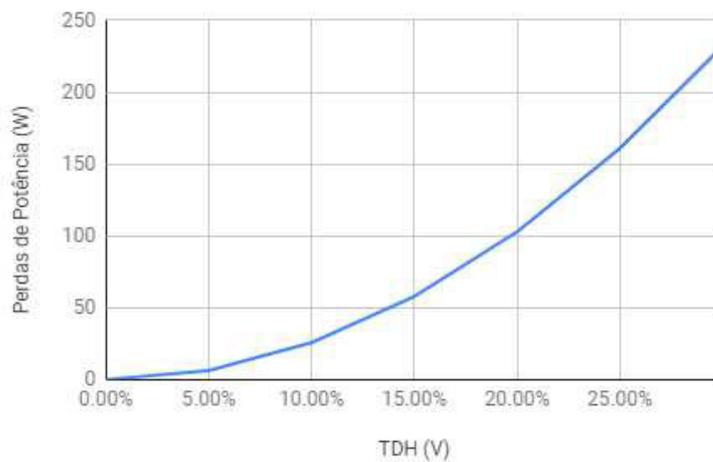
Fonte: Autor

Percebe-se da Tabela 5 que ambos os métodos indicam que o transformador pode operar a 50% da plena carga no caso da sobrecarga máxima admissível de 20%, enquanto que para uma sobrecarga máxima admissível de 40% o método do carregamento equivalente indica que o transformador opera dentro da margem para 60% da plena carga e o método que considera as perdas indica uma operação segura ainda a 50% da plena carga.

5.3 Perdas por distorção na tensão de entrada do transformador

Por fim, foi analisado também o comportamento das perdas com o aumento da taxa de distorção de tensão. O Gráfico 6 mostra o aumento das perdas com o aumento da TDH de tensão na entrada do transformador.

Gráfico 6 - Perdas em função da TDH (V)



Fonte: Autor

O Gráfico 6 indica o comportamento quadrático do aumento das perdas no transformador com o aumento da taxa de distorção de tensão. Foi verificado também que nessa etapa as perdas no ferro foram as que mais aumentaram com o aumento da TDH_v , enquanto que as perdas no cobre se mostraram mais sensíveis ao aumento da TDH_i com as perdas no ferro permanecendo praticamente constantes nessa situação.

6 CONCLUSÕES

A presença de componentes harmônicos de tensão e corrente nos sistemas elétricos insere componentes de frequência múltiplas da frequência fundamental. Os resultados de simulação obtidos nesta pesquisa mostram que estas frequências diferentes da fundamental contribuem para o aumento das perdas nos transformadores.

Foi verificado que a presença de harmônicos de tensão na entrada dos transformadores apresenta impacto principalmente nas perdas à vazão. A curva das perdas em função da TDH é quadrática, indicando que qualquer distorção gera um grande aumento nas perdas. Entretanto, o módulo 8 do PRODIST estabelece que a TDH de tensão permaneça abaixo de 5%, o que minimiza o impacto das distorções de tensão no aumento dessas perdas.

As distorções de corrente não podem ser controladas pois dependem do tipo de carga. A simulação mostrou que uma corrente de carga com diversas componentes harmônicas tem mais impacto no aumento das perdas do que se tivesse somente 3ª ou 5ª harmônicas para uma mesma TDH de corrente de carga. Uma análise em separado da contribuição de cada componente nessas perdas mostrou que quanto maior a ordem da componente, maior é a perda. As perdas aumentam com o aumento da taxa de distorção de corrente de forma quadrática. Em geral na rede elétrica quanto maior a ordem da componente harmônica, menor sua amplitude, o que minimiza o impacto das componentes de ordem superior.

Utilizando o conceito de carregamento equivalente, a carga do transformador foi avaliada na presença de harmônicas. O método é bastante eficiente para analisar situações de sobrecarga, mas não considera o aumento das perdas nos transformadores devido às harmônicas. A solução proposta é calcular o carregamento equivalente baseado na potência aparente e somar com o valor das perdas calculadas. A sobrecarga do transformador ocorre então antes do previsto utilizando o conceito de carregamento equivalente.

REFERÊNCIAS

- A. H. M. Santos et al. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: Ed. da EFEI, 2006. 3ª edição revista e ampliada.
- AMAR, M. Protat, F. **A Simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon Iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation**. IEE Transactions on Magnetics. V. 30 n. 2. 942 - 944, 1994.
- BAGHERI, Pooya; XU, Wilsun; SHALOUDEGI, Kiarash. New indices to evaluate the impact of harmonic currents on power transformers. **Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP**, v. 2018–May, p. 1–6, 2018.
- BASTOS, J.P.A et al. **Eddy current losses on Epstein frame overlapped corner sheets**. International IGTE Symposium, Bradford, v. 26.2007,3, n. 12, p. 342-347, jan. 2007. Disponível em :<<http://boulph.free.fr/Krzysztof/2006%20Eddy%20current%20losses%20on%20Epstein%20frame.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2018.
- BATISTELA, Nelson Jhoe. **Caracterização E Modelagem Eletromagnética De Lâminas De Aço Ao Silício**. 2001. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/81963/178906.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- BERNARDES, Délvio F. et al. **Impacto causado pelo uso de cargas não lineares em transformadores**. Revista O Setor Elétrico, Itajubá, n. 53, p. 2-22, jun. 2010. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/impacto-causado-pelo-uso-de-cargas-nao-lineares-em-transformadores/>>. Acesso em: 07 ago. 2018.
- CHÁVEZ, Diego Ernesto González. **Estudo do ruído Barkhausen como técnica de ensaio não destrutivo**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Física)- Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, [S.l.], 2009. 2009.
- EMANNUEL, a E et al. Effects of Harmonics on Equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 2, p. 672–680, 1993.
- EMANUEL, A. E.; WANG, X. Estimation Of Loss Of Life Of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 3, p. 715–720, 1985.
- FUCHS, E F; ROESLER, D J; ALASHHAB, F S. Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power SYSTEM's Voltage. Part I: Transformers and Induction Machines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, n. 2, p. 437–444, 1987.

HENDERSON, Robert D.; ROSE, Patrick J. Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 3, p. 528–532, 1994.

HWANG, M.S.; GRADY, W.M.; SANDERS, H.W. Distribution Transformer Winding Losses Due To Nonsinusoidal Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, n. 1, p. 140–146, 1987.

JAYASINGHE, N R; LUCAS, J R; PERERA, K B I M. Power System Harmonic Effects on Distribution Transformers and New Design Considerations for K Factor Transformers. n. September, 2003.

KEFALAS, Themistoklis D.; KLADAS, Antonios G. Harmonic impact on distribution transformer no-load loss. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 1, p. 193–200, 2010.

LI, Jieli; ABDALLAH, T.; SULLIVAN, C. R. **Improved Calculation of Core Loss With Nonsinusoidal Waveforms**. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Hanover, v. 2001, p. 2203–2210, out. 2001. Disponível em: <<http://thayer.dartmouth.edu/inductor/papers/gse.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

LI, Jieli; ABDALLAH, Tarek; SULLIVAN, Charles R. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, v. 4, n. C, p. 2203–2210, 2001.

LISITA, Luiz Roberto et al. Perda adicional no núcleo em transformadores trifásicos alimentando cargas não-lineares. **IEEE Latin America Transactions**, v. 2, n. 1, p. 48–56, 2004.

MASOUM, Mohammad A S; MOSES, Paul S.; MASOUM, Amir S. Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 2033–2041, 2008.

MASSEY, Gregory W. Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, v. 30, n. 2, p. 485–489, 1994.

MAYERGOYZ, Isaak D. **Mathematical Models of Hysteresis and their Applications**. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2003. 498 p. v. único.

MEURER, Evandro Jacob. **Estudo das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MORGAN, Manuel Alfredo Caldas. **Ruído Magnético de Barkhausen contínuo rotacional**. 2013. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

PINHEIRO, Matheus Levi Paranguá. **Caracterização e Modelagem da Histerese e das Perdas Magnéticas em Aços Elétricos Através do SCaMMA**. 2016. 224 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação)- Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SANTOS, Luciano Dos. **Cálculo das Perdas Técnicas dos Transformadores de Distribuição, Operando em Ambiente Não-Senoidal**. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira (SP), 2006.

VANDELAC, Jean Pierre; ZIOGAS, Phoivos D. A Novel Approach for Minimizing High-Frequency Transformer Copper Losses. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 3, n. 3, p. 266–277, 1988.

YILDIRIM, Deniz; FUCHS, Ewald F. Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor (FHL) approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 1, p. 186–191, 2000.