



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

**EMANOEL LEANDRO DE PAIVA DAMASCENO**

**ANÁLISE TÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR A SECO NA PRESENÇA  
DE HARMÔNICOS**

**SOBRAL**

**2017**

EMANOEL LEANDRO DE PAIVA DAMASCENO

ANÁLISE TÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR A SECO NA PRESENÇA DE  
HARMÔNICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – Campus de Sobral, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Isaac Rocha Machado.

SOBRAL

2017

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)

---

- D162a Damasceno, Emanuel Leandro de Paiva.  
Análise térmica de um transformador a seco na presença de harmônicos / Emanuel Leandro de Paiva Damasceno. – 2017.  
65 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Isaac Rocha Machado.
1. Transformador. 2. Harmônicos. 3. Temperatura. I. Título.

CDD 621.3

---

EMANOEL LEANDRO DE PAIVA DAMASCENO

ANÁLISE TÉRMICA DE UM TRANSFORMADOR A SECO NA PRESENÇA DE  
HARMÔNICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – Campus de Sobral, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Isaac Rocha Machado (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Éber de Castro Diniz

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Engenheiro Eletricista Fabiano da Silva Teixeira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha família.

A todos os meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar e iluminar.

Aos meus pais, Manoel e Zilair, pela confiança e liberdade que sempre me deram.

Aos meus irmãos que sempre me ajudaram.

A todos os professores da época que frequentava a escola, em nome do professor Jandro, o qual foi muito importante para que eu pudesse entrar na Universidade.

Aos meus tios, Jorge e Germilda, pelo acolhimento em sua casa ao longo desses anos e pelos conselhos. E seus filhos, Luis Gustavo e João Otávio pelas brincadeiras que fazíamos.

A todos os professores e funcionários da Universidade Federal do Ceará que me ajudaram ao longo da graduação, em nome do Prof. Dr. Isaac Rocha Machado, Fabiano Teixeira e Marcus Euler que me ajudaram a elaborar este trabalho.

Aos meus colegas e amigos da faculdade que foram fundamentais para conseguir a aprovação em algumas disciplinas. Em nome dos colegas bolsistas, os quais eram monitores.

A todos os meus tios e a família em geral, em nome do meu padrinho e madrinha, Zé Francisco e Aurismania. E seus filhos, Diego, Junior e Dani pela amizade e ajuda.

“Deus mandou te dizer que tudo aquilo que  
você, tanto pediu será realizado!”

(Pe. Fábio de Melo)

## RESUMO

Atualmente a quantidade de cargas não lineares vem aumentando significativamente no sistema elétrico. Elas injetam conteúdo harmônico na rede elétrica acarretando prejuízos para as distribuidoras e também para os consumidores. Dentre os danos que as harmônicas causam nos transformadores, por exemplo, é diminuição do rendimento e da eficiência, mau funcionamento, perdas adicionais, ruído e também sobreaquecimento. Em consequência disso diminui a vida útil do sistema de isolamento, que fica entre os enrolamentos. Este trabalho tem por finalidade verificar o comportamento de um transformador a seco trifásico de 1 kVA na presença de harmônicos de tensão e corrente. No estudo experimental, o transformador a seco foi submetido à fonte de tensão senoidal e carga linear, e outro caso com fonte de tensão com harmônicos (3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens) e carga não linear. Em cada caso foi registrado a forma de onda da tensão e corrente, temperatura do transformador (enrolamento e núcleo) e THD de corrente.

**Palavras-chave:** Transformador. Harmônicos. Temperatura. Carga não linear.



## **ABSTRACT**

Currently the amount of nonlinear loads has been increasing significantly in the electrical system. They inject harmonic content into the power grid, damaging distributors and consumers alike. Among the damages to the transformer caused by the harmonics, for example, it is the decrease in performance and efficiency, malfunctions, additional losses, noise and also overheating. As a result, reduces the life of the insulation system, which is between the windings. This paper has the purpose of verifying the behavior of a 1 kVA three phase dry transformer in the presence of voltage and current harmonics. In the experimental study, the dry transformer was submitted to the sinusoidal voltage source and linear load, and another case with voltage source with harmonics (3rd, 5th and 7th orders) and nonlinear load. In each case the voltage and current waveform, transformer temperature (winding and core) and current THD were recorded.

**Keywords:** Transformer. Harmonics. Temperature. Nonlinear load.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Forma de onda distorcida, com suas componentes.....	19
Figura 2: Dois circuitos em (a) a carga é linear, em (b) a carga é não linear.....	20
Figura 3: Forma de onda medidas pelos amperímetros em (a) a carga é linear, em (b) a carga é não linear.....	21
Figura 4: Circuito com um filtro passivo.....	23
Figura 5: Princípio básico do filtro ativo.....	24
Figura 6: Exemplo de componentes simétricas.....	26
Figura 7: Tipos de núcleo em (a) é núcleo envolvido e, (b) é núcleo envolvente.....	31
Figura 8: Transformador com núcleo envolvido, em (a) montagem do transformador e, (b) esquema em corte.....	31
Figura 9: Transformador com núcleo envolvente, em (a) montagem do transformador e, (b) esquema em corte.....	32
Figura 10: Diagrama de perdas no transformador.....	33
Figura 11: Corrente circulando em um condutor e criando um campo magnético, em (a) o condutor é retilíneo e em (b) foi dado voltas no condutor.....	35
Figura 12: Transformador sem carga.....	37
Figura 13: Diagrama fasorial na condição a vazio.....	38
Figura 14: Transformador ideal conectado a uma carga.....	41
Figura 15: Circuito do transformador ideal com uma impedância conectada no secundário.....	42
Figura 16: Impedância conectada no secundário do transformador refletida no primário.....	43
Figura 17: Representação de um transformador com os fluxos mútuo e disperso.....	44
Figura 18: Circuito representando o enrolamento primário.....	44

Figura 19: Circuito representando o enrolamento primário e o núcleo do transformador.....	45
Figura 20: Circuito representando o transformador.....	46
Figura 21: Circuito equivalente T de um transformador.....	47
Figura 22: Equipamentos utilizados.....	55
Figura 23: Temperatura inicial do transformador.....	55
Figura 24: Esquema do circuito para uma carga resistiva.....	56
Figura 25: Experimento realizado para o caso 1.....	57
Figura 26: Forma de onda de tensão e corrente para o caso 1.....	57
Figura 27: Temperatura no enrolamento em (a), Temperatura no núcleo em (b).....	58
Figura 28: THD de corrente para o caso 1.....	58
Figura 29: Esquema do circuito para carga não linear.....	59
Figura 30: Experimento realizado para o caso 2.....	60
Figura 31: Forma de onda de tensão e corrente para o caso 2.....	60
Figura 32: Temperatura no enrolamento em (a), Temperatura no núcleo em (b).....	61
Figura 33: THD de corrente para o caso 2.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Definição dos possíveis valores de frequências existentes.....	18
Tabela 2: Ordem, frequência e sequência da fundamental e dos harmônicos para sistema trifásico equilibrado.....	27
Tabela 3: Limites de distorção harmônica de tensão sob-responsabilidade da concessionária de energia.....	28
Tabela 4: Limites de distorção harmônica de corrente (para valores de tensão entre 120 V a 69 kV eficaz) e TDD.....	29
Tabela 5: Características dos isolantes.....	34
Tabela 6: Algumas informações sobre os equipamentos usados.....	56
Tabela 7: Medidas realizadas.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
FCEM	Força contraeletromotriz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBR	Norma Brasileira
PCC	Ponto de Conexão Comum
RMS	Root Mean Square
Std	Standard
TDD	Taxa de distorção da demanda
THD	Total Harmonic Distortion

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 Motivação.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Estrutura do trabalho.....	17
<b>2. HARMÔNICAS.....</b>	<b>18</b>
2.1 Relações entre cargas elétricas e harmônicos.....	19
2.2 Série de Fourier.....	22
2.3 Abordagem de técnicas para mitigação de harmônicas.....	23
2.4 Indicadores de deformações harmônicas.....	24
2.4.1 Taxa de distorção da demanda.....	25
2.4.2 Sequência das harmônicas.....	25
2.5 Norma sobre harmônicos (IEEE 519).....	28
<b>3. TRANSFORMADORES: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E TÉCNICAS.....</b>	<b>30</b>
3.1 Características construtivas do transformador.....	30
3.2 Perdas em transformadores.....	32
3.3 Materiais isolantes.....	33
3.4 Fundamentos físicos para o funcionamento dos transformadores.....	34
3.5 Transformador a vazio.....	37
3.6 Transformador ideal conectado a uma carga.....	39
3.7 Etapas para elaboração do circuito do transformador real.....	43
3.8 Norma sobre transformadores (IEEE C57.110).....	47
3.8.1 Perdas sob condição senoidal nos enrolamentos do transformador.....	48
3.8.2 Perdas sob condição não senoidal nos enrolamentos do transformador.....	49
3.8.3 Impacto no condutor neutro.....	52

<b>3.9 Conseqüências dos harmônicos em transformadores.....</b>	<b>52</b>
<b>4. RESULTADO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1 Equipamentos utilizados.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2 Medições realizadas para o caso 1.....</b>	<b>56</b>
<b>4.3 Medições realizadas para o caso 2.....</b>	<b>59</b>
<b>4.4 Análise do resultado experimental.....</b>	<b>61</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 Trabalhos futuros.....</b>	<b>63</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>64</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

A qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi objeto de interesse. Porém, até a 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 dezenas de anos a grande maioria dos receptores ligados aos sistemas de energia elétrica consistia em cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são senoidais, as correntes consumidas eram também senoidais e de mesma frequência (AFONSO; MARTINS, 2003).

Nas últimas décadas, devido à crescente evolução tecnológica da eletrônica de potência e conseqüentemente da grande utilização de cargas não lineares, a presença de distorções harmônicas em sistemas de energia elétrica tem crescido substancialmente. Pesquisas realizadas indicam que atualmente as cargas não lineares são responsáveis por cerca de 70% da demanda dos consumidores residenciais, comerciais e industriais (PORT, 2006).

Dentre os vários equipamentos que fazem parte do sistema elétrico, destaca-se o transformador de potência, o qual opera como uma “interface” entre o sistema elétrico e as cargas a serem supridas. Transformador que supre carregamentos não lineares apresenta sobreaquecimento e em conseqüência diminuição de sua vida útil (DALILA; KHALID; MD SHAH, 2009).

### **1.1 Motivação**

O transformador é um equipamento indispensável no sistema elétrico, pois é responsável por adequar os níveis de tensão seja na geração, transmissão ou distribuição.

No sistema elétrico os consumidores residenciais, comerciais e industriais, são os que consomem mais energia elétrica. Esses consumidores utilizam cargas não lineares, fazendo com que afete os equipamentos da rede elétrica, como exemplo o transformador.



## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre os efeitos dos harmônicos em transformadores, em especial o sobreaquecimento desse equipamento, aumento das perdas, danificação da isolação e redução da sua vida útil.

Este trabalho tem o intuito também de verificar o nível de distorção no secundário do transformador a seco nas situações com fonte senoidal e não senoidal com carga linear e não linear.

Também tem o intuito de mostrar equações que representem os harmônicos e os transformadores.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

O capítulo 1, em que este item está inserido apresenta a introdução, a motivação e os objetivos.

O capítulo 2 aborda formas de mitigar e equações que representem os harmônicos, suas relações com as cargas e uma norma sobre harmônicos.

O capítulo 3 apresenta uma análise teórica sobre transformadores, suas características construtivas e técnicas, perdas, características dos materiais isolantes, princípios básicos, sua representação ideal e real e uma norma sobre transformador.

O capítulo 4 aborda a descrição das atividades experimentais, em que foi medida a temperatura do transformador.

O capítulo 5 destina-se a expor as conclusões e algumas sugestões de trabalhos futuros.

## 2. HARMÔNICAS

A palavra harmônica teve origem na física no movimento ondulatório, ela se trata de valores de frequências, esses valores são múltiplos inteiros e distintos da frequência fundamental.

Pesquisas relacionadas aos harmônicos é em geral sobre o impacto das cargas não lineares, cálculo da distorção harmônica, situações que possa haver ressonância e filtros de potência (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Se iniciou o estudo das deformações harmônicas logo depois do surgimento da corrente alternada. Em 1916 Steimetz, matemático e engenheiro eletricitista, publicou um livro sobre harmônicos. O livro abordava com mais ênfase sobre as correntes harmônicas de terceira ordem, causadas pela saturação magnética do ferro em transformadores e máquinas. Ele foi o primeiro pesquisador a sugerir a conexão delta em transformadores para confinar as correntes harmônicas de terceira ordem no interior do delta com a finalidade de não transferi-las as correntes de linha (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A primeira vez que se estudou harmônico foi relacionado ao aquecimento de um motor em Hartford, em 1893 (OWEN, 1998). Como se pode constatar harmônico é um assunto estudado a tempos, e que nos dias de hoje ainda se mantém comum especialmente na área de engenharia, porque os seus efeitos ainda são visíveis.

A Tabela 1 mostra as definições das possíveis frequências existentes.

Tabela 1: Definição dos possíveis valores de frequências existentes.

Harmônica	$f = nf_1$ em que $n$ é um número inteiro maior que um
Componente cc	$f = nf_1$ para $n=0$
Inter-harmônica	$f = nf_1$ em que $n$ é um não inteiro maior do que um
Sub-harmônica	$f > 0$ Hz e $f < f_1$
$f_1 =$ frequência fundamental da onda	

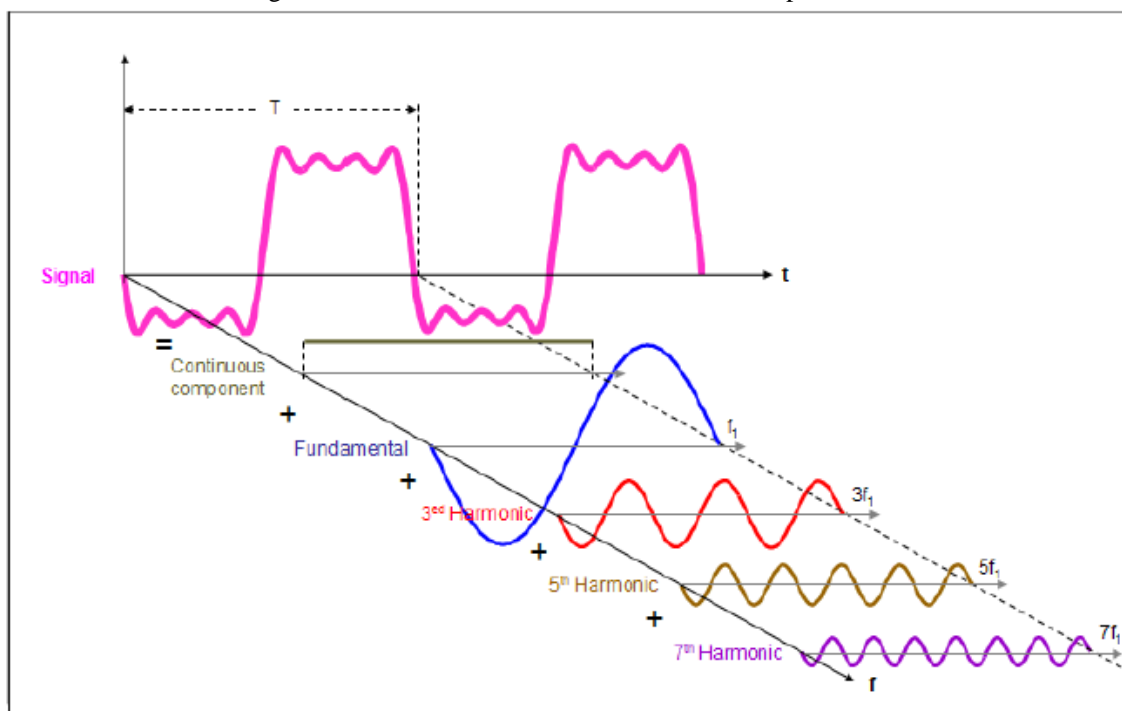
Fonte: Adaptada de LPQI (2004).

No Brasil a frequência fundamental é 60 Hz. As harmônicas apresentam frequências que são múltiplas inteiras da frequência fundamental, exemplos de frequências harmônicas são 120 Hz (harmônica de segunda ordem) e 180 Hz (harmônica de terceira ordem). As formas de ondas com frequências não múltiplas inteiras da fundamental que apresentam frequências maiores que 60 Hz e que ficam entre as frequências harmônicas, são denominadas inter-harmônicas, exemplos são 90

Hz e 150 Hz. Formas de onda com frequência maior que zero e menor que 60 Hz são denominados sub-harmônicas.

A somatória entre a componente fundamental e as componentes harmônicas, que são senóides com frequência de 60 Hz e múltiplas inteiras de 60 Hz, respectivamente, produz uma forma de onda distorcida como mostra a Figura 1.

Figura 1: Forma de onda distorcida, com suas componentes.



Fonte: HERNÁNDEZ; CASTRO; CARPIO; COLMENAR (2009).

Como se pode observar, uma forma de onda deformada é a somatória de ondas senoidais, composta pela componente fundamental e harmônicas cada componente harmônica é responsável por um nível de distorção. A componente fundamental é a mais expressiva dos sinais que compõem a forma de onda distorcida, e a sua ordem é 1.

No sistema elétrico as harmônicas se propagam através dos condutores fases e neutro que provocam distorção na forma de onda da tensão e corrente. Esse fenômeno não é um distúrbio transitório, como afundamentos de tensão e elevação de tensão, ou seja, a deformação provocada pelos harmônicos tem duração permanente.

## 2.1 Relações entre cargas elétricas e harmônicos

Dentre os objetivos das distribuidoras de energia, tem-se como um dos principais, a qualidade no suprimento de energia para as unidades consumidoras. Idealmente as redes elétricas brasileiras, no sistema de corrente alternada, deveriam

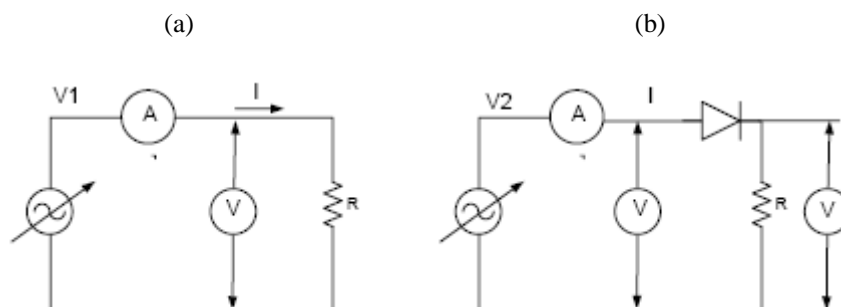
manter a forma de onda da tensão e corrente senoidal, com frequência de 60 Hz e amplitude constante, uma vez que os equipamentos são projetados para tal. Mas ocorrem deformações nas formas de onda, devido às cargas não lineares que injetam conteúdo harmônico no sistema elétrico. Elas estão cada vez mais presentes nas residências e indústrias, como por exemplo, computadores, impressoras e lâmpadas.

As cargas não lineares injetam correntes harmônicas na rede elétrica. A presença dessas correntes produzem tensões harmônicas devido à queda de tensão não linear na impedância do sistema que leva a uma distorção na tensão de alimentação. Esta distorção depende da corrente que a carga solicita. Com a tensão deformada, todos os equipamentos a jusante de onde houve a distorção sofrem complicações.

No passado as principais fontes de harmônicos eram equipamentos com núcleo ferromagnético, como máquinas elétricas, transformadores operando na região de saturação, fornos a arco e lâmpadas fluorescentes. Hoje as principais fontes geradoras de harmônicos são os equipamentos eletrônicos (SCHWANZ, 2013).

A utilização de cargas não lineares proporciona uma relação não linear entre tensão e corrente. A não linearidade provoca deformações que são devidas a utilização de acionamentos estáticos, fontes chaveadas, pontes retificadoras estáticas e conversores eletrônicos, inversores de frequência e outros dispositivos eletrônicos e eletromagnéticos com característica não linear, em que esses são usados em todos os níveis do sistema elétrico. A seguir são mostrados na Figura 2, dois circuitos com uma fonte senoidal, com frequência de 60 Hz.

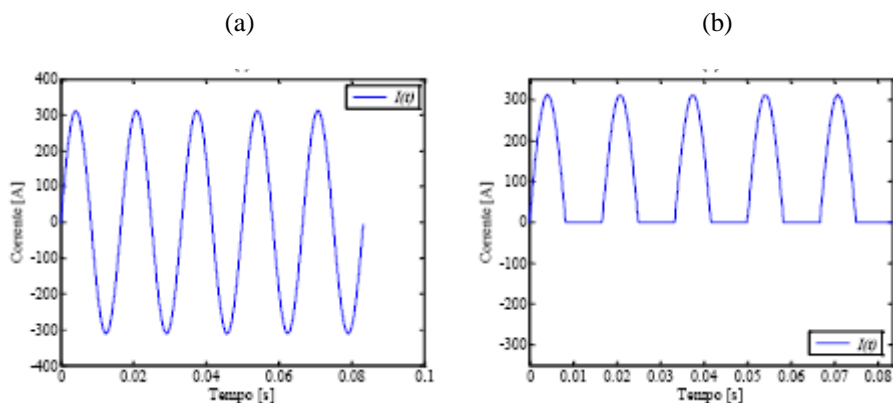
Figura 2: Dois circuitos em (a) a carga é linear, em (b) a carga é não linear.



Fonte: PAGANINI; JANUÁRIO (2014).

A Figura 3 seguinte mostra as formas de onda das correntes medidas pelos amperímetros dos dois circuitos mostrados anteriormente.

Figura 3: Forma de onda medidas pelos amperímetros em (a) a carga é linear, em (b) a carga é não linear.



Fonte: PAGANINI; JANUÁRIO (2014).

Em (a) é visto que a forma de onda é senoidal, devido à carga ser linear, já em (b) pode-se ver que a forma de onda não é senoidal, por causa da presença do diodo, nesse caso não há uma relação linear entre tensão e corrente, fazendo com que a carga se torne não linear.

Cargas lineares quando submetidas a fontes senoidais geram correntes senoidais. Nesse caso a onda não contém nenhum conteúdo harmônico, onde é definida como sendo uma forma de onda limpa, sem distorção harmônica. Analisando outro caso semelhante ao anterior em que é mantida a fonte senoidal e conectada a ela uma carga não linear, tem-se que a corrente na carga é distorcida.

Quando uma fonte não senoidal é conectada a uma carga não linear, vai ocorrer à circulação de correntes harmônicas. Assim, tem-se que a corrente na carga também é distorcida. Se uma fonte de alimentação deformada é ligada a uma carga linear, vai gerar harmônico de corrente em consequência da deformação de tensão. Logo, a corrente na carga também será deformada.

Então quando existir uma fonte deformada ou uma carga não linear, terá como consequência a corrente de carga ser distorcida. É importante ressaltar que no caso em que se tem uma fonte de tensão distorcida, nesse caso, irá gerar harmônicos de tensão em proporção diferente da situação se fosse uma fonte de tensão senoidal.

Como se pode notar o estudo da qualidade de energia depende da fonte de tensão e também das cargas. É importante salientar que a tensão de alimentação está relacionada com a corrente de carga e vice-versa, ou seja, a corrente de carga depende da tensão de alimentação.

Em uma rede forte, onde a corrente de curto-circuito tem um valor alto e a impedância da rede é pequena, tem-se que as consequências impostas pelas cargas não

lineares na qualidade de energia são menores. Analisando outro caso no qual a rede é fraca, em que a impedância é alta, tem-se que a distorção da tensão é aumentada, podendo ocasionar consequências graves na qualidade de energia.

As cargas não lineares sejam monofásicas, bifásicas ou trifásicas são sensíveis com os conteúdos harmônicos que elas mesmas geram, assim como aqueles gerados por outras cargas não lineares que se encontram próximas (RIBEIRO, 2007).

## 2.2 Série de Fourier

Para identificar as componentes harmônicas existentes em uma onda distorcida, normalmente é empregada a análise de Fourier, desenvolvida em 1822 pelo matemático francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), uma ferramenta matemática importante nas aplicações práticas de ciências e de engenharia (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A série de Fourier possibilita que uma forma de onda que repete sua forma e sendo deformada pode ser representada por uma somatória de uma componente contínua adicionada a sinais senoidais e cossenoidais. Isso faz com que facilite a análise da forma de onda, pois um sinal que apresente sua função matemática desconhecida seja encontrado sua função e, essa é a somatória de funções conhecidas.

A função encontrada utilizando série de Fourier terá a seguinte forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \text{sen}(n\omega_1 t)] \quad (2.1)$$

onde  $a_0/2$  é o valor médio de  $f(t)$  ou componente contínua do sinal,  $a_n$  e  $b_n$  são as amplitudes da componente de ordem  $n$  da série ou coeficientes da série,  $\omega_1$  a frequência angular fundamental de  $f(t)$  tendo o valor de  $\omega_1 = 2\pi/T$  e  $n$  é a ordem do harmônico.

Os coeficientes  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são determinados pelas equações (2.2), (2.3) e (2.4).

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos(n\omega_1 t) dt, \quad \text{com } n = 1, \dots, \infty \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \text{sen}(n\omega_1 t) dt, \quad \text{com } n = 1, \dots, \infty \quad (2.4)$$

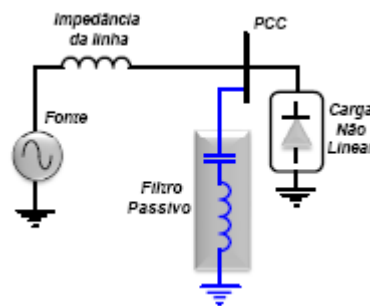
### 2.3 Abordagem de técnicas para mitigação de harmônicas

A principal técnica para mitigação de harmônicas de acordo com a IEE Std 519 (*Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*) é a utilização de filtros de potência. A sua função é diminuir a amplitude das componentes harmônicas presentes na rede elétrica.

Entre os filtros existentes os mais importantes são: o filtro passivo e filtro ativo. As conexões dos filtros podem ser série, paralela ou a combinação de série e paralela.

O filtro passivo clássico pode ser composto por resistor, indutor e capacitor conectado ao ponto de conexão comum (PCC) entre a fonte e a carga. Algumas características são: só filtra uma componente harmônica, seu custo é baixo e seu uso é simples. Conforme mostra a Figura 4, que é um exemplo de filtro passivo formado por indutor e capacitor.

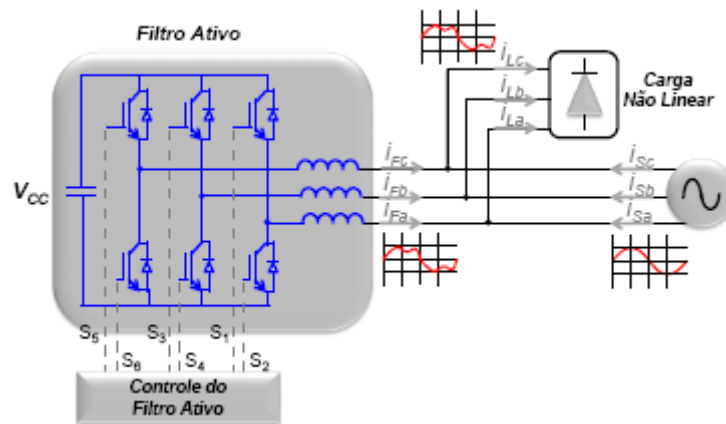
Figura 4: Circuito com um filtro passivo.



Fonte: SILVA (2015).

O filtro ativo consiste basicamente de um inversor controlado composto por interruptores alimentados por uma fonte de tensão contínua  $V_{CC}$ . Na maioria dos casos, se conectado em série com a rede tem como objetivo compensar os harmônicos de tensão e quando conectado em paralelo mitigará os harmônicos de corrente. A Figura 5 mostra o princípio básico de compensação paralela dos harmônicos de corrente de compensação ( $i_F$ ) que se soma à corrente da carga não linear ( $i_L$ ) de forma a tornar senoidal a corrente drenada da fonte ( $i_S$ ) (AKAGI, 2005, 2006).

Figura 5: Princípio básico do filtro ativo.



Fonte: SILVA (2015).

Uma desvantagem do filtro ativo é que seu custo é maior do que o do filtro passivo. Uma vantagem é que filtra várias componentes harmônicas ao mesmo tempo.

## 2.4 Indicadores de deformações harmônicas

Os principais indicadores são: distorção harmônica individual (*DHI*) e distorção harmônica total (*THD* ou *DHT*). Esses indicadores estabelecem uma porcentagem da componente harmônica de ordem  $n$  em relação a componente fundamental.

A distorção harmônica individual (*DHI*) é divisão entre a componente harmônica de ordem  $n$  ( $I_n$ ) pela componente fundamental ( $I_1$ ) e multiplicado por 100, para o resultado ser em porcentagem, conforme a equação (2.5).

$$DHI = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Segundo a norma IEEE Std. 519 o limite máximo de distorção harmônica individual de tensão permitido sob-responsabilidade da concessionária de energia é 5% para uma tensão no PCC menor igual a 1 kV.

A distorção harmônica total (*THD*) é definida pela equação (2.6).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N (I_n)^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.6)$$



Pode-se deduzir que para uma forma de onda que apresente apenas a componente fundamental a distorção harmônica total é zero, ou seja, o *DHT* quantifica a distorção da forma de onda.

Segundo a norma IEEE Std. 519 o limite máximo de distorção harmônica total de tensão permitido sob-responsabilidade da concessionária de energia é 8% para uma tensão no PCC menor igual a 1 kV.

As variáveis das equações (2.5) e (2.6) podem ser tensão ou corrente, as quais são valores eficazes.

#### 2.4.1 Taxa de distorção da demanda

Outro indicador de distorção harmônica é a taxa de distorção da demanda em que é usada para estimar o grau de injeção de correntes harmônicas no sistema elétrico e é expressa pela seguinte equação:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_D} \quad (2.7)$$

onde  $I_D$  é a corrente nominal do circuito.

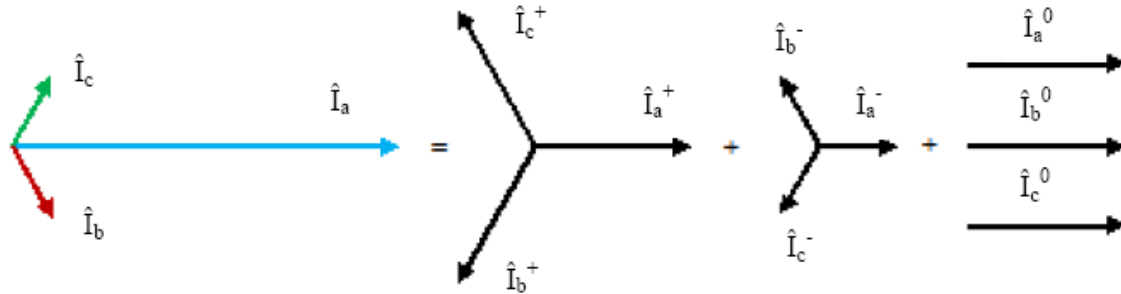
Pode-se observar que quando a componente fundamental ( $I_1$ ) for igual a corrente nominal de circuito ( $I_D$ ) a taxa de distorção da demanda (*TDD*) será igual a distorção harmônica total (*DHT*).

#### 2.4.2 Sequência das harmônicas

O engenheiro Fortescue desenvolveu em 1918 uma técnica em que um sistema trifásico desequilibrado, representado pelos fasores  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$  (mostrados na Figura 6), pode ser representado pela soma de três sistemas equilibrados, em que os fasores equilibrados são denominados de componentes simétricas. Os três sistemas são denominados de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. Na sequência positiva os fasores estão defasados em  $120^\circ$ , eles tem a mesma intensidade e pode-se considerar o sentido da rotação como anti-horário. Já na sequência negativa é trocado a posição de dois fasores e a rotação é no sentido oposto da sequência positiva. E na sequência zero os fasores não estão defasados. A Figura 6 mostra um sistema trifásico

desequilibrado representado por três sistemas equilibrados, sendo de sequência positiva, negativa e zero.

Figura 6: Exemplo de componentes simétricas.



Fonte: NIELSON (2013).

O fasor original do sistema trifásico desequilibrado é o resultado da soma fasorial das componentes de sequência, conforme mostra as equações (2.8), (2.9) e (2.10).

$$\hat{I}_a = \hat{I}_a^+ + \hat{I}_a^- + \hat{I}_a^0 \quad (2.8)$$

$$\hat{I}_b = \hat{I}_b^+ + \hat{I}_b^- + \hat{I}_b^0 \quad (2.9)$$

$$\hat{I}_c = \hat{I}_c^+ + \hat{I}_c^- + \hat{I}_c^0 \quad (2.10)$$

Considerando que o sistema seja trifásico e equilibrado pode-se utilizar a série de Fourier para representar as tensões de fase  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ . As tensões de fase  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ , representam cada, um fasor genérico de um sistema equilibrado.

$$\begin{aligned} v_a(t) = & V_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + V_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2) + V_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) \\ & + V_4 \cos(4\omega_1 t + \varphi_4) + V_5 \cos(5\omega_1 t + \varphi_5) + V_6 \cos(6\omega_1 t + \varphi_6) \\ & + V_7 \cos(7\omega_1 t + \varphi_7) + \dots \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} v_b(t) = & V_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 - 120^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2 + 120^\circ) + V_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) \\ & + V_4 \cos(4\omega_1 t + \varphi_4 - 120^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 t + \varphi_5 + 120^\circ) + V_6 \cos(6\omega_1 t + \varphi_6) \\ & + V_7 \cos(7\omega_1 t + \varphi_7 - 120^\circ) + \dots \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
v_c(t) = & V_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + 120^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2 - 120^\circ) + V_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) \\
& + V_4 \cos(4\omega_1 t + \varphi_4 + 120^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 t + \varphi_5 - 120^\circ) + V_6 \cos(6\omega_1 t + \varphi_6) \\
& + V_7 \cos(7\omega_1 t + \varphi_7 + 120^\circ) + \dots
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Cada componente harmônica é representada por seu valor de pico multiplicado por uma função cossenoidal em que há a frequência angular ( $\omega_1$ ), o tempo ( $t$ ) e o deslocamento angular. Por exemplo, na componente fundamental seu valor de pico é  $V_1$  e o deslocamento angular é  $\varphi_1$ .

Outra observação é que cada componente harmônica apresenta sequência positiva, negativa ou zero. Por exemplo, a componente fundamental têm sequência positiva, a componente de segunda ordem, sequência negativa e a componente de terceira ordem, sequência zero e assim por diante de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Ordem, frequência e sequência da fundamental e dos harmônicos para sistema trifásico equilibrado.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n · 60	—

Fonte: Adaptada de MORENO (2001).

Pode-se observar que a componente fundamental e as harmônicas seguem as seguintes leis de formação para saber qual é sua sequência.

Ordens das harmônicas que apresentam sequência positiva:

$$n = 3k + 1, \text{ com } k = 0, 1, 2, 3, \dots \tag{2.14}$$

Ordens das harmônicas que apresentam sequência negativa:

$$n = 3k - 1, \text{ com } k = 1, 2, 3, \dots \tag{2.15}$$

Ordens das harmônicas que apresentam sequência zero:

$$n = 3k, \text{ com } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

## 2.5 Norma sobre harmônicos (IEEE 519)

O IEEE (Institute of Electrical and Eletronics Engineers) apresenta o documento IEEE *Standard 519 – Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (IEEE.STD.519, 2014) que não é efetivamente uma norma mandatária. Representa somente recomendações técnicas importantes que auxiliam estudos relativos aos harmônicos em sistemas de potência. Os limites de distorção harmônica apresentados são relativos aos valores medidos no ponto de conexão comum (PCC) do consumidor à rede elétrica (MORAIS, 2014).

A norma visa estabelecer os limites padrões de distorção harmônica no PCC, dividindo as responsabilidades entre a concessionária elétrica e o consumidor (SANTOSO, 2002). Na Tabela 3 são mostrados os limites máximos permitidos de distorção harmônica individual e total de tensão nos níveis de tensão no PCC sob-responsabilidade da concessionária de energia elétrica.

Tabela 3: Limites de distorção harmônica de tensão sob-responsabilidade da concessionária de energia.

Tensão no PCC	Distorção Individual (%)	DHT (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

Fonte: Adaptada de IEEE Std 519 (2014).

Pode-se observar nessa Tabela 3 que quanto maior a tensão no PCC menor é o limite permitido de distorção harmônica individual e distorção harmônica total.

A Tabela 4 mostra outras informações importantes que são relativas à distorção harmônica de corrente, as quais se aplicam aos usuários conectados ao sistema elétrico. Esta Tabela mostra a divisão da corrente de curto circuito máxima no PCC,  $I_{SC}$ , pela corrente máxima solicitada pela carga na frequência fundamental,  $I_L$ . Mostra também  $n$ , que é a ordem das harmônicas ímpares e o TDD o qual é a taxa de distorção da demanda.

Tabela 4: Limites de distorção harmônica de corrente (para valores de tensão entre 120 V a 69 kV eficaz) e TDD.

<b>Distorção Harmônica Máxima da corrente em percentagem de <math>I_L</math></b>						
<b>n: Ordem das Harmônicas ímpares</b>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
<b>As harmônicas pares são limitadas à 25% do limite da harmônica ímpar imediatamente superior</b>						
<b>Não é permitido componente contínua (retificador de meia onda por exemplo)</b>						
<b>*Todos os equipamentos de geração de energia elétrica são limitados pelos valores desta linha, independente de sua capacidade de curto circuito <math>I_{SC}/I_L</math></b>						
<b><math>I_{SC}</math>: Corrente de curto circuito máxima no PCC;</b>						
<b><math>I_L</math>: Corrente máxima solicitada pela carga, na frequência fundamental, no PCC</b>						

Fonte: Adaptada de IEEE Std 519 (2014).

Pode-se observar na Tabela 4 que quanto maior a divisão,  $I_{SC}/I_L$ , maior será o limite permitido de distorção harmônica de corrente e também maior a taxa de distorção da demanda. Isso ocorre porque quando a corrente de curto circuito tem um valor alto, então a rede é forte.

### **3. TRANSFORMADORES: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E TÉCNICAS**

O transformador é um equipamento estático, de fácil construção, e constituído por um núcleo e dois ou mais enrolamentos. O núcleo geralmente é feito com material ferromagnético, por onde circula um fluxo que enlaça os enrolamentos. Os enrolamentos são denominados de primário e secundário, correspondendo a um circuito indutor e um circuito induzido.

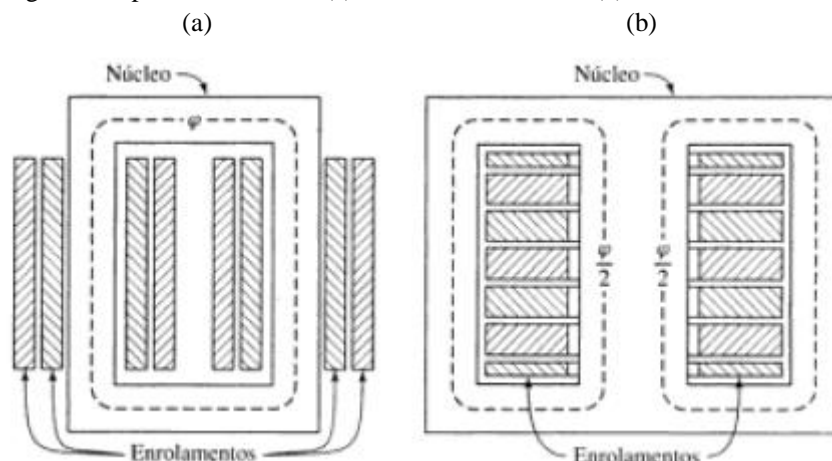
O transformador não converte uma forma de energia em outra forma de energia, por exemplo, não transforma energia mecânica em elétrica. Ele troca energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos. Uma das suas principais funções é possibilitar que os valores de tensão disponíveis na rede elétrica sejam adequados, dependendo dos níveis do sistema elétrico, seja geração, transmissão ou distribuição.

. O transformador funciona como abaixador ou como elevador de tensão. Quando é abaixador no primário é alta tensão e o secundário é de baixa tensão. Quando é elevador no primário é baixa tensão e o secundário é de alta tensão. Ele atua também isolando circuitos, por exemplo, isola eletricamente os enrolamentos primário e secundário, sendo assim isolando o lado de alta do lado de baixa. Pode-se utilizá-lo também entre uma fonte e uma carga, tendo como objetivo o casamento de impedância, como consequência aumentar a potência transferida para a carga.

#### **3.1 Características construtivas do transformador**

Existem dois tipos de construção de transformador, o de núcleo envolvido e o de núcleo envolvente. A Figura 7 mostra os dois tipos de núcleo. O de núcleo envolvido os enrolamentos estão dispostos nas duas pernas de um núcleo magnético retangular e no tipo de núcleo envolvente os enrolamentos envolvem uma única perna do núcleo, sendo essa a perna central de um núcleo de três pernas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Figura 7: Tipos de núcleo em (a) é núcleo envolvido e, (b) é núcleo envolvente.

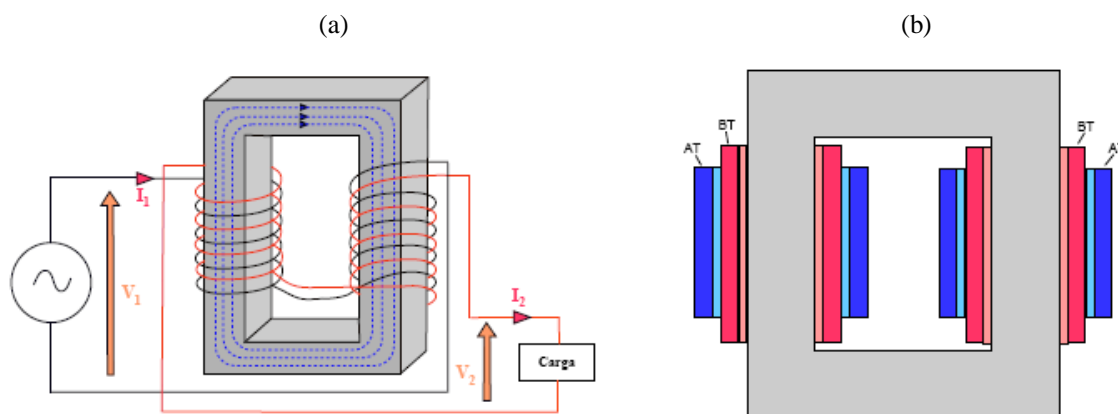


Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

Nos dois tipos de construções o fluxo mútuo circula em sua maioria pelo núcleo, deste modo enlaça os enrolamentos. Além do fluxo mútuo gerado, também é criado um fluxo em cada enrolamento, denominado fluxo disperso, o qual circula no próprio enrolamento. O fluxo disperso tem um valor baixo comparado com o fluxo total (resultado da interação do fluxo mútuo com o fluxo disperso), porém influência no desempenho do transformador.

Nos transformadores de núcleo envolvido os enrolamentos do primário (AT) e secundário (BT) estão ambos contidos nas duas pernas do núcleo, sendo que as bobinas são dispostas com o mesmo centro. As Figuras 8 mostra o transformador com núcleo envolvido.

Figura 8: Transformador com núcleo envolvido, em (a) montagem do transformador e, (b) esquema em corte.

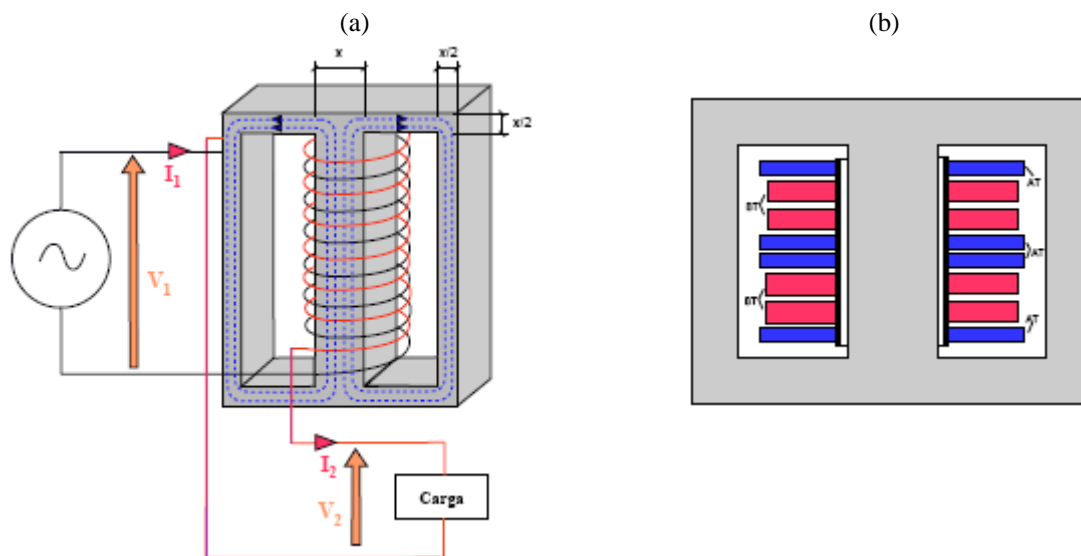


Fonte: Aguiar (2007).

No transformador de núcleo envolvente os enrolamentos primário e secundário podem ser colocados um acima do outro, ou pode-se alternar, ou seja, uma bobina do

primário e outra do secundário. O núcleo possui três pernas, onde os enrolamentos ficam localizados na perna central. O fluxo total circula na perna central, o qual sua metade vai para a perna da esquerda e a outra metade para a perna da direita. A seção da perna central é o dobro de qualquer uma das pernas laterais. A Figura 9 mostra o transformador com núcleo envolvente.

Figura 9: Transformador com núcleo envolvente, em (a) montagem do transformador e, (b) esquema em corte.



Fonte: Aguiar (2007).

As Figuras 8 e 9 mostram como são na realidade os enrolamentos do transformador, os quais se alternam em uma mesma perna do núcleo.

### 3.2 Perdas em transformadores

As perdas são dissipações indesejadas de energia que são perdidas no processo de transferência de potência fazendo com que a potência de saída do transformador seja diferente da potência de entrada, diminuindo o rendimento do mesmo (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006). Quando o transformador é submetido a uma tensão senoidal vão existir perdas no núcleo (perda a vazio) e nos enrolamentos (perda de carga), a consequência dessas perdas é o aquecimento do transformador.

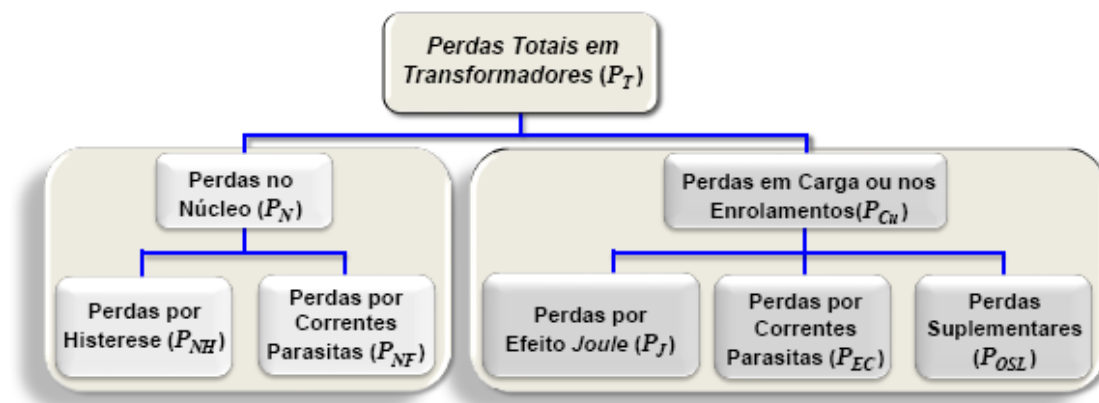
As perdas no núcleo podem ser divididas em perdas por histerese e perdas por correntes parasitas. As perdas por histerese estão relacionadas ao movimento dos domínios magnéticos do material que é feito o núcleo. As perdas por correntes parasitas são criadas pela circulação do campo magnético no núcleo. Para diminuir as perdas por



correntes parasitas geralmente é construído o núcleo com várias lâminas, uma em cima da outra, onde a corrente parasita circula nas lâminas do núcleo.

As perdas nos enrolamentos podem ser divididas em perdas devido às resistências dos enrolamentos e perdas suplementares (perdas em peças estruturais, como por exemplo, em parafusos e junções). As perdas suplementares são devido ao fluxo disperso. Na seção 3.8 apresenta-se a IEEE.STD.C57110 (*Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*) e são discutidas equações que quantificam as perdas de carga. A Figura 10 mostra um diagrama que ilustra as perdas no transformador.

Figura 10: Diagrama de perdas no transformador.



Fonte: SILVA (2015).

Em condições não senoidais as perdas no núcleo são maiores, porque a corrente de excitação tende a aumentar. Pode ocorrer à criação de correntes parasitas deformadas, surge mais fluxo disperso e também ocasionar ruídos no transformador. As correntes harmônicas são responsáveis pelo aumento das perdas nos enrolamentos. E as tensões harmônicas são responsáveis pelo aumento das perdas no núcleo. As perdas aumentam à medida que a frequência aumenta.

### 3.3 Materiais isolantes

Os primeiros transformadores tipos a seco surgiram por volta de 1880. O transformador a seco com classe de isolamento B foi introduzido em 1930, satisfazendo a exigência para transformadores em recinto fechado e resistente ao fogo (HARLOW, 2004).

Por volta de 1950 isolantes com isolação H, a qual consiste de materiais inorgânicos, como porcelana, mica e amianto unido ou saturado através de resinas de silicone, foram usados pela primeira vez. No entanto, foi na década de 90 que esse tipo de transformador ganhou espaço no mercado (HARLOW, 2004).

Os materiais isolantes fazem parte da construção dos transformadores e eles diminuem a vida útil com o aumento da temperatura, assim diminuindo a vida útil do transformador. A Tabela 5 mostra a classe do isolamento, o tipo de isolante e também mostra a temperatura máxima que o isolante pode suportar sem sofrer danos.

Tabela 5: Características dos isolantes.

<b>Classe de Isolamento</b>	<b>Tipo de Isolante</b>	<b>Temperatura Final (°C) Característica **</b>
Y*	*Materiais fibrosos a base de celulose ou seda, não imersos em líquidos isolantes;	90
A*	*Materiais fibrosos a base de celulose ou seda impregnadas em líquidos isolantes;	105
E*	*Fibras orgânicas sintéticas e outros;	120
B	Materiais à base de poliéster e polimídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes;	130
F	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxi;	155
H	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxi;	180
C	Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante.	>180

\*Estes tipos de materiais não são utilizados atualmente;

\*\*Como temperatura característica entende-se o limite absoluto superior de temperatura na qual a isolação pode desempenhar por um período suficientemente longo sua função.

Fonte: Adaptada de NBR 7034 (1981).

Os materiais isolantes ficam localizados em volta de cada enrolamento do transformador. Esses materiais possuem alta resistência à corrente elétrica.

A classe de isolamento que é utilizada geralmente no transformador a seco, aplicado no estudo apresentado neste trabalho é a classe F.

### **3.4 Fundamentos físicos para o funcionamento dos transformadores**

Os princípios físicos de funcionamento dos transformadores são baseados basicamente na lei de Ampere, lei de Faraday e lei de Lenz.

Segundo a lei de Ampere todo condutor que pelo qual circula uma corrente, gera um campo magnético. Uma das maneiras de aumentar a intensidade desse campo é dá voltas no condutor. No transformador isso é feito com os enrolamentos primário e secundário, onde as voltas são chamadas de espiras. Quanto mais espira maior o valor do campo magnético. E o fluxo magnético produzido concatena ambos os enrolamentos. A seguir é mostrada a equação (3.1) a qual é resultante da lei de Ampere aplicada a um circuito magnético, com um enrolamento:

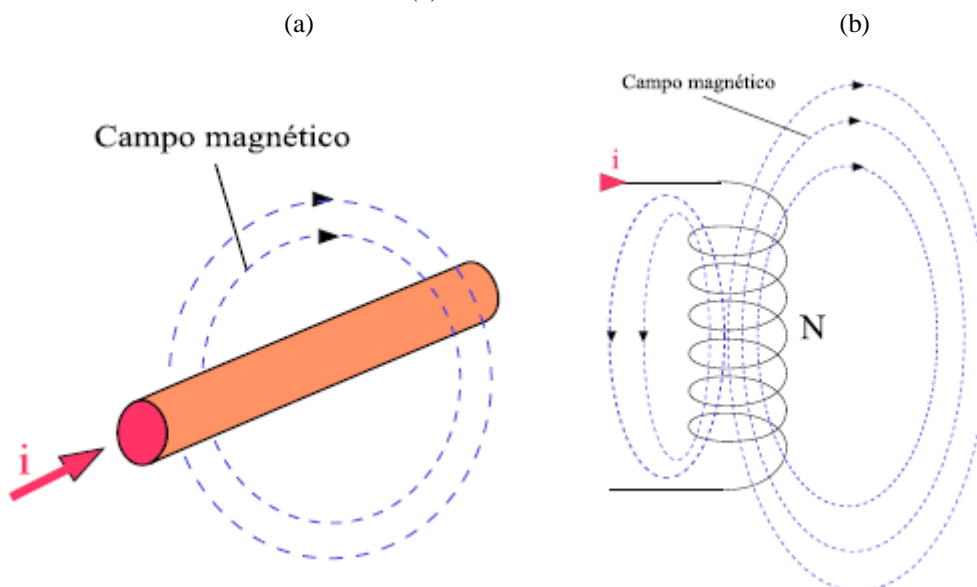
$$H \cdot l = N \cdot I \quad (3.1)$$

onde  $H$  é o campo magnético,  $l$  é o comprimento médio do núcleo,  $N$  o número de espiras e  $I$  é a corrente.

Logo, uma maneira de aumentar a intensidade do campo magnético é aumentar a corrente.

A Figura 11 ilustra a lei de Ampere, onde há dois condutores: em (a) o condutor é retilíneo e em (b) foi dado voltas no condutor. Em ambos condutores circula uma corrente, então é gerado um campo magnético. Pode-se observar na figura que quanto maior a quantidade de voltas no condutor, maior à intensidade do campo magnético.

Figura 11: Corrente circulando em um condutor e criando um campo magnético, em (a) o condutor é retilíneo e em (b) foi dado voltas no condutor.



Fonte: Aguiar (2007).

Outra equação que pode ser escrita é que a densidade de fluxo magnético  $B$  é diretamente proporcional à permeabilidade magnética e do campo magnético  $H$ , como mostra a equação (3.2):

$$B = \mu \cdot H \quad (3.2)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética, a qual caracteriza o material magnético.

Pode-se definir também uma equação para o fluxo magnético  $\varphi$  sendo diretamente proporcional a densidade de campo magnético  $B$  e a área  $A$ , a qual o fluxo atravessa. Então se tem a equação (3.3):

$$\varphi = B \cdot A \quad (3.3)$$

De acordo com lei de Faraday de 1831, caso haja uma região em que há variação do campo magnético no decorrer do tempo e que seja inserido um condutor nessa região, será criada uma tensão induzida  $e$  nos terminais do condutor, sendo diretamente proporcional a variação do campo magnético. Se forem dadas voltas no condutor, a tensão induzida será diretamente proporcional à quantidade de espiras  $N$ . Então se tem a equação (3.4):

$$e = N \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.4)$$

A lei de Lenz de 1834, diz que podem existir dois casos referentes à variação do fluxo, os quais são:

$$\frac{d\varphi}{dt} > 0 \quad (3.5)$$

e

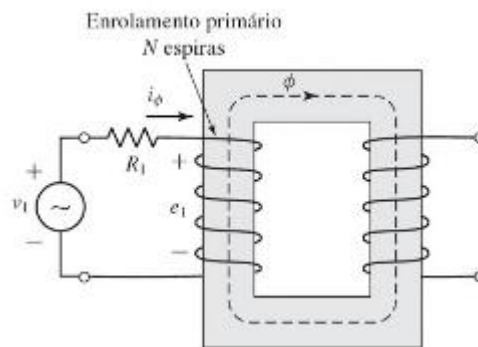
$$\frac{d\varphi}{dt} < 0 \quad (3.6)$$

No primeiro caso tem-se de acordo com a equação (3.5), que ocorre quando o fluxo cresce no decorrer do tempo. Já o segundo caso de acordo com a equação (3.6), que ocorre quando o fluxo decresce no decorrer do tempo. Nessas duas situações a polaridade da tensão e o sentido da corrente se alteram em cada caso.

### 3.5 Transformador a vazio

A Figura 12 mostra uma representação de um transformador sem carga, em que é conectada uma fonte de tensão alternada no enrolamento primário, que criará uma corrente nesse enrolamento, chamada de corrente de excitação ( $i_\phi$ ), que produzirá um fluxo alternado que circulará pelo núcleo, o qual é chamado de fluxo mútuo. É visto também que os enrolamentos primário e secundário estão em pernas diferentes. Geralmente é feito isso para simplificar a análise, mas que na realidade isso não acontece, o que ocorre é que os enrolamentos se alternam (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

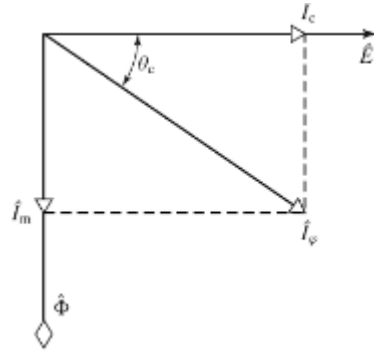
Figura 12: Transformador sem carga.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

A forma de onda da corrente de excitação pode ser obtida através da análise da curva de histerese. A corrente de excitação apresenta na composição de sua forma de onda a componente fundamental e outras componentes harmônicas ímpares, onde a principal é a de terceira ordem. A componente fundamental da corrente de excitação ( $\hat{I}_\phi$ ) pode ser decomposta pela corrente de perdas no núcleo ( $\hat{I}_c$ ), no eixo horizontal, a qual está em fase com o valor eficaz da FCEM (força contraeletromotriz) induzida no primário ( $\hat{E}_1$ ), também pode ser decomposta pela corrente de magnetização ( $\hat{I}_m$ ), no eixo vertical, que está em fase com o valor eficaz do fluxo ( $\hat{\Phi}$ ) e atrasada  $90^\circ$  da corrente de perdas no núcleo (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). A Figura 13 mostra o diagrama fasorial.

Figura 13: Diagrama fasorial na condição a vazio.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

Em geral a corrente de excitação é pequena comparada com a corrente de plena carga, principalmente em transformadores de grande porte, fazendo com que ela seja desprezada em alguns casos.

Analisando o circuito da Figura 12, o fluxo mútuo gera uma tensão induzida ou FEM ( $e_1$ ) no enrolamento primário equivalente a:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.7)$$

Sendo  $\lambda_1$  o fluxo concatenado do enrolamento primário,  $\phi$  o fluxo mútuo enlaçando os enrolamentos e  $N_1$  o número de espiras do enrolamento primário.

A unidade de medida da FEM é volts caso a unidade de medida do fluxo mútuo seja weber.

É visto na Figura 12 que é aplicada uma tensão ( $v_1$ ) na entrada, e que ocorre uma queda de tensão devido à resistência do enrolamento primário ( $R_1$ ), então se pode definir a seguinte expressão para  $e_1$ :

$$e_1 = v_1 - R_1 i_\phi \quad (3.8)$$

ou,

$$v_1 = R_1 i_\phi + e_1 \quad (3.9)$$

É importante ressaltar que está sendo desprezado nessas duas equações anteriores o fluxo disperso no primário, pois ele representa uma parcela pequena do fluxo total, e se ele fosse considerado teria mais um fator somado a FEM ( $e_1$ ).

Geralmente nos transformadores de grande porte, a queda de tensão a vazio na resistência do primário tem um valor baixo, então a tensão na entrada ( $v_1$ ) tem um valor

parecido com a FEM ( $e_1$ ). Além disso, as formas de onda de tensão e fluxo são quase senoidais (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). O fluxo instantâneo  $\varphi$  pode ser escrito como:

$$\varphi = \Phi_{max} \text{sen } \omega t \quad (3.10)$$

assim a FEM ( $e_1$ ) será:

$$e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} = \omega N_1 \Phi_{max} \text{cos } \omega t \quad (3.11)$$

Sendo  $\Phi_{max}$  o valor máximo do fluxo e  $\omega$  a frequência angular ( $\omega = 2\pi f$ ), onde  $f$  é a frequência dada em Hz. A tensão induzida  $e_1$  está adiantada  $90^\circ$  em relação ao fluxo. A medida RMS da tensão induzida  $e_1$  consiste em:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi_{max} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_{max} \quad (3.12)$$

Considerando que não há queda de tensão devido à resistência,  $R_1$ , ou seja, a tensão aplicada na entrada seria igual à FCEM, desprezando também a indutância do fluxo disperso, e sabendo que o fluxo mútuo é senoidal, seu valor máximo ( $\Phi_{max}$ ) será:

$$\Phi_{max} = \frac{V_1}{\sqrt{2} \pi f N_1} \quad (3.13)$$

onde  $V_1$  é a tensão aplicada na entrada em RMS.

Pela equação (3.13) anterior é visto que o fluxo mútuo depende da tensão aplicada na entrada, da frequência e do número de espiras do primário.

No caso em que o fluxo é senoidal, a corrente de excitação não será senoidal, portanto apresenta deformação. A diferença entre a forma de onda da corrente de excitação e do fluxo é mais visível quando existe um circuito magnético fechado, como é o caso do transformador (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

### 3.6 Transformador ideal conectado a uma carga

Considerando um transformador com  $N_1$  espiras no primário e  $N_2$  espiras no secundário. E que seja desconsiderado as resistências dos enrolamentos. Também

desprezando o fluxo disperso, ou seja, a permeabilidade do núcleo com um valor alto, fazendo com que o fluxo esteja confinado apenas no núcleo, enlaçando por completo os enrolamentos. Depois de fazer essas considerações no transformador, ele é chamado de transformador ideal (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Como é desprezada a resistência no enrolamento primário, não há queda de tensão, então a tensão aplicada na entrada  $v_1$  é igual à FCEM  $e_1$ . Portanto tem-se:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.14)$$

No enrolamento secundário também é desconsiderado sua resistência, portanto a tensão na carga é igual à FEM no enrolamento. Então se tem:

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.15)$$

É visto em (3.15) que é necessário ocorrer à variação do fluxo mútuo para induzir uma tensão no enrolamento secundário. Então se pode perceber que esse equipamento transfere energia do primário para o secundário através de indução eletromagnética.

Dividindo a equação (3.14) pela equação (3.15), é obtida a seguinte relação:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3.16)$$

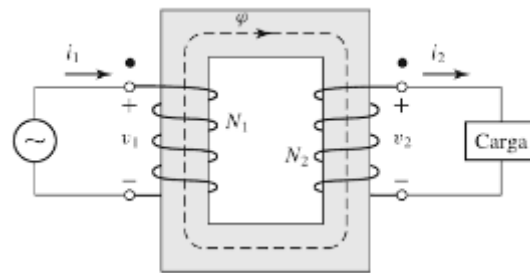
onde  $a$  é a relação de espiras ou de transformação do transformador.

Pode-se deduzir nessa relação que a tensão em ambos os enrolamentos é diretamente proporcional à quantidade de espiras do seu respectivo enrolamento.

Supondo que seja conectada uma carga no secundário a qual consome uma corrente  $i_2$ . Essa corrente criará uma força magnetomotriz (FMM) no secundário com valor  $N_2 i_2$ . O fluxo estabelecido no núcleo devido à tensão aplicada, não modifica seu valor com a conexão da carga no secundário (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). A Figura 14 mostra o transformador ideal conectado a uma carga.



Figura 14: Transformador ideal conectado a uma carga.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

É definido que no secundário a corrente é positiva quando ela está saindo do enrolamento. A corrente positiva do enrolamento secundário gera uma FMM oposta à produzida pela corrente positiva do enrolamento primário, o que provoca o cancelamento da FMM resultante no núcleo (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). Então se tem a seguinte equação:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (3.17)$$

ou,

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (3.18)$$

Pode-se concluir que a FMM no primário é igual à FMM no secundário, e que caso haja alteração da FMM no secundário provocada pela carga vai haver também uma alteração na FMM do primário (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Manipulando a equação (3.18) é obtido:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.19)$$

Na equação (3.19), observa-se que as correntes nos enrolamentos são inversamente proporcionais ao número de espiras do respectivo enrolamento.

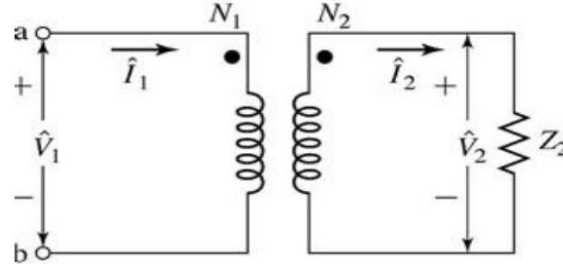
Manipulando as equações (3.16) e (3.19) tem-se:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (3.20)$$

Dessa equação (3.20) observa-se que a potência no primário é igual à potência no secundário. E que nessa situação a potência ativa é igual à potência aparente, pois não estão sendo consideradas as perdas.

Supondo que seja conectada uma impedância  $Z_2$  no secundário do transformador, conforme a Figura 15, e que tenha as seguintes condições: o transformador é considerado sendo ideal e que a tensão aplicada no primário seja senoidal.

Figura 15: Circuito do transformador ideal com uma impedância conectada no secundário.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

As tensões  $\hat{V}_1$  e  $\hat{V}_2$  estão em fase, do mesmo modo que as correntes  $\hat{I}_1$  e  $\hat{I}_2$  também estão em fase.

A partir do circuito da Figura 15 pode-se obter mais uma relação envolvendo transformadores. Isolando-se os fasores de tensão e corrente do primário e secundário, a partir das equações (3.16) e (3.19), então obtém-se:

$$\hat{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \hat{V}_2 \quad \text{ou} \quad \hat{V}_2 = \frac{N_2}{N_1} \hat{V}_1 \quad (3.21)$$

e,

$$\hat{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2 \quad \text{ou} \quad \hat{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \hat{I}_1 \quad (3.22)$$

Dividindo a equação (3.21) pela equação (3.22):

$$\frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} \quad (3.23)$$

Sabe-se que a impedância complexa da carga  $Z_2$  é dada por:

$$Z_2 = \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} \quad (3.24)$$

onde  $\hat{V}_2$  e  $\hat{I}_2$  são respectivamente tensão e corrente no secundário.

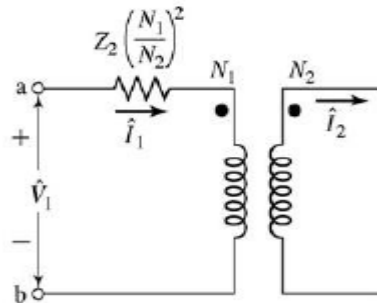
Associando a equação (3.23) com a equação (3.24) é obtida a impedância  $Z_1$ :

$$Z_1 = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (3.25)$$

onde  $Z_1$  é a impedância da carga refletida no primário.

Então observa-se que a impedância  $Z_2$  pode ser refletida para o primário, como pode ser visto na Figura 16 e de acordo com a equação (3.25).

Figura 16: Impedância conectada no secundário do transformador refletida no primário.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

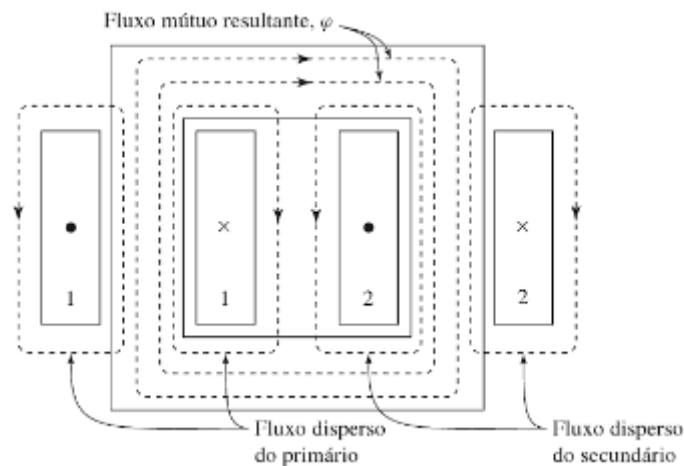
Analisando a equação (3.25) pode-se notar que a impedância da carga refletida no primário é diretamente proporcional ao quadrado da relação de espiras.

### 3.7 Etapas para elaboração do circuito do transformador real

Em um transformador real, a análise requer outras variáveis, comparado com o transformador ideal. Na sua análise, são considerados as resistências dos enrolamentos e o fluxo disperso, ou seja, a permeabilidade do núcleo é finita.

Primeiramente será feita a análise do enrolamento primário. O fluxo total que concatena esse enrolamento é composto pelo fluxo mútuo resultante e pelo fluxo disperso o qual enlaça o próprio enrolamento. O fluxo mútuo resultante é consequência da interação das correntes do primário e secundário. Esse fluxo circula no núcleo, enlaçando os dois enrolamentos (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). A Figura 17 mostra a representação de um transformador com os fluxos mútuo e disperso.

Figura 17: Representação de um transformador com os fluxos mútuo e disperso.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

No enrolamento primário o fluxo disperso que circula em sua maioria pelo o ar, cria uma tensão que se adiciona a tensão gerada pelo fluxo mútuo.

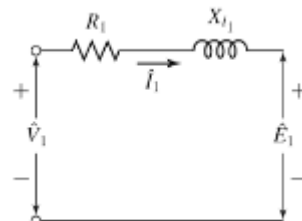
O enrolamento primário é representado por uma resistência de primário ( $R_1$ ) e uma reatância de dispersão de primário ( $X_{l_1}$ ). A resistência é responsável por uma queda de tensão no enrolamento e, a reatância de dispersão representa o fluxo disperso no primário. Essa reatância é igual a:

$$X_{l_1} = 2\pi f L_{l_1} \quad (3.26)$$

onde  $f$  é a frequência em Hz e  $L_{l_1}$  é a indutância de dispersão do primário.

A Figura 18 mostra o circuito representando o enrolamento primário, é visto que a tensão aplicada é igual à queda devido à resistência  $R_1 \hat{I}_1$  somada à queda referente à reatância de dispersão  $j\hat{I}_1 X_{l_1}$  mais a FEM  $\hat{E}_1$  induzida pelo fluxo mútuo resultante (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Figura 18: Circuito representando o enrolamento primário.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

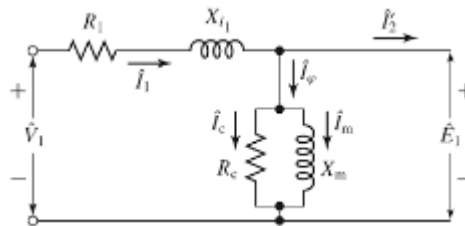
O fluxo mútuo resultante enlaça os dois enrolamentos, esse fluxo é resultado da interação das FMMs do primário e secundário. A FMM produzida pela corrente do primário tem as funções de criar o fluxo mútuo resultante e compensar a FMM gerada pela corrente do secundário que tende a desmagnetizar o núcleo. A corrente do primário magnetiza o núcleo e através dela é criada a corrente de carga do secundário. Então se pode dividir a corrente do primário em duas componentes sendo uma componente de excitação e uma componente de carga (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

A Figura 19 mostra o circuito representando o enrolamento primário e o núcleo. O núcleo é representado pela resistência de perdas no núcleo  $R_c$  e pela reatância de magnetização  $X_m$ , os quais estão em paralelo. A reatância de magnetização é dada por:

$$X_m = 2\pi f L_m \quad (3.27)$$

onde  $L_m$  é a indutância de magnetização.

Figura 19: Circuito representando o enrolamento primário e o núcleo do transformador.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

No circuito da Figura 19 também é mostrada a corrente  $I_2'$ , a qual é uma parte da corrente do primário que é responsável por produzir uma FMM igual à produzida pela corrente do secundário.

Nesse circuito as perdas no núcleo são dadas por:

$$P = \frac{E_1^2}{R_c} \quad (3.28)$$

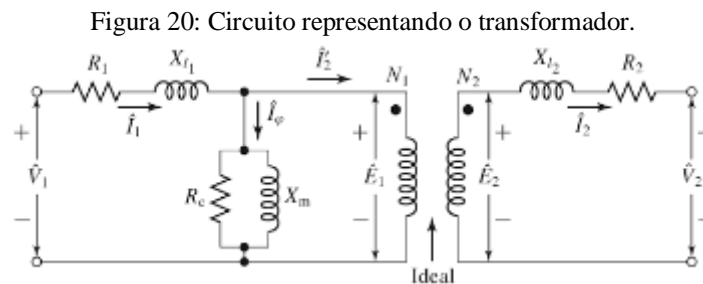
Se  $R_c$  tiver um valor fixo a potência é diretamente proporcional a  $E_1^2$ .

A resistência  $R_c$  também é denominada como resistência de magnetização, a qual em conjunto com  $X_m$  constitui o ramo de excitação. As duas variáveis  $R_c$  e  $X_m$

formam juntos o que é chamado de impedância de magnetização  $Z_\varphi$ . Essas duas variáveis são obtidas através dos valores nominais da tensão e frequência, mesmo que ocorram alterações nesses valores nominais considera-se que  $R_c$  e  $X_m$  permanecem sendo valores fixos.  $R_c$  representa as perdas no núcleo.

Em uma análise rigorosa, a reatância de magnetização  $X_m$  varia com a saturação do núcleo, mas muitas vezes é considerado que  $X_m$  é constante. Da mesma forma, é considerado que a corrente de magnetização não depende da frequência sendo ela diretamente proporcional ao fluxo do núcleo.

Conforme Figura 20, adiciona-se na representação do circuito do transformador o enrolamento secundário. Esse enrolamento é representado por uma reatância de dispersão do secundário  $X_{l_2}$  e uma resistência de secundário  $R_2$ . As resistências do primário e secundário  $R_1$  e  $R_2$  representam as perdas na resistência dos enrolamentos ou perdas por efeito Joule. E as reatâncias  $X_{l_1}$  e  $X_{l_2}$  representam o fluxo disperso.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

Como já frisado, que o fluxo mútuo resultante enlaça os dois enrolamentos. Então pode-se deduzir que esse fluxo cria uma FEM  $\widehat{E}_2$  no enrolamento secundário. Daí tem-se a relação da equação (3.29), a qual relaciona o número de espiras do primário e secundário, sendo respectivamente  $N_1$  e  $N_2$ , com as FEMs de ambos os enrolamentos.

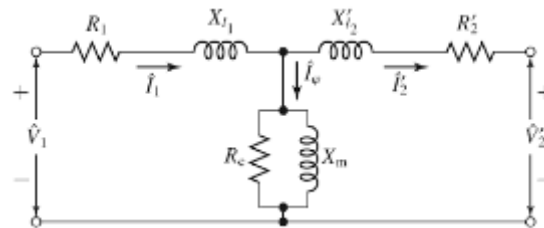
$$\frac{\widehat{E}_1}{\widehat{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.29)$$

Pode-se observar, a partir de (3.29), que a FEM de cada enrolamento é diretamente proporcional ao número de espiras do respectivo enrolamento. Essa conclusão foi igual à deduzida para um transformador ideal. A diferença é que no transformador real a tensão nos enrolamentos não é igual à tensão dos terminais.

Na Figura 20, observa-se que o transformador real é o transformador ideal adicionado algumas impedâncias, sendo a impedância de magnetização, impedância de dispersão do primário e secundário.

As variáveis do secundário são refletidas para o primário, conforme Figura 21. Este circuito é denominado circuito equivalente T de um transformador.

Figura 21: Circuito equivalente T de um transformador.



Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, (2014).

Para isso têm-se as seguintes relações:

$$X'_{l_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{l_2} \quad (3.30)$$

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad (3.31)$$

$$V'_2 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (3.32)$$

### 3.8 Norma sobre transformadores (IEEE C57.110)

Em março de 1980 ocorreu o encontro do comitê de transformadores do IEEE, no qual foi discutido o efeito de correntes não senoidais no aumento da temperatura em transformadores. Para sistemas industriais a corrente não senoidal é uma porcentagem crescente em todas as indústrias. Foi sugerida então, a criação de um guia para auxiliar a capacidade de carga baseado na quantidade de distorção. Em maio de 1980 um comitê de estudos foi formado, tendo sua primeira reunião em outubro de 1980 (PIERCE, 1996). Depois de vários ajustes, em 1986 a norma C57.110 foi aceita pelo IEEE.

A norma IEEE Std C57.110 - *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents* (IEEE Std

C57.110, 1998) relata sobre os problemas causados pelos harmônicos em transformadores.

Essa norma afirma que a presença de harmônicos causam perdas adicionais no núcleo e nos enrolamentos do transformador em consequência aumenta a temperatura do mesmo. Ela dá mais ênfase as perdas nos enrolamentos.

### 3.8.1 Perdas sob condição senoidal nos enrolamentos do transformador

A norma IEEE Std C57.110, classifica as perdas no transformador como perda em carga (nas impedâncias dos enrolamentos) e a perda a vazio (no núcleo). Em que a perda total,  $P_T$ , é a soma da perda em carga ( $P_{Cu}$ ) com a perda a vazio ( $P_N$ ), conforme equação (3.33).

$$P_T = P_N + P_{Cu} \quad (3.33)$$

As perdas em carga ou nos enrolamentos do transformador submetido à corrente senoidal, em que a unidade de medida é watts, é obtida pela expressão (3.34).

$$P_{Cu} = P_J + P_{EC} + P_{OSL} \quad (3.34)$$

onde  $P_J$  é a perda ôhmica,  $P_{EC}$  é a perda por dispersão nos enrolamentos (perda por corrente parasita) e  $P_{OSL}$  é a perda por dispersão em outros componentes (peças estruturais, como por exemplo: parafusos, junções, suporte e outras partes estruturais).

As perdas ôhmicas,  $P_J$ , é igual a:

$$P_J = R_p I_p^2 + R_s I_s^2 \quad (3.35)$$

onde  $R_p$  e  $R_s$  são, respectivamente, a resistência do enrolamento primário e secundário;  $I_p$  e  $I_s$  são, respectivamente, a corrente rms do primário e secundário na frequência fundamental.



### 3.8.2 Perdas sob condição não senoidal nos enrolamentos do transformador

A norma enfatiza as perdas nos transformadores devido aos harmônicos. Para condição não senoidal a perda em carga de um transformador é dada por:

$$P_{Cun} = P_{Jn} + P_{ECn} + P_{OSLn} \quad (3.36)$$

onde  $P_{Cun}$  são as perdas em carga para condição não senoidal;  $P_{Jn}$  são as perdas ôhmicas para condição não senoidal;  $P_{ECn}$  são as perdas por dispersão nos enrolamentos (perda por corrente parasita) para condição não senoidal e  $P_{OSLn}$  são as perdas por dispersão em outros componentes para condição não senoidal ou perdas suplementares.

As perdas ôhmicas nos enrolamentos do transformador dependem da resistência e de sua corrente de carga. Sendo assim, se o valor eficaz da corrente aumenta devido às componentes harmônicas, essas perdas sofrerão um aumento correspondente (IEEE. STD. C57110, 1998), como mostra a equação a seguir:

$$P_{Jn} = P_{Jn}(p) + P_{Jn}(s) = \sum_{n=1}^{n=\infty} R_p I_n^2(p) + \sum_{n=1}^{n=\infty} R_s I_n^2(s) \quad (3.37)$$

onde  $P_{Jn}(p)$  e  $P_{Jn}(s)$  são respectivamente, as perdas ôhmicas no enrolamento primário e no enrolamento secundário do transformador para a condição não linear;  $I_n(p)$  e  $I_n(s)$  são, respectivamente, o valor eficaz da corrente de ordem  $n$  do enrolamento primário e do enrolamento secundário.

Para condições não senoidais a perda por correntes parasitas nos enrolamentos do transformador,  $P_{ECn}$ , em watt (W), é igual a:

$$P_{ECn} = P_{EC-o} \times \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \left( \frac{I_n}{I} \right)^2 n^2 \quad (3.38)$$

onde  $P_{EC-o}$  é a perda (W) por correntes parasitas nos enrolamentos para a corrente medida na frequência nominal;  $n$  é a ordem harmônica;  $n_{max}$  é a maior ordem harmônica;  $I$  é a corrente rms de carga não linear.

As perdas por correntes parasitas,  $P_{ECn}$ , sob condição não senoidal são aproximadamente proporcionais ao quadrado da frequência e também ao quadrado da corrente de carga. De acordo com a norma IEEE Std C57.110, nos transformadores a seco 67% das perdas por dispersão acontece nos enrolamentos as quais são perdas por correntes parasitas ou Foucault. E que essas perdas se distribuem de forma não uniforme, também é observado que as perdas são maiores na região do ponto mais quente.

O valor rms da corrente de carga não senoidal é dado por:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2} \quad (3.39)$$

Substituindo a equação (3.39) na equação (3.38) a  $P_{ECn}$  pode ser obtida em termos de correntes harmônicas:

$$P_{ECn} = P_{EC-O} \times \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2 n^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2} \quad (3.40)$$

A Recomendação IEEE Std C57.110 define um valor usado para determinar o fator de proporcionalidade aplicado às perdas por correntes parasitas nos enrolamentos ocasionadas por cargas não lineares, o fator de perdas harmônicas ( $F_{HL}$ ). O número pode ser utilizado para determinar a capacidade de um transformador suprir a potência da carga. O  $F_{HL}$  é definido como sendo a razão entre  $P_{ECn}$  e  $P_{EC-O}$ , de acordo como é mostrado na equação (3.41).

$$F_{HL} = \frac{P_{ECn}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2 n^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2} \quad (3.41)$$

Se o  $F_{HL}$  tiver um valor alto as perdas por correntes parasitas devido aos harmônicos é alta. Os valores de  $F_{HL}$  são parecidos com os valores do *Fator K*.

Existe uma relação entre o  $F_{HL}$  e o *Fator K*, em que é mostrada na equação (3.43). O *Fator K* é uma classificação opcional aplicada a um transformador indicando

a sua adequação quando aplicado a ele cargas não lineares (IEEE.STD.C57110, 1998). O *Fator K* é representado pela equação (3.42):

$$Fator K = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n(pu)}^2 n^2 \quad (3.42)$$

$$Fator K = F_{HL} \times \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} I_n^2}{I_R^2} \quad (3.43)$$

onde  $I_{n(pu)}$  é a corrente rms de ordem  $n$  (por unidade) e  $I_R$  é a corrente rms fundamental para frequência nominal e carga nominal.

Quando *Fator K* = 1, significa que o transformador foi fabricado para suportar apenas correntes senoidais com frequência de 60 Hz.

Quando *Fator K* = 4, significa que o transformador pode suportar 50% da carga como sendo não linear.

Quanto maior o valor do *Fator K*, maior a capacidade do transformador suportar as cargas não linear e menor será o seu aquecimento.

Vale mencionar que o efeito do adicional nas perdas por correntes parasitas geradas pelas correntes de cargas não lineares é gerar calor, que deve ser dissipado pelo transformador, por isso que no capítulo 4 está fazendo a análise térmica desse equipamento. Essa perda por correntes parasitas é uma das partes das perdas que mais afeta a eficiência do transformador. Isto é visto como o aspecto mais crítico e de interesse em relação ao aumento das perdas produzidas por correntes de cargas harmônicas. O aumento nas perdas por correntes parasitas é produzido nos condutores que transportam as correntes não senoidais. Tudo isso, implica em aumentar ainda mais a temperatura nos pontos já quentes do transformador, que se torna um fator de maior limitação em um projeto de transformador (IEEE.STD.C57110, 1998).

As perdas por dispersão em outros componentes,  $P_{OSLn}$ , sob condição não senoidal é dada por:

$$P_{OSLn} = P_{OSL-R} \times \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \left( \frac{I_n}{I_R} \right)^2 n^{0,8} \quad (3.44)$$

onde  $P_{OSL-R}$  é a parcela de perda por dispersão magnética em outras partes metálicas para condições senoidais.

As perdas por dispersão em outros componentes,  $P_{OSLn}$ , se elevarão a um ritmo proporcional ao quadrado da corrente de carga. Mas essas perdas não aumentam a uma taxa proporcional ao quadrado da frequência, do mesmo modo que as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos. E o expoente da ordem harmônica, 0,8, é devido à existência de estudos que mostram que as perdas em partes estruturais aumentam por um fator expoente harmônico de 0,8 ou menos.

### **3.8.3 Impacto no condutor neutro**

A norma também relata que a presença de terceiro harmônico ou qualquer ordem harmônica de sequência zero no lado estrela da conexão do transformador, faz com que essa componente circule pelo neutro, o que pode acarretar no seu aquecimento fazendo com que seja necessário aumentar a sua bitola, para suportar a corrente existente.

## **3.9 Consequências dos harmônicos em transformadores**

O sistema de distribuição contém componentes não somente com frequência de 60 Hz (componente fundamental), contém também outras frequências, que podem ser composta por: harmônicas, inter-harmônicas e sub-harmônicas. Essas frequências diferentes da frequência fundamental causam sobre-elevação térmica e em consequência perda da vida útil de transformadores. A vida útil está relacionada com o desgaste do sistema de isolamento que se degradam mais facilmente pela elevação de temperatura, podendo ocasionar queima do transformador.

O transformador é um importante equipamento no sistema de distribuição funcionando como abaixador (diminui a tensão) ou elevador (aumenta a tensão). Atua entre a média e a baixa tensão, ou seja, ele está interligado com as cargas e com os alimentadores. O contato com as cargas não lineares ocorre perdas adicionais, diminuição do rendimento e da eficiência do transformador.

As baixas frequências também podem causar ruído no transformador. Pode ocorrer também o fenômeno de ressonância, entre a impedância do sistema elétrico e a reatância de dispersão do transformador.

Nos transformadores na conexão delta-estrela ( $\Delta$ -Y) com cargas monofásicas não lineares conectadas geram harmônicos triplos que se adicionam a corrente do neutro, essa vai para o lado delta e provoca superaquecimento e falhas no transformador (SILVA, 2015).

A presença de determinado tipo de harmônico pode ocasionar saturação do núcleo do transformador. Também, quando os enrolamentos estão ligados em delta e estão submetidos a harmônicas triplas ímpares múltiplas de 3, pode ocasionar sobrecarga nos enrolamentos.

## 4. RESULTADO EXPERIMENTAL

Foram feitos os seguintes experimentos: Fonte com tensão senoidal e carga linear e outro caso com fonte de tensão com harmônicos e carga não linear. Em cada caso foi verificado a temperatura no ponto mais quente no enrolamento e a temperatura no núcleo do transformador, quando a mesma se estabilizou, foi obtido também às formas de onda de tensão (tensão de linha) e corrente (corrente de fase) no secundário do transformador e medido o THD de corrente em uma das fases do secundário do transformador. Realizou-se um caso por dia, possibilitando que o transformador retornasse a sua temperatura inicial.

Nos dois casos o transformador foi ligado em  $\Delta$ -Y, funcionando como elevador, com tensão de linha de 220 V no primário e tensão de linha de 380 V no secundário.

Era verificada a temperatura do transformador a cada 5 minutos, para saber se a mesma já estava estabilizada.

### 4.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados estão listados a seguir e mostrados na Figura 22.

- Banco de resistor trifásico;
- Fonte de alimentação e de distúrbios trifásica CA;
- Osciloscópio Tektronix TDS 3014C;
- Termômetro Infravermelho;
- Analisador de energia Minipa ET – 5060C;
- Transformador trifásico;
- Resistores;
- Banco de indutor;
- Diodos.

Figura 22: Equipamentos utilizados.



(a) Fonte de alimentação trifásica CA.



(b) Osciloscópio.



(c) Termômetro.

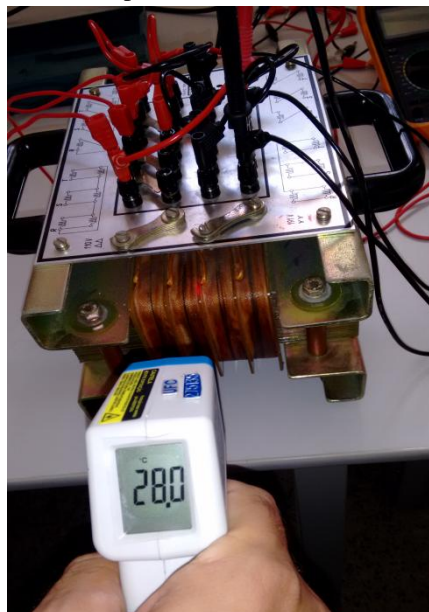


(d) Analisador de energia.

Fonte: Produção do autor.

Outro equipamento utilizado foi o transformador, na Figura 23 mostra-o com sua temperatura inicial a qual foi de 28°C. Essa temperatura é a temperatura ambiente, ou seja, no núcleo e enrolamentos é igual a esse valor.

Figura 23: Temperatura inicial do transformador.



Fonte: Produção do autor (Termômetro).

Na Tabela 6 são mostradas algumas informações sobre esses equipamentos.

Tabela 6: Algumas informações sobre os equipamentos usados.

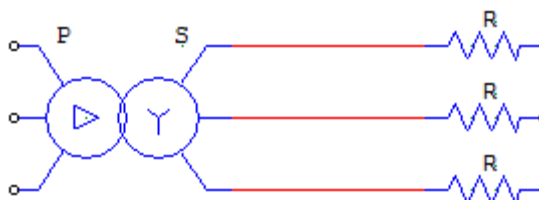
<b>Fonte de Alimentação</b>	
Frequência de alimentação	50/60 Hz
Potência Nominal de Saída	4,5 kVA
Frequência de Saída	15 a 500 Hz
Tensão de Saída	0 a 380 V (tensão de linha)
<b>Transformador</b>	
Potência trifásica	1 kVA
Tensão trifásica	220 V - 380 V - $\Delta Y$
Frequência	60 Hz
<b>Cargas</b>	
Resistência - R	292 $\Omega$
Resistência - R2	384,5 $\Omega$
Indutância - L	3,3 H
Observação: Estes valores de resistências e indutâncias são valores equivalentes da associação de mais de um desses elementos.	

Fonte: Produção do autor.

## 4.2 Medições realizadas para o caso 1

Para o caso 1 o transformador foi submetido à tensão de alimentação senoidal e carga linear. A Figura 24 mostra o esquema do circuito em que o transformador foi ligado em  $\Delta$ -Y conectado a carga resistiva que foi ligada na conexão Y, sendo R igual a 292  $\Omega$ .

Figura 24: Esquema do circuito para uma carga resistiva.

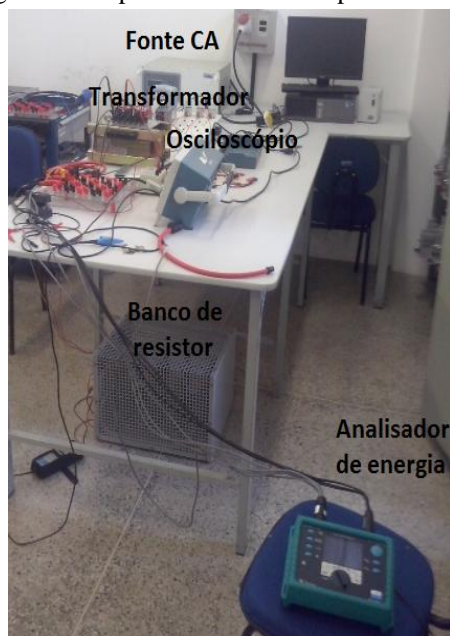


Fonte: Produção do autor.

A Figura 25 mostra o experimento sendo realizado.



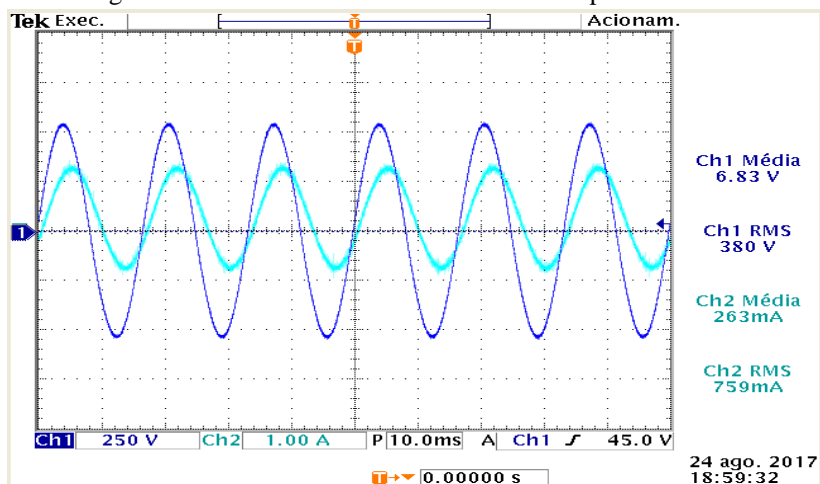
Figura 25: Experimento realizado para o caso 1.



Fonte: Produção do autor.

Foi registrada a forma de onda da tensão (tensão de linha) e corrente (corrente de fase) no secundário do transformador, conforme mostra a Figura 26.

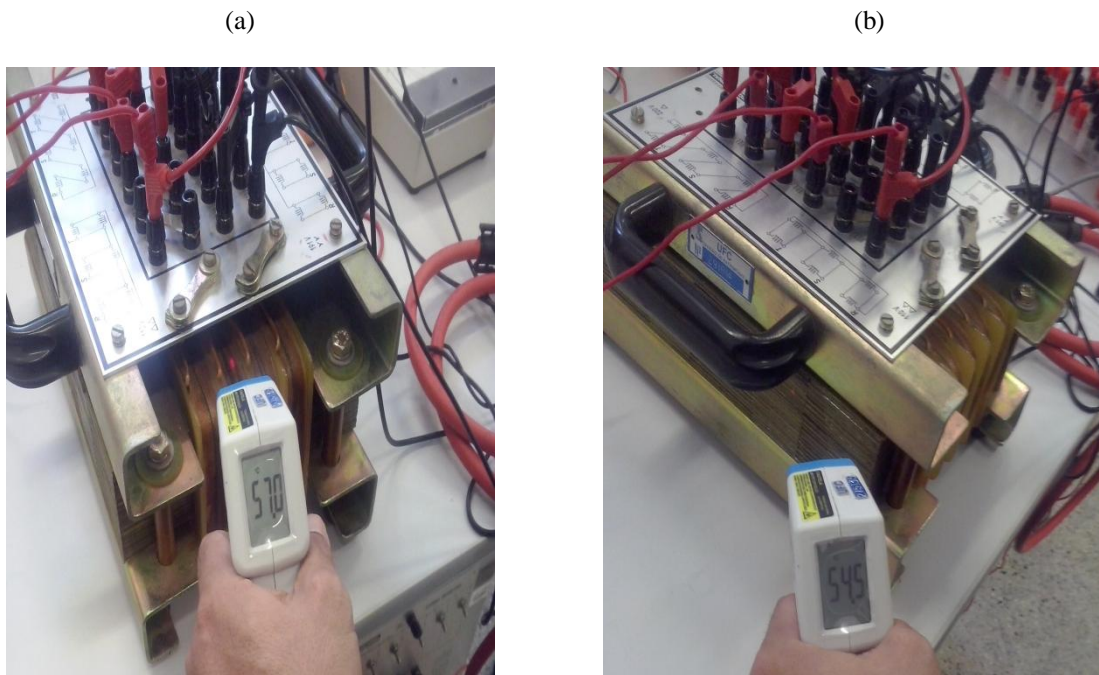
Figura 26: Forma de onda de tensão e corrente para o caso 1.



Fonte: Produção do autor (Osciloscópio).

Medido a temperatura no ponto mais quente no enrolamento e a temperatura no núcleo do transformador, quando a mesma se estabilizou. A temperatura se estabilizou no tempo de duas horas e meia, essa temperatura foi de 57°C no enrolamento e 54,5°C no núcleo, conforme mostra a Figura 27.

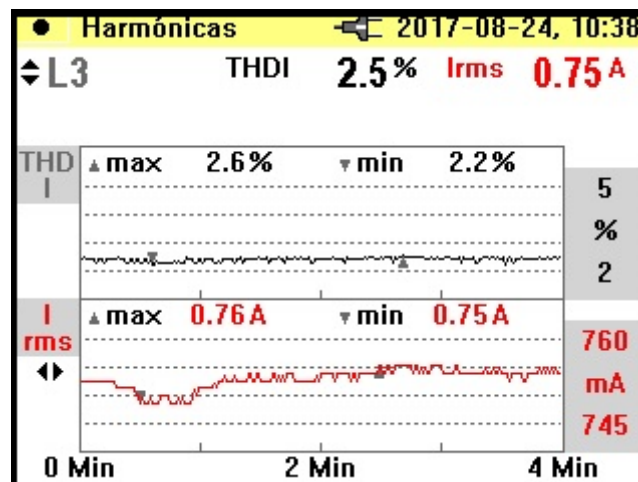
Figura 27: Temperatura no enrolamento em (a), Temperatura no núcleo em (b).



Fonte: Produção do autor (Termômetro).

Também foi medido o THD de corrente em uma das fases no secundário do transformador. O THD de corrente foi de 2,5%, mostrado na Figura 28.

Figura 28: THD de corrente para o caso 1.

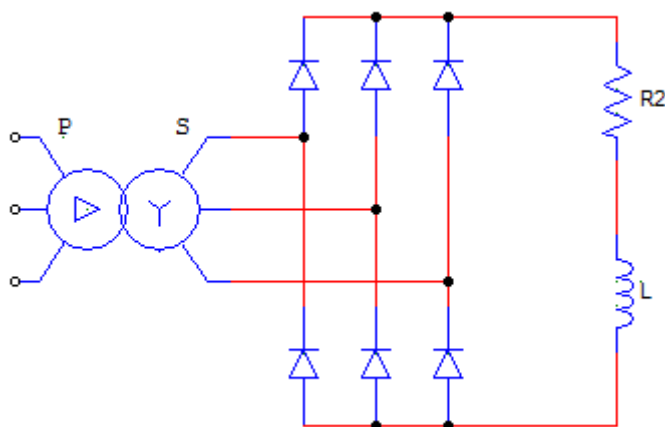


Fonte: Produção do autor (Analisador de energia).

### 4.3 Medições realizadas para o caso 2

Para o caso 2 o transformador foi submetido à tensão de alimentação com harmônicos (3ª, 5ª e 7ª ordens) e carga não linear. A Figura 29 mostra o esquema do circuito, em que o transformador foi ligado em  $\Delta$ -Y conectado a um retificador de onda completa interligada a resistência, R2, a qual tem um valor de 384,5  $\Omega$  e a indutância, L, que tem um valor de 3,3 H. Foi usado esse valor de resistência e de indutância com a finalidade de se obter uma corrente de linha no secundário do transformador parecida com a corrente do caso 1.

Figura 29: Esquema do circuito para carga não linear.

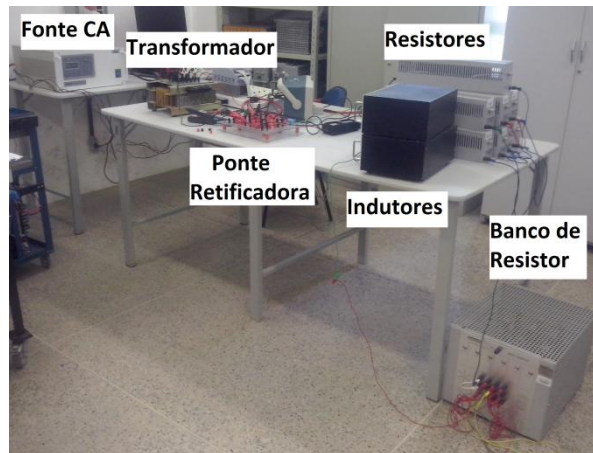


Fonte: Produção do autor.

Neste caso observou-se que o transformador vibrou com maior intensidade com relação ao caso 1.

A Figura 30 mostra o experimento sendo realizado.

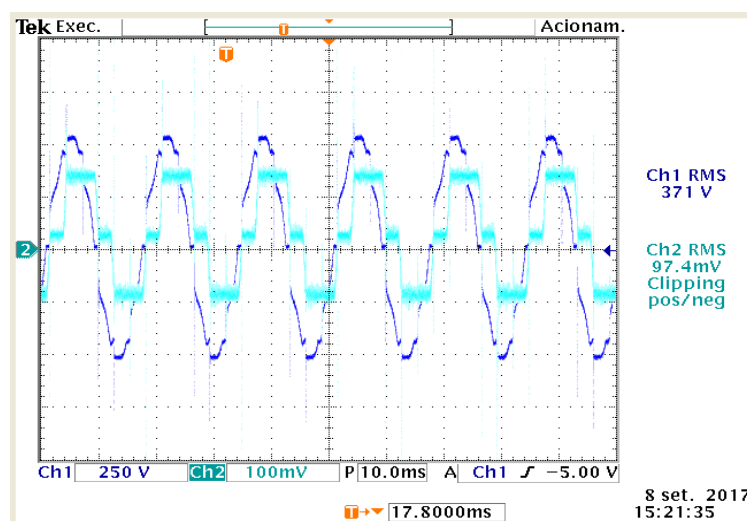
Figura 30: Experimento realizado para o caso 2.



Fonte: Produção do autor.

Foi registrada a forma de onda da tensão (tensão de linha) e corrente (corrente de fase) no secundário do transformador, conforme é mostrado na Figura 31.

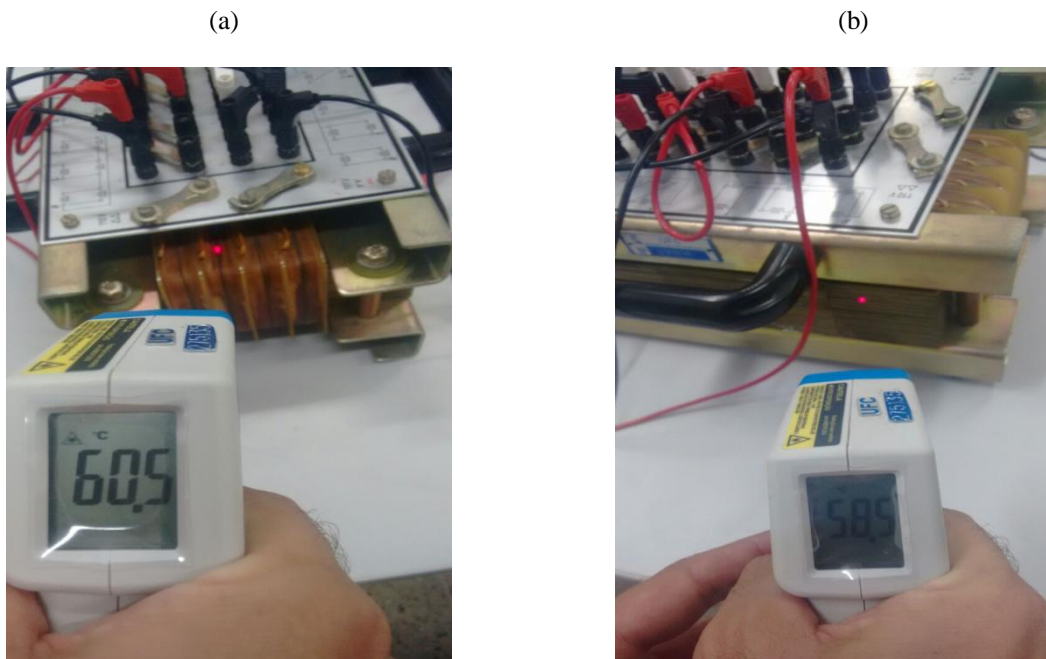
Figura 31: Forma de onda de tensão e corrente para o caso 2.



Fonte: Produção do autor (Osciloscópio).

Medido a temperatura no ponto mais quente no enrolamento e a temperatura no núcleo do transformador, quando a mesma se estabilizou. A temperatura se estabilizou no tempo de três horas, essa temperatura foi de  $60,5^{\circ}\text{C}$  no enrolamento e  $58,5^{\circ}\text{C}$  no núcleo, conforme mostra a Figura 32.

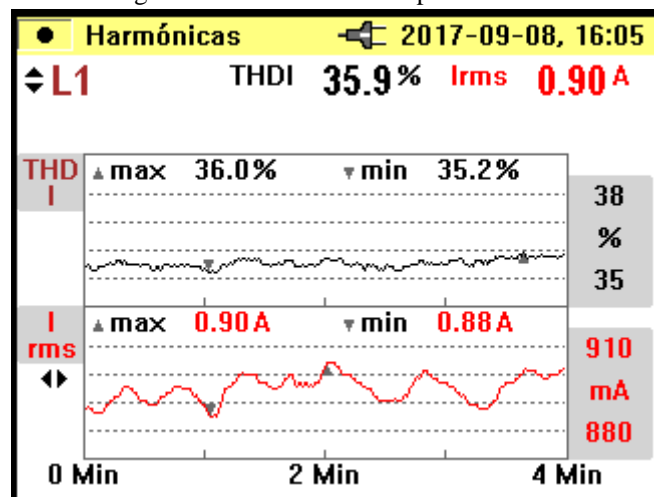
Figura 32: Temperatura no enrolamento em (a), Temperatura no núcleo em (b).



Fonte: Produção do autor (Termômetro).

Também medido o THD de corrente em uma das fases no secundário do transformador. O THD de corrente foi de 35,9%, mostrado na Figura 33.

Figura 33: THD de corrente para o caso 2.



Fonte: Produção do autor (Analisador de energia).

#### 4.4 Análise do resultado experimental

Na Tabela 7 são mostradas de forma resumida as medidas realizadas, as quais são: as temperaturas no enrolamento e no núcleo e o THD de corrente. É mostrada

também a variação de temperatura do transformador referente ao caso 2 no enrolamento e núcleo em relação ao caso 1.

Tabela 7: Medidas realizadas.

<b>Caso</b>	<b>Temperatura no enrolamento (°C)</b>	<b>Temperatura no núcleo (°C)</b>	<b>THD de corrente (%)</b>	$\Delta T_E$ (°C)	$\Delta T_N$ (°C)
Caso 1	57	54,5	2,5	-	-
Caso 2	60,5	58,5	35,9	3,5	4
$\Delta T_E$ : Aumento de temperatura no enrolamento em relação ao caso 1; $\Delta T_N$ : Aumento de temperatura no núcleo em relação ao caso 1.					

Fonte: Produção do autor.

A temperatura no núcleo para o caso 2 variou 4 °C em relação ao caso 1, maior que a variação de temperatura no enrolamento que foi de 3,5 °C. Mas nos dois casos verificou-se que a temperatura no enrolamento foi maior que no núcleo.

É visto que a temperatura do transformador foi mais elevada na presença de harmônicos, essa elevação pode ser considerada como significativa, porque pode causar danos ao transformador em longo prazo, como exemplo deteriorar mais rapidamente o seu sistema de isolamento, ocasionando a diminuição da vida útil do mesmo e podendo ocasionar falhas.

O THD de corrente para o caso 2 foi muito maior que o caso 1, devido a maior distorção na forma de onda da corrente. No caso 1 a forma de onda era senoidal, já no caso 2 ficou bem deformada. Pode-se observar que quanto maior o THD, maior será a elevação de temperatura no transformador.

## 5. CONCLUSÃO

Foi verificado neste trabalho que os harmônicos são prejudiciais aos equipamentos conectados no sistema elétrico, como exemplo o transformador.

Verificou-se neste trabalho a temperatura do transformador com fonte de tensão senoidal e carga linear (caso 1), e outro caso com fonte de tensão com harmônicos e carga não linear (caso 2). Observou-se que a diferença de temperatura do caso 2 para o caso 1 foi de 3,5 °C no enrolamento e de 4 °C no núcleo. Então se pode notar que com a presença de harmônicos o transformador ficou com uma temperatura maior do que com fonte de alimentação senoidal.

No caso 2 houve uma maior elevação de temperatura devido os harmônicos inseridos pela fonte de distúrbios e também pela carga não linear.

Nos enrolamentos a temperatura foi maior que no núcleo, acarretando desgaste no sistema de isolamento.

O THD de corrente para o caso 1 foi de 2,5% e no caso 2 foi de 35,9%. Como se pode ver o THD de corrente foi maior para o caso 2, devido à presença de harmônicos e em consequência à distorção na forma de onda da corrente ser maior para esse caso. No caso 1 a forma de onda era aproximadamente senoidal, já no caso 2 foi bem distorcida. Foi observado também que quanto maior o THD mais elevada ficou a temperatura do transformador.

Se tratando da análise térmica de um transformador, existem poucos trabalhos com a inserção de harmônicos pela fonte de tensão, devido à necessidade de ter o equipamento que é a fonte de distúrbio o que aumenta a importância deste trabalho.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Podem ser feitos outros trabalhos futuros baseados neste trabalho, os quais são listados abaixo:

- Fazer estudo semelhante ao deste trabalho utilizando transformador a óleo;
- Medir as perdas do transformador;
- Dimensionar filtro para mitigar as harmônicas;
- Usar um termovisor substituindo do termômetro infravermelho, assim seria possível visualizar com maior precisão o ponto mais quente;
- Utilizar sistema desequilibrado seja pela fonte de tensão ou pela impedância.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7034 – Materiais Isolantes Elétricos – Classificação Térmica**. ABNT. 1981.

AFONSO, J. L; MARTINS, J. S. **Qualidade de energia elétrica na indústria**. Euveo.2003.

AGUIAR, E. R. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

AKAGI, H. **Active Harmonic Filters**. Tokyo Institute of Technology. Tokyo. 2005.

AKAGI, H. **Modern Active Filters and Traditional Passive Filters**. Tokyo Institute of Technology. Tokyo. 2006.

DALILA, M. S; KHALID, M. N; MD SHAH, M. **Distribution Transformer Losses Evaluation under Non-Linear Load**. Australasian Universities. 2009.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. 3. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

HERNÁNDEZ, J.L; CASTRO, M.A; CARPIO, J.; COLMENAR, A. **Harmonics in Power Systems**. Valencia. 2009.

IEEE.STD.519. **IEEE Standard 519 – Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York. 2014.

IEEE. STD.C57110. **IEEE Standard C57.110 – Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents**. New York. 1998.

LEÃO, R; SAMPAIO, R; ANTUNES, F. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.



LPQI. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia – Inter-harmônicas**. Leonardo Power Quality Initiative – Comissão Europeia e International Copper Association ICA. 2004.

MORAIS, E.E.C. **Filtro Híbrido de dupla Sintonia a Quatro Fios e a Quatro Braços**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2014.

NIELSON, R. **Harmônicos Triplos no Sistema de Distribuição e uma Proposta de Mitigação**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2013.

OWEN, E.L. **A History of Harmonics in Power Systems**. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, 1998.

PAGANINI, G; JANUÁRIO, M. **Análise de Rendimento de Transformadores que Alimentam Cargas Tipo Linear e não Linear**. Universidade do Oeste de Santa Catarina. Joaçaba. 2014.

PIERCE, L. **Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents**. Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 32, 1996.

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

RIBEIRO, N.S.S. **Avaliação de Filtros Eletromagnéticos e sintonizados LC para minimização de correntes de sequência zero em sistemas de distribuição a quatro fios**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2007.

SANTOSO, S. **Electrical Power Systems Quality**. 2. Ed. Hoboken: McGraw-Hill, 2002.

SCHWANZ, D. **Análise da Distorção Harmônica de um Parque Eólico Através da sua Modelagem no Domínio do Tempo e da Frequência**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

SILVA, D.C.L. **Contribuições Para o Estudo Térmico em Transformadores a Seco na Presença de Sub e Inter-Harmônicos**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2015.