

O presente trabalho propõe um estudo comparativo entre transformadores monofásicos com diferentes núcleos magnéticos, sendo um deles fabricado com núcleo de aço silício de grão orientado e o outro fabricado com núcleo de metal amorfo. Primeiramente são avaliados os principais estudos e informações sobre transformadores já fabricados com núcleo de metal amorfo e suas principais características técnicas, após apresentam-se os principais fundamentos teóricos de ambos os materiais magnéticos, bem como o conceito e equacionamento utilizados para elaboração dos projetos, fabricação e ensaios dos mesmos. Depois é apresentada detalhadamente a sequência de cálculo dos projetos e fabricação dos transformadores. Por fim, os transformadores fabricados são submetidos aos ensaios para posterior comparação entre os mesmos. Com os dados dos ensaios pode-se concluir que ao comparar um transformador fabricado com núcleo de metal amorfo a um transformador com núcleo de aço silício de grão orientado, o metal amorfo apresenta menores perdas e conseqüentemente maior rendimento, assim gerando um menor desperdício de energia e custo de operação.

Orientador: Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira.

Coorientador: Dr. Fredemar Rüncos.

Joinville, 2019

ANO
2019

GUSTAVO FLORIANI BASQUIROTO | ESTUDO, PROJETO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO DE METAL AMORFO



UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO, PROJETO E VERIFICAÇÃO
EXPERIMENTAL DE UM
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO
COM NÚCLEO DE METAL AMORFO**

GUSTAVO FLORIANI BASQUIROTO

JOINVILLE, 2019

GUSTAVO FLORIANI BASQUIROTO

**ESTUDO, PROJETO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL
DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO
DE METAL AMORFO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira.

Coorientador: Dr. Fredemar Runcos.

JOINVILLE - SC

2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Basquioto, Gustavo
ESTUDO, PROJETO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL
DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO
DE METAL AMORFO / Gustavo Basquioto. -- 2019.
102 p.

Orientador: Sérgio Vidal Garcia Oliveira
Coorientador: Fredemar Runcos
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2019.

1. Transformador. 2. Metal amorfo. I. Vidal Garcia Oliveira,
Sérgio . II. Runcos, Fredemar. III. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

**Estudo Projeto e Verificação Experimental de um Transformador Monofásico
com Núcleo de Metal Amorfo**

por

Gustavo Floriani Basquioto

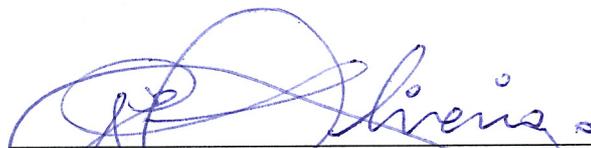
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

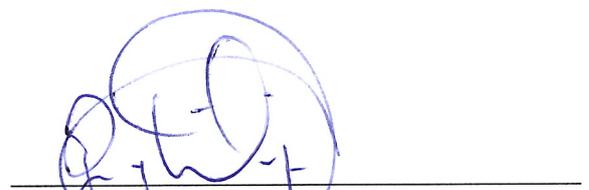
Área de concentração em “Sistemas Eletroeletrônicos”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

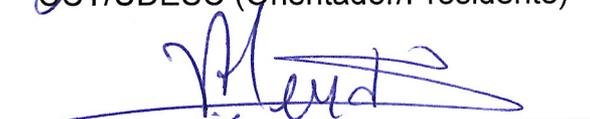
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)



Dr. Djonny Weinzierl
Fenômenos Aprendizagem



Prof. Dr. Joselito Anastacio Heerdt
CCT/UDESC

Joinville, SC, 09 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado saúde e perseverança durante toda minha vida.

Agradeço a minha esposa Stefany Bridaroli e ao meu filho Joaquim Basquiroto pelo apoio incondicional durante este trabalho.

Agradeço aos meus pais Edson Basquiroto e Mariane Floriani, por todo suporte e incentivo durante toda minha vida.

Ao professor orientador Sérgio Vidal Garcia Oliveira, por todo conhecimento e suporte providos durante a execução deste trabalho.

Ao professor coorientador Fredemar Rüncos, por todo aconselhamento e inspiração na minha vida acadêmica.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica que contribuíram à minha formação.

“Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre. ”

Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo comparativo entre transformadores monofásicos com diferentes núcleos magnéticos, sendo um deles fabricado com núcleo de aço silício de grão orientado e o outro fabricado com núcleo de metal amorfo. Primeiramente são avaliados os principais estudos e informações sobre transformadores já fabricados com núcleo de metal amorfo e suas principais características técnicas, após apresentam-se os principais fundamentos teóricos de ambos os materiais magnéticos, bem como o conceito e equacionamento utilizados para elaboração dos projetos, fabricação e ensaios dos transformadores. Depois é apresentada detalhadamente a sequência de cálculo dos projetos e fabricação dos transformadores monofásicos com potência aparente de 1000 VA, tensão primária de 220 V, tensão secundária de 110 V e frequência de 60 Hz. Por fim, os transformadores fabricados são submetidos aos ensaios propostos e é feito o levantamento de dados para posterior comparação entre os transformadores. Com os dados dos ensaios pode-se concluir que ao comparar um transformador fabricado com núcleo de metal amorfo a um transformador com núcleo de aço silício de grão orientado, o metal amorfo apresenta menores perdas e conseqüentemente maior rendimento, assim gerando um menor desperdício de energia e custo de operação.

Palavras-chave: Metal amorfo. Aço silício grão orientado. Transformador.

ABSTRACT

The present work proposes a comparative study between single phase transformers with different magnetic cores, one of them manufactured with oriented grain silicon steel core and the other made with amorphous metal core. Firstly, the main studies and information about transformers already manufactured with amorphous metal core and their main technical characteristics are evaluated. After the main theoretical foundations of magnetic materials, as well as the concept and equation used for project elaboration, manufacturing and transformers testing, then, are presented design, sequences of calculation and manufacturing of single-phase transformers with 1000 VA apparent power, 220 V primary voltage, 110 V secondary voltage and 60 Hz frequency are presented in detail. Finally, the manufactured transformers are subjected to the proposed tests and data collected for later comparison between the transformers. From the test data it can be concluded that when comparing an amorphous metal core fabricated transformer to a grain oriented silicon steel core transformer, the amorphous metal presents lower losses and consequently higher efficiency, thus generating less energy waste and operation cost.

Keywords: Amorphous metal. Grain oriented silicon steel. Transformer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Imagens térmicas dos núcleos de a)Metal amorfo b)Aço Silício.....	25
Figura 2.2 – Transformador trifásico de núcleo amorfo de 630kVA	27
Figura 2.3 – Curva de perda do metal amorfo em 6kHz.	28
Figura 2.4 – Experimento metal amorfo.....	29
Figura 2.5 – Capacidade instalada de transformadores amorfos por País.....	31
Figura 3.1 – Estruturas cristalinas e não cristalinas.	35
Figura 3.2 – Processo de fabricação do metal amorfo.	35
Figura 3.3 – Curva de magnetização de uma liga amorfa e de um aço silício de grão orientado.	37
Figura 3.4 – Transformador original de Faraday.	39
Figura 3.5 – Transformador ideal.	40
Figura 3.6 – Laço de histerese.....	45
Figura 3.7 – Transformador real.....	46
Figura 3.8 – Enrolamento concêntrico.....	47
Figura 3.9 – Circuito equivalente do transformador.....	48
Figura 3.10 – Circuito equivalente do transformador referido ao primário.....	49
Figura 3.11 – Circuito equivalente em forma de fasores.....	49
Figura 3.12 – Montagem dos instrumentos para ensaio de circuito aberto.....	54
Figura 3.13 – Montagem dos instrumentos para ensaio de curto-circuito.....	55
Figura 4.1 – Núcleo magnético.....	63
Figura 4.2 – Núcleo magnético metal amorfo.....	64
Figura 4.3 – Núcleo magnético aço silício GO.....	65
Figura 4.4 – Núcleo de aço silício tipo envolvido.....	69
Figura 4.5 – Núcleo de metal amorfo do tipo envolvido	70
Figura 4.6 – Transformador com aço silício GO.....	71
Figura 4.7 – Transformador com metal amorfo	71

Figura 4.8 – Ensaio de circuito aberto no transformador com núcleo de aço silício GO: a) 220 V b) 110 V.....	72
Figura 4.9 – Ensaio de circuito aberto no transformador com núcleo de metal amorfo: a) 220 V b) 110 V.....	73
Figura 4.10 – Ensaio de curto-circuito no transformador com núcleo de aço silício GO.....	74
Figura 4.11 – Ensaio de curto-circuito no transformador com núcleo de metal amorfo.....	75
Figura 4.12 – Ensaio de elevação de temperatura com banco de resistências.....	76
Figura 4.13 – Imagens térmicas do ensaios de elevação de temperatura.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo de perdas por potência entre transformadores de metal amorfo e aço silício.....	24
Tabela 2.2 – Ensaio comparativos entre transformadores de metal amorfo e aço silício.	26
Tabela 3.1 – Desenvolvimento das ligas amorfas.....	36
Tabela 3.2 – Tensão de ensaio para obtenção da curva de perdas.....	56
Tabela 4.1 – Tabela de fios de cobre esmaltados.....	61
Tabela 4.2 – Dados de projeto dos transformadores.	68
Tabela 4.3 – Medições do ensaio de circuito aberto com o enrolamento de 110 V aberto.	73
Tabela 4.4 – Medições do ensaio de circuito aberto com o enrolamento de 220 V aberto	74
Tabela 4.5 – Medições do ensaio de curto-circuito com o secundário em curto.....	75
Tabela 5.1 – Valores ensaiados dos transformadores fabricados.....	93
Tabela 5.2 – Vantagens e desvantagens	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Elevação de temperatura no transformador com núcleo de aço sílcio GO.....	77
Gráfico 4.2 – Elevação de temperatura no transformador com núcleo metal amorfo..	78
Gráfico 4.3 – Perda magnética dos transformadores em função da indução magnética.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
GO	Grão Orientado
GNO	Grão Não Orientado
EUA	Estados Unidos da América
TDMA	Transformador de Metal Amorfo
PRFV	Placa Resinada de Fibra de Vidro
STP	Sociedade Técnica Paulista Ltda

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe	Ferro
B	Boro
Si	Silício
C	Carbono
μ	Permeabilidade
μ_0	Permeabilidade do ar
H_c	Força coercitiva
N_1	Número de espiras do primário
N_2	Número de espiras do secundário
$v_1(t)$	Tensão do primário no tempo
$v_2(t)$	Tensão do secundário no tempo
$\varphi_m(t)$	Fluxo magnético no tempo
$i_1(t)$	Corrente do primário no tempo
$i_2(t)$	Corrente do secundário no tempo
k_v	Relação de transformação das tensões
k_I	Relação de transformação das correntes
k_Z	Relação de transformação das impedâncias
Z_{eq1}	Impedância equivalente do primário
Z_{eq2}	Impedância equivalente do secundário
Z'_{eq2}	Impedância equivalente do secundário referida ao primário
Z_{fe}	Impedância no ferro
Z_M	Impedância magnetizante
Z_0	Impedância equivalente no ramo em vazio
Z_{Eq}	Impedância equivalente do transformador
Z_{cc}	Impedância de curto-circuito
P_j	Perdas no enrolamento
R_{Et}	sistência equivalente do enrolamento
P_F	rdas de Focault
f	Frequência da rede
B_M	Indução magnética

h	Espessura da chapa magnética
k_F	Constante do material
H	Campo magnético
P_H	Perdas por histerese
V	Volume da amostra
K_h	Constante do material
Φ_{d1}	Fluxo de dispersão do primário
Φ_{d2}	Fluxo de dispersão do secundário
L_1	Indutância de dispersão do primário
L_2	Indutância de dispersão do secundário
X_1	Reatância de dispersão do primário
X_2	Reatância de dispersão do secundário
X_M	Reatância magnetizante
R_{fe}	Resistência do ferro
R_1	Resistência do enrolamento primário
R_2	Resistência do enrolamento secundário
I_1	Corrente do enrolamento primário
I_2	Corrente do enrolamento secundário
I_0	Corrente a vazio
I_M	Corrente magnetizante
V_1	Tensão no enrolamento primário
V_2	Tensão no enrolamento secundário
S_1	Potência aparente no primário
S_2	Potência aparente no secundário
P_1	Potência ativa no primário
P_2	Potência ativa no secundário
Q_1	Potência reativa no primário
Q_2	Potência reativa no secundário
η	Rendimento
I_{sc}	Corrente do ensaio de curto-circuito
V_{sc}	Tensão do ensaio de curto-circuito
P_{sc}	Potência ativa do ensaio de curto-circuito
k_S	Coeficiente de sobre potência

S_{C1}	Seção condutora do enrolamento primário
S_{C2}	Seção condutora do enrolamento secundário
S_c	Seção condutora total
J_1	Densidade de corrente do enrolamento primário
J_2	Densidade de corrente do enrolamento secundário
S_M	Seção magnética do núcleo
c	Largura da coluna do núcleo
p	Pacote de chapas do núcleo
K_{emp}	Fator de empilhamento
S_j	Área da janela do carretel
H_j	Altura do carretel
V_l	Vão livre entre as pernas do núcleo magnético
F_E	Fator de enchimento do transformador
ϕ_1	Ângulo de fase do primário
ϕ_2	Ângulo de fase do secundário
$\cos(\theta)$	Fator de potência
$\Delta T_{nuc.}$	Elevação de temperatura no núcleo
$\Delta T_{enr.}$	Elevação de temperatura no enrolamento
P_{mag}	Perda magnética no núcleo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. MOTIVAÇÃO	21
1.2. OBJETIVOS	22
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
2. ESTADO DA ARTE	24
2.1. NÚCLEOS MAGNÉTICOS	23
2.2. EMPREGOS DOS METAIS AMORFOS	30
2.3. VIABILIDADE ECONÔMICA	32
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
3.1. MATERIAIS MAGNÉTICOS	33
3.1.1. Aço silício	33
3.1.2. Metal amorfo	34
3.2. METAL AMORFO EM TRANSFORMADORES	36
3.3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE UM TRANSFORMADOR IDEAL	39
3.4. O TRANSFORMADOR REAL	43
3.4.1. Perdas	43
3.4.2. Fluxo magnético de dispersão	46
3.5. ANÁLISE DO TRANSFORMADOR	48
3.5.1. Circuito equivalente do transformador	48
3.5.2. Ensaio de circuito aberto	53
3.5.3. Ensaio de curto-circuito	54
3.5.4. Ensaio de perdas magnéticas em função da indução	55
3.5.5. Ensaio de elevação de temperatura	56
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	58
4.1. PROJETO DOS TRANSFORMADORES	58
4.1.1. Definição da potência primária	58
4.1.2. Definição das seções condutoras	59
4.1.3. Definição do volume ativo	62
4.1.4. Definição do número de espiras	65
4.1.5. Definição do fator de enchimento	67
4.2. FABRICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES	69
4.2.1. Montagem do núcleo magnético	69

4.2.2. Confeção das bobinas	70
4.3. ENSAIO DOS TRANSFORMADORES	72
4.3.1. Ensaio de circuito aberto aplicado	72
4.3.2. Ensaio de curto-circuito aplicado	74
4.3.3. Ensaio de elevação de temperatura aplicado	75
4.3.4. Ensaio aplicado das perdas magnéticas em função da indução	78
4.4. CÁLCULO DOS PARÂMETROS FÍSICOS ENSAIADOS	80
4.4.1. Parâmetros físicos do transformador de aço sílicio GO	80
4.4.2. Parâmetros físicos do transformador de metal amorfo	86
4.4.3. Cálculo do rendimento dos transformadores fabricados	91
5. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1. RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5.3. TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo contém a motivação e objetivos deste trabalho, apresentando uma abordagem de fabricação de transformadores monofásicos com núcleo amorfo. Inicialmente os temas abordados serão contextualizados para posterior apresentação de objetivos e resumo com a organização do trabalho.

1.1. MOTIVAÇÃO

A busca por eficiência energética é um dos temas mais discutidos atualmente, tendo em vista que a sociedade vem a ser cada dia mais dependente da energia elétrica, necessitando que a continuidade e expansão de sua produção e distribuição sejam constantes e determinantes para o futuro.

Nas últimas décadas, revelou-se uma preocupação crescente com o uso irracional da energia elétrica, após séculos ignorando as consequências ambientais da industrialização e do uso indiscriminado da energia, conceitos de racionalidade e aumento da eficiência energética traduzem o aumento no grau de consciência e exigência da população a este tema.

Nesta perspectiva, um ponto a ser explorado é o aumento da eficiência dos transformadores de distribuição de energia elétrica através da substituição do núcleo magnético convencional de aço silício por um núcleo magnético mais eficiente e conseqüentemente de menores perdas.

O regime de funcionamento de um transformador varia entre a operação em vazio, operação em carga nominal e operação em sobrecarga, diferente das perdas Joule que variam de acordo com a carga aplicada, as perdas no núcleo independem deste valor devido aos transformadores estarem sempre submetidos à tensão, evidenciando a importância das perdas magnéticas serem de baixo valor (MARTIGNONI, 1991).

Analisando que em uma rede de distribuição de energia existe um número elevado de transformadores, o aumento do seu rendimento através da diminuição das suas perdas magnéticas reflete em uma substancial economia de energia elétrica. Assim, o desenvolvimento de novas máquinas e novos materiais tem sido um processo natural, entre os quais se destacam os metais amorfos (MAURÍCIO, 2014).

Os desenvolvimentos dos núcleos de transformadores de liga amorfa começaram em 1975, sendo a liga de ferro e boro Fe₈₀B₂₀ (METGLAS 2605) a primeira no mercado com uma maior indução de saturação na faixa de 1,5 Teslas. A liga Fe₈₂B₁₂Si₆ (METGLAS 2605S) foi mais estável termicamente do que a anterior, mas apresentou sérios problemas de cristalização e irregularidades de superfície. Para superar esses problemas uma nova liga foi proposta em 1978, a liga de Fe₈₁B_{13,5}Si_{3,5}C₂ (METGLAS 2605SC), que se mostrou mais adequada e estável (CAMPOS, 2006).

Este tipo de liga amorfa foi desenvolvida pela Allied-Signal Inc., aonde funcionários da empresa juntamente com pesquisadores do Laboratório Lincoln, em 1981, colocaram em operação o primeiro transformador com núcleo de liga amorfa para comercialização, sendo este um transformador monofásico toroidal de 15 kV (CAMPOS, 2006).

Apesar das ligas amorfas já terem entrado em produção industrial, os transformadores com estes materiais ainda possuem um custo elevado se comparados com transformadores tradicionais, por isso a sua utilização só se justifica em casos em que a economia de energia obtida compensa o maior investimento inicial (GUEDES, 2003).

1.2. OBJETIVOS

A presente dissertação, perante a perspectiva da utilização do metal amorfo na construção de núcleos dos transformadores, tem como objetivo contribuir para o estudo da utilização destes materiais e para o projeto e fabricação de transformadores de maior eficiência energética.

A proposta desta dissertação é projetar e construir dois transformadores monofásicos com potência aparente de 1000 VA, tensão primária de 220 V, tensão secundária de 110 V e frequência de 60 Hz, sendo um construído com núcleo de ferro amorfo e outro com aço silício de grão orientado. Posteriormente ensaiar e analisar as suas propriedades magnéticas, parâmetros do circuito equivalente e desempenho, comparando o transformador de metal amorfo em relação ao de aço silício.

Uma vez construídos os transformadores pretende-se:

- Determinar as propriedades magnéticas dos núcleos, nomeadamente as perdas magnéticas em função da indução magnética B ;
- Determinar os parâmetros do esquema equivalente de Steinmetz e a respectiva impedância de curto-circuito;
- Caracterizar o comportamento dos transformadores em carga determinando o rendimento e elevação de temperatura dos mesmos.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além desta introdução, este trabalho é dividido da seguinte maneira.

O Capítulo 2 traz o levantamento do estado da arte relacionado aos transformadores com núcleo de ferro amorfo já fabricados. Outras características como, potência nominal, número de fases, aplicação, entre outros, foram levados em consideração.

O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica envolvida nos materiais magnéticos, no funcionamento de um transformador e nos transformadores com núcleo de ferro amorfo.

O Capítulo 4 descreve e apresenta os cálculos efetuados para o transformador com núcleo de ferro amorfo e de núcleo de aço silício, bem como, a fabricação e ensaio dos transformadores em estudo.

O Capítulo 5 apresenta e analisa os dados referentes aos ensaios laboratoriais efetuados com o transformador de núcleo de ferro amorfo, comparando com os resultados obtidos nos ensaios do transformador de núcleo de aço silício e conclusões retiradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

Ao mesmo tempo em que os transformadores de distribuição possuem um elevado rendimento, tipicamente acima de 98% para transformadores acima de 45 kVA em plena carga, os mesmos são alimentados 24 horas por dia e sofrem uma grande variação de carga, ocasionando em um significativo montante de perdas. Isto devido ao grande número de transformadores presentes nos sistemas de distribuição, bem como ao fato que o núcleo magnético é continuamente magnetizado e desmagnetizado na frequência da rede.

De acordo com (DECRISTOFARO, 1997), estima-se que 50×10^9 kWh são dissipados anualmente nos EUA na forma de perdas nos núcleos magnéticos dos transformadores de distribuição, o que representa mais de 1,2% de toda energia consumida anualmente, considerando que o consumo energético em 2015 foi de 3.900,2 TWh. No Brasil, com base nos dados levantados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estima-se que 11×10^9 kWh são dissipados anualmente na forma de perdas nos núcleos magnéticos dos transformadores, o que representa mais de 2,0% de toda energia consumida anualmente, considerando que o consumo energético em 2015 foi de 524,6 TWh.

De acordo com (CHAVES, 2010), o Transformador de Distribuição de Metal Amorfo (TDMA) vem para diminuir as perdas técnicas no que diz respeito a perdas magnéticas no núcleo do transformador, que ocorrem principalmente devido à histerese magnética e às correntes de Foucault. Através de estudos práticos realizados, verificou-se que em média, a utilização do TDMA reduz em 75% as perdas magnéticas no núcleo do transformador (perdas em vazio) como se pode observar na Tabela 2.1.

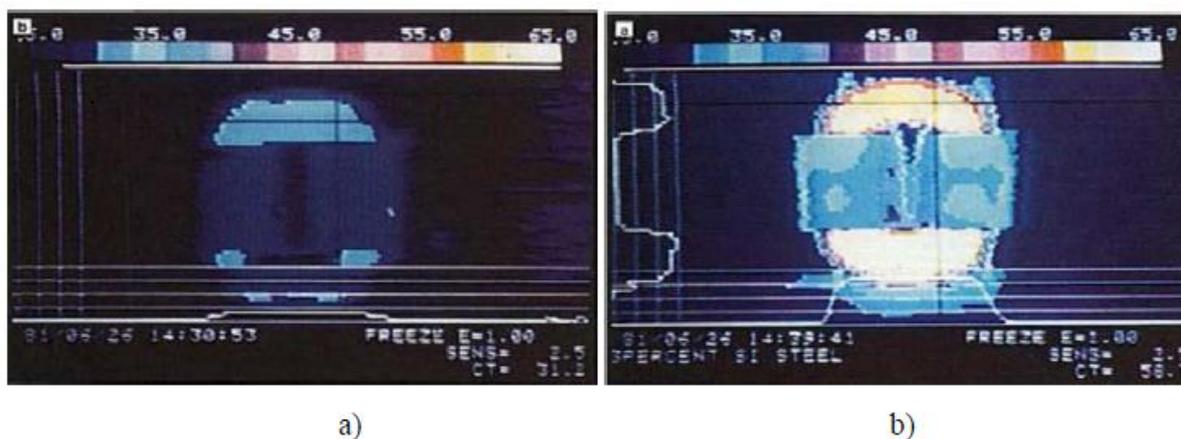
Tabela 2.1 - Comparativo de perdas por potência entre transformadores de metal amorfo e aço silício.

Potência (kVA)	Perdas em Vazio no Trafo com Aço Silício (W)	Perdas em Vazio no Trafo com Metal Amorfo (W)	Redução das Perdas em Vazio (%)
10 (1 fase)	60	12	80
15 (1 fase)	85	15	82
45 (3 fases)	220	50	77
75 (3 fases)	330	70	79
112,5 (3 fases)	440	92	79

Fonte: (CHAVES, 2010).

Além de possuir perdas a vázio muito inferiores se comparado aos núcleos magnéticos de aço silício, a utilização de núcleos magnéticos de metal amorfo possui uma menor corrente de excitação, reduz a elevação da temperatura como é verificado na Figura 2.1, reduz o consumo e o desperdício de energia, além disto, ocorre também a redução dos investimentos em geração de energia elétrica, possibilitando a realocação dos recursos de investimentos, que quando capitalizados, vem a ser menor que o custo de um transformador tradicional (PINA, 2010).

Figura 2.1 – Imagens térmicas dos núcleos de: a) Metal amorfo b) Aço Silício.



Fonte: (PINA, 2010).

De acordo com (B. X. Du e D. S. Liu, 2015), embora os transformadores de distribuição do núcleo de liga amorfa tenham a vantagem de menores perdas em relação aos transformadores de aço silício, um nível de ruído elevado é inevitável devido ao coeficiente de magnetostricção ser maior. No entanto, a redução do ruído de núcleos de transformadores é crucial para um ambiente de alta qualidade, deste modo comprovou-se que se pode eficazmente reduzir a vibração e ruído de núcleos de liga amorfa através de reforços mecânicos e revestindo a superfície do núcleo com uma camada de cola isolante. O ruído também sofre redução por método recozimento do metal amorfo, assim a força coercitiva e a magnetização residual serão reduzidas, consequentemente reduzindo o ruído.

Em 1996, o Prof. Dr. Benedito Antônio Luciano apresentou a uma fabricante de transformadores Brasileira a ideia de construir transformadores com núcleo de liga amorfa em escala industrial, utilizando núcleos fornecidos pela Allied Signal.

Foram montados inicialmente um lote de nove transformadores monofásicos com potência nominal de 15kVA, 13800V/220V, 60Hz, para instalação experimental nos sistemas de distribuição de concessionárias de energia elétrica do Nordeste brasileiro (CAMPOS, 2006).

Antes de serem instalados na zona rural do município de Massaranduba, no estado da Paraíba, os transformadores foram submetidos a ensaios em vazio e de curto-circuito de acordo com a norma ABNT-NBR 5380, conforme pode ser observado na tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Ensaios comparativos entre transformadores de metal amorfo e aço silício.

Ensaio	Núcleo de Metal Amorfo	Núcleo de aço silício GO	Valores garantidos pela NBR 5440
Perdas em Vazio (Núcleo)	14,7 W	84 W	85 W
Perdas no Cobre (Enrolamento)	286,5 W	266 W	-
Perdas totais	301,2 W	350 W	355 W
Corrente de Excitação	0,28%	2,90%	3,00%
Tensão de Curto-Circuito (75°)	2,47%	2,50%	2,50%

Fonte: (CAMPOS, 2006).

É possível perceber que o transformador com núcleo de metal amorfo possui as menores perdas quando comparado com transformadores idênticos, porém, construídos com núcleo de aço silício convencionais. A principal diferença se dá nas perdas em vazio, que ficaram cerca de 80% menores. Outra característica notável é a grande diferença na corrente de excitação, que acaba ficando muito inferior ao transformador de aço silício.

Um dos maiores protótipos de um transformador trifásico já construído utilizando núcleo de ferro amorfo corresponde a um transformador de 630 kVA, que pode ser observado na figura 2.2. Este transformador de distribuição foi ligado em 2005 à rede elétrica da cidade de Changji, na China por mais de dois meses sem falhas e funcionando de forma estável (ZHAO et al, 2007).

Figura 2.2 – Transformador trifásico de núcleo amorfo de 630kVA.



Fonte: (ZHAO et al, 2007).

De acordo com (W. SIMA et al, 2018), a corrente de *Inrush* é um dos transientes de baixa frequência mais comuns em sistemas de potência, que ocorre devido à saturação do núcleo de transformadores. Estas altas correntes podem prejudicar a vida útil do transformador, a qualidade da energia da rede e dispositivos de proteção. Os diferentes materiais dos núcleos magnéticos com diferentes características de magnetização tem um impacto sobre a indutância magnetizante do transformador e conseqüentemente sobre a corrente de *Inrush*.

2.1. NÚCLEOS MAGNÉTICOS

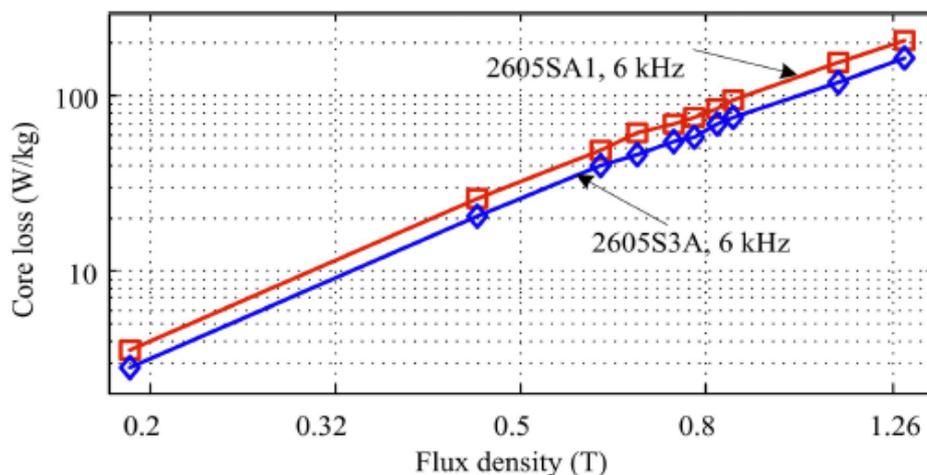
Diversos materiais são utilizados na confecção dos núcleos de transformadores, incluindo aços siliciosos, ligas amorfas e ligas nanocristalinas. Tendo em vista que as ligas amorfas são cada vez mais utilizadas em transformadores de distribuição de energia, devido às suas excelentes características e baixa perda, pouca atenção é dada ao seu dano potencial em relação a corrente de *Inrush*.

Para os transformadores com núcleo de aço silício de grão orientado e de grão não-orientado, as magnitudes das correntes de energização são cerca de 10 vezes maiores do que as correntes de pico nominal e cerca de 50 a 70 vezes a corrente nominal para os transformadores com núcleo de ligas amorfas. Assim, conclui-se que a aplicação de ligas amorfas em transformadores aumenta o risco operacional para quando há corrente de *Inrush* (W. SIMA et al, 2018).

A diminuição da saturação magnética das ligas amorfas (geralmente inferior a 1,7 T) em relação a saturação dos aços silícios (2,0 T) tem sido uma preocupação para alguns. Deve-se notar, no entanto, que a tendência em transformadores é diminuir induções operacionais a fim de aumentar os rendimentos (B. A. LUCIANO et al, 1999).

De acordo com (M. R. ISLAM et al, 2014), devido as características de qualidade superior, as fitas de metal amorfo a base de Fe foram utilizadas em diversas aplicações de alto rendimento. Em 2014, um conversor de média tensão utilizando amorfo em alta frequência foi validado e relatado com resultados satisfatórios. Através da figura 2.3 podem-se observar os valores de perdas magnéticas obtidos das ligas de metal amorfo Metglas 2605SA1 e 2605S3A, que são de material a base de ferro com saturação magnética na ordem de 1,56 e 1,41 T e perdas no núcleo de 7 W/kg em 6 kHz com excitação senoidal de 0,3 T. Para os transformadores de alta frequência e potência é desejável ter uma elevada saturação magnética para evitar grande volume e garantir baixa perda de núcleo para se obter uma elevada eficiência.

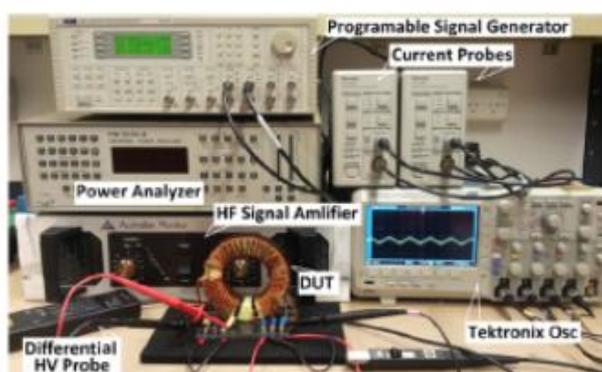
Figura 2.3 – Curva de perda do metal amorfo em 6kHz.



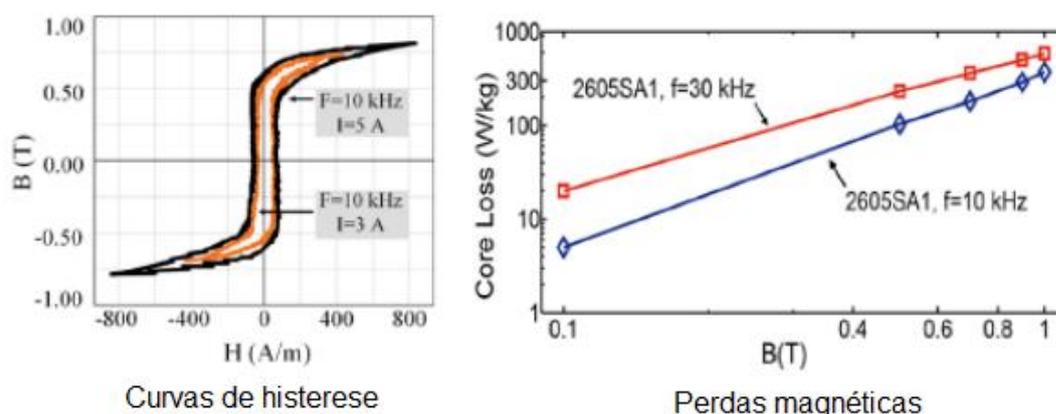
Fonte: (M. R. ISLAM et al, 2014)

De acordo com (M. JAFARI et al, 2017), as características mostram que os materiais nanocristalinos possuem menor perda de núcleo do que as ligas amorfas, entretanto a sua saturação magnética (0,8-1 T) é muito menor do que a de ligas amorfas, inviabilizando seu uso em algumas aplicações. Através de um experimento, os laços de histerese e as perdas do núcleo da liga de metal amorfo Metglas 2605SA1 foram medidos em 10 kHz e 30kHz. As formas de onda de excitação foram geradas por um gerador de forma de onda programável TTI TGA1244 e amplificado por um amplificador AM3002. O analisador de potência PM3000A é utilizado para medir as perdas de potência do transformador e a sonda de medição de corrente TCPA300 Tektronix e a sonda diferencial de alta tensão P5200 são usadas para observar as formas de onda do transformador conforme apresentado na figura 2.4.

Figura 2.4 – Experimento metal amorfo.



Bancada de testes



Fonte: (Adaptado de M. JAFARI et al, 2017).

Uma comparação entre a simulação e os resultados dos testes experimentais foi realizada com diferentes cargas dentro da gama de frequência média validando os resultados obtidos.

2.2. EMPREGOS DOS METAIS AMORFOS

Segundo (FLYUR R. ISMAGILOV et al, 2019), recentes avanços em eletrônica de potência, acionamentos elétricos e métodos de controle modernos permitem substituir sistemas hidráulicos, pneumáticos e mecânicos por acionamentos elétricos. Neste ponto de vista o conceito de aeronaves elétricas é a principal tendência para a próxima geração de aeronaves, sendo que a economia de combustível pode chegar a 4% e a diminuição dos custos operacionais pode ser de 18% em comparação com o esquema convencional. Para tanto, se faz necessário aumentar a confiabilidade e rendimento e reduzir o peso e o volume de dispositivos tais como conversores e fontes de alimentação.

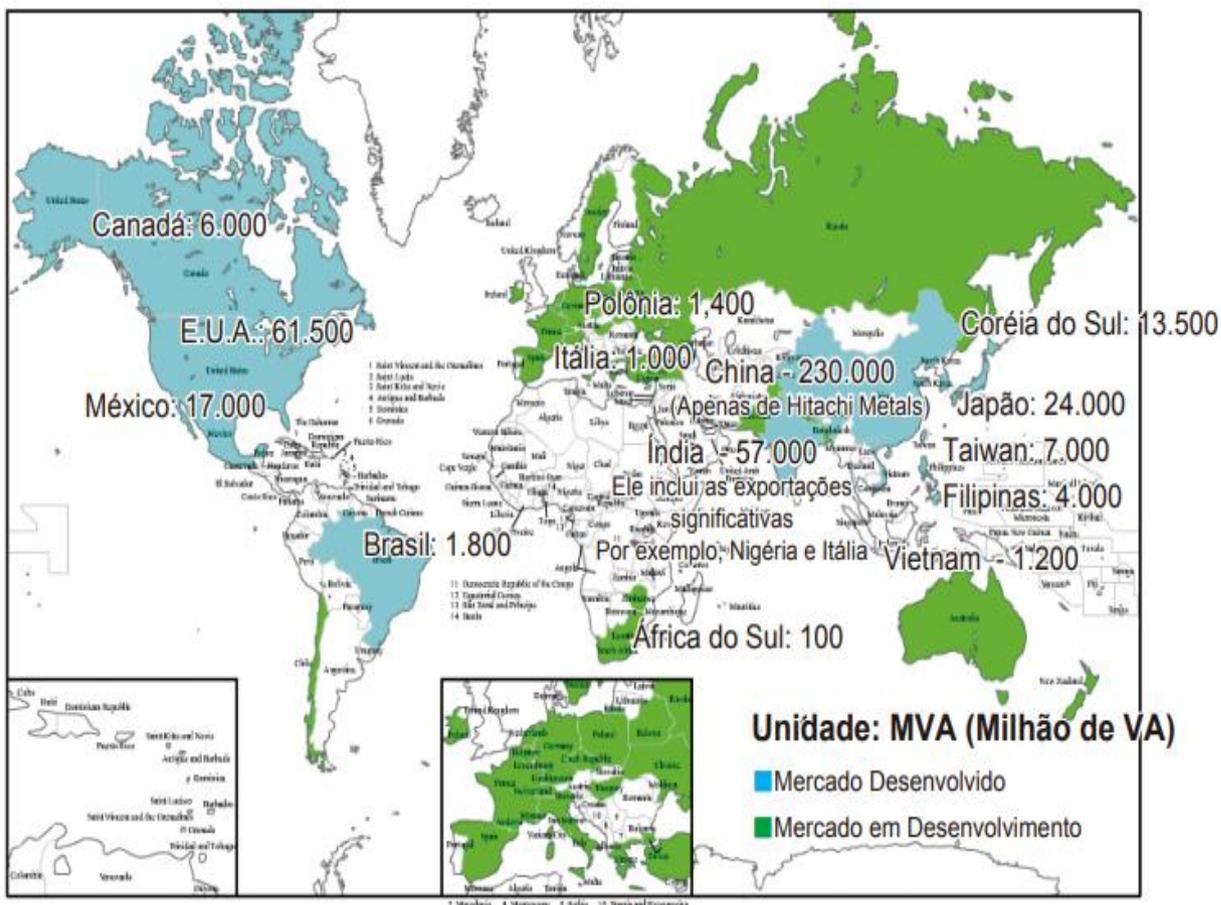
Novos núcleos com base em materiais amorfos e nanocristalinos permitem reduções de tamanho de indutores e transformadores na gama de frequência média, devido às suas densidades de fluxo mais elevada quando comparada com núcleos de ferrite. No entanto, aplicações de alta potência requerem empilhar vários núcleos desses materiais (devido às limitações de tamanho de núcleos comerciais) ou, quando possível, utilizam grandes núcleos personalizados e caros para satisfazer os requisitos do produto (O. ALDOSARI et al, 2018).

De acordo com (MIN CHEN et al, 2003), Mostra-se a partir de resultados experimentais que a uma temperatura de 77 K a saturação magnética do metal amorfo é de cerca de 0,3 T menor do que a do aço silício de grão orientado, e a perda de material amorfo é 4 vezes menor. Em comparação com os valores em temperatura ambiente, a saturação magnética, a perda de energia, a magnetização, a remanência magnética e a força coerciva aumentam a 77 K. Aparentemente as desvantagens da perda de potência superam os efeitos do aumento da saturação magnética quando a densidade de fluxo está abaixo da densidade de fluxo de saturação. A razão pode ser que a taxa do aumento da saturação magnética é menor do que a da perda de potência. Por exemplo, em 1,7 T, 77 K, a saturação magnética do aço silício aumenta de 3,6%, ao passo que a perda de potência aumenta 19%.

Na figura 2.5, é possível observar um levantamento da capacidade instalada de transformadores com núcleo de metal amorfo ao redor do mundo, realizado em 2015 por uma das principais fabricantes de metais amorfos do Mundo, HITACHI METALS.

Através da figura verifica-se que a China já se tornou o maior mercado desenvolvido, seguidos pelos EUA, Índia e Japão.

Figura 2.5 – Capacidade instalada de transformadores amorfos por País.



Fonte: (HITACHI METALS, 2009)

Conforme levantamentos realizados em 1993, o total de transformadores de distribuição fabricados com metal amorfo instalados no Mundo já ultrapassava 125 mil unidades, sendo a maioria localizada nos EUA e Japão. Outros países como Alemanha, Irlanda, Itália, Reino Unido e Canadá também já possuem unidades instaladas (CAMPOS, 2006).

É perceptível que o Brasil ainda possui um mercado desenvolvido de transformadores de metal amorfo muito inferior se comparado às grandes nações, entretanto, a demanda por produtos e máquina de maiores eficiências vem crescendo rápido e a substituição dos transformadores convencionais de aço silício por transformadores mais eficientes é um caminho a ser percorrido.

Atualmente, os EUA já possuem cerca de 10% de todos os seus transformadores de distribuição instalados com núcleo de metal amorfo, isto é equivalente a mais de 1 milhão de unidades. O critério de aplicação dos transformadores com núcleos amorfos é o da definição de áreas nas quais os transformadores irão operar por longos períodos em condições à vazio ou pouca carga, como ocorre com mais frequência em zonas rurais ou urbanas mais afastadas dos grandes centros (CAMPOS, 2006).

2.3. VIABILIDADE ECONÔMICA

De acordo com SILVA (2015), o tempo de retorno do investimento para utilização do transformador com núcleo amorfo e óleo vegetal ao invés do transformador de distribuição convencional, considerando a taxa de atratividade de 7% ao ano e o valor de 0,4 R\$/kWh, foi de 5,7 anos.

Segundo BARROS (2011), pode ser observado que, para o transformador de 75 kVA, ao término de 20 anos, que é sua vida útil média, a economia será de R\$4.470,00. Vale ressaltar que quanto menor o fator de carga do local onde o transformador está instalado, maior será a economia gerada por ele, pois o fator de carga mede a ociosidade do sistema, e as menores perdas do TDMA ocorrem quando está operando a vazio.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão explicados conceitos fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Foi realizado um levantamento dos conceitos mais relevantes dos materiais magnéticos e dos princípios de funcionamento dos transformadores, bem como aborda temas como a curva de magnetização, o ciclo de histerese magnética e as perdas características dos transformadores.

3.1. MATERIAIS MAGNÉTICOS

A grande quantidade de materiais magnéticos existentes apresenta uma grande variação quando se comparada à facilidade com que os mesmos se magnetizam. Se aplicar um baixo valor de campo magnético e o material atingir a saturação, este é chamado de magneticamente macio. Por outro lado, se um dado material necessitar de valores de campo magnético muito elevado para atingir a saturação, este é chamado de magneticamente duro (MAURÍCIO, 2014).

Os materiais ferromagnéticos com permeabilidade (μ) muito maior que a permeabilidade do ar (μ_0) são utilizados na construção dos núcleos magnéticos de transformadores. Outras características como reduzidas perdas magnéticas, reduzidas forças coercitivas (H_c) e elevada saturação magnética são fundamentais na escolha dos materiais para a construção do núcleo magnético. O ferro puro (Fe) possui seu ponto de saturação em 2,12 T, um dos valores mais elevados já encontrados, contribuindo na redução da força coercitiva e das perdas magnéticas (VLACK e LAWRENE, 1970).

3.1.1. Aço silício

No início do século XX, Hadfield *et al*, estudando as propriedades eletromagnéticas das ligas ferro-silício (Fe-Si), verificaram que a resistividade do Fe era bastante aumentada com a adição do silício, o que contribuía para a redução das perdas causadas pela corrente de Foucault (CAMPOS, 2006).

A adição do silício ao ferro gera alguns efeitos nas propriedades magnéticas dos materiais, tais como (CULLITY & GRAHAM, 2009):

- aumento da resistividade elétrica, o que origina uma grande redução nas perdas por correntes de Foucault e por consequência nas perdas magnéticas;
- a diminuição da magnetostricção conduz a menores variações dimensionais durante o processo de magnetização e desmagnetização e a uma menor sensibilidade das propriedades magnéticas;
- diminui a indução de saturação e tende a tornar o material mais frágil, o que faz com que o processo de produção se torne mais dificultoso.

A partir deste estudo, teve início todo o desenvolvimento para a fabricação do aço silício. O primeiro aço desenvolvido foi o aço silício de grãos não orientados (GNO), no qual a estrutura cristalina não possui uma orientação definida, facilitando a passagem do fluxo magnético em qualquer direção.

Em 1934, Norman Goss desenvolveu um método de produção de chapas de aço silício de grãos orientados (GO), cuja a estrutura cristalina possui uma direção preferencial a passagem do fluxo magnético, amplificando assim o seu uso em transformadores (CAMPOS, 2006).

Os detalhes do processo de fabricação dos aços de grão orientado podem variar de acordo com cada fabricante, no entanto, os passos essenciais para sua produção são os seguintes (CULLITY & GRAHAM, 2009):

- laminação a frio, existindo uma redução de 50% na espessura final no material.
- recristalização e descarbonatação a 800° C em hidrogénio húmido.
- recozimento em hidrogénio seco a 1100-1200° C de modo a produzir a textura de recristalização secundária.

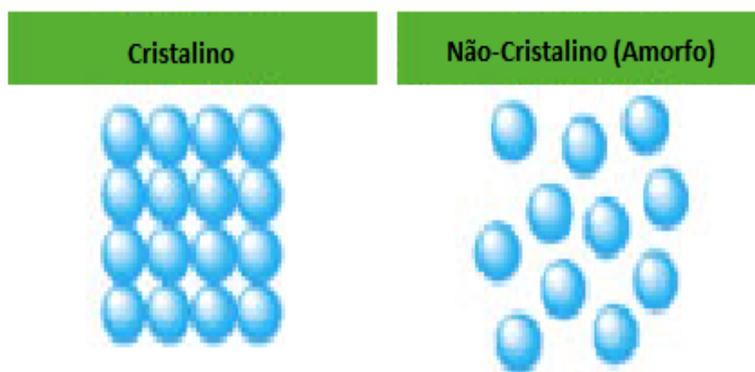
A produção de aço silício GNO no Brasil teve início no final do ano de 1957 e o aço silício GO teve início a partir de 1973. O custo de fabricação do aço GO chega a ser 4 vezes maior que a fabricação do GNO, impossibilitando a utilização do mesmo em aplicações de baixo custo (APERAN [ONLINE], 2019).

3.1.2. Metal amorfo

Os metais comuns possuem uma estrutura cristalina regular e periódica, o que dificulta a magnetização devido a fronteira não cristalina do grão. Por outro lado, os metais amorfos formam um grupo de materiais metálicos não cristalinos,

conforme pode ser observado na figura 3.1, que se caracterizam por não possuírem uma estrutura atômica ordenada, fazendo com que o processo de magnetização seja mais fácil, resultando em perdas magnéticas inferiores se comparados aos aços silícios.

Figura 3.1 - Estruturas cristalinas e não cristalinas.



Fonte: (CAMPOS, 2006).

Na figura 3.2 é possível observar as etapas do processo de fabricação do metal amorfo, que possui seu princípio básico na rápida solidificação a partir do seu estado fundido, injetando o metal no estado líquido de forma contínua numa superfície em movimento, com taxas de arrefecimento elevadas para evitar a cristalização (BARROS, 2011).

Figura 3.2 – Processo de fabricação do metal amorfo.



Fonte: (BARROS, 2011).

O produto resultante deste processo é uma fita com alguns centímetros de largura, uma espessura por norma entre 25-35 μm e um comprimento que pode variar entre alguns metros até alguns quilômetros. As ligas amorfas necessitam passar por uma fase de recozimento, não só para minimização de perdas e potência de magnetização, como também para reduzirem a anisotropia magnética (CHAVES, 2010).

3.2. METAL AMORFO EM TRANSFORMADORES

O desenvolvimento das ligas de metal amorfo para uso em núcleos de transformadores teve início em 1975. A liga $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ (METGLAS 2605) foi a primeira liga do sistema binário Fe-B a apresentar indução de saturação superior a 1,5 T e atualmente mais utilizada é a liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ (CAMPOS, 2006).

É possível observar na Tabela 3.1 que a liga $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ se mostra mais adequada ao uso em núcleos de transformadores pelo seu conjunto de propriedades. Segundo CULLITY & GRAHAM (2009), nessa liga os átomos são distribuídos aleatoriamente, sendo que esta liga exhibe baixas perdas e ganha excelentes propriedades magnéticas.

Tabela 3.1 - Desenvolvimento das ligas Amorfas.

Composição (% at.)	$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$	$\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_6$	$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$	$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	FeSi (GO)
Ano de introdução no mercado	1976	1978	1979	1980	1935
Indução de saturação (T)	1,60	1,61	1,61	1,58	1,89
Força coerciva (A/m, <i>as-cast</i>)	8,0	-	6,4	4,0	-
Força coerciva (A/m, <i>annealed</i>)	-	2,4	3,0	1,6	10,0
Temperatura de Curie (°C)	374	374	370	420	-
Temperatura de cristalização (°C , 20 K/min)	390	472	480	560	-

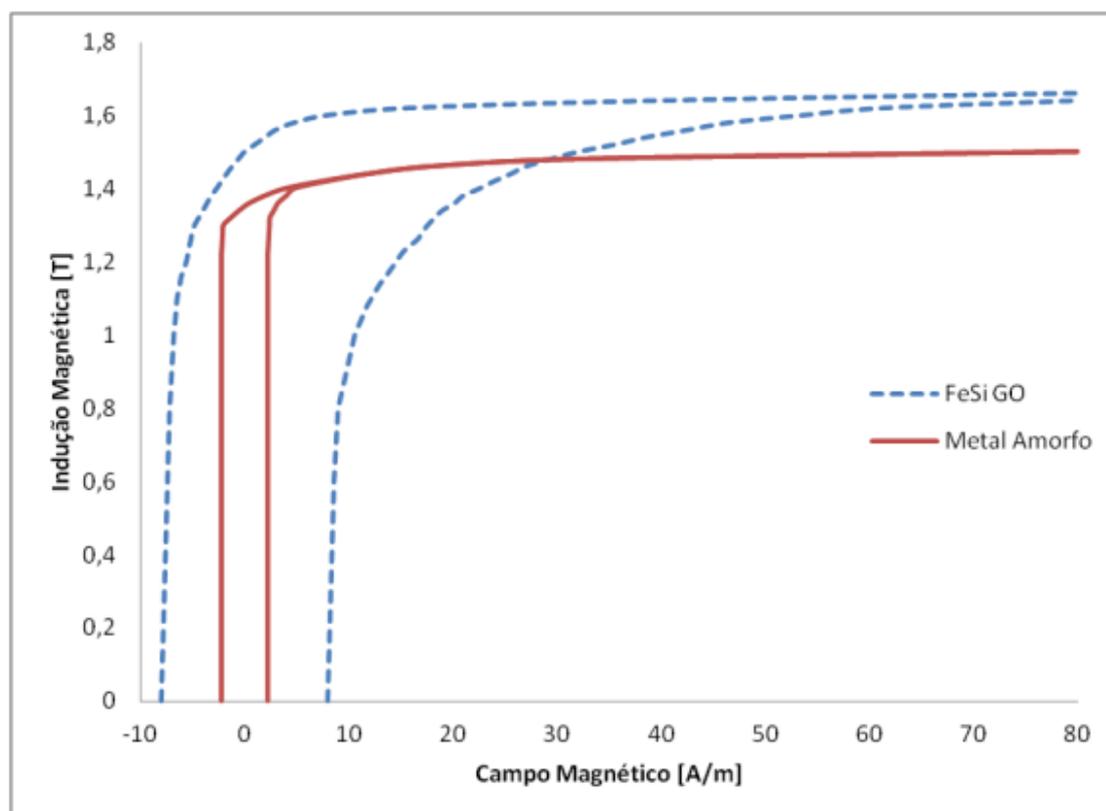
Fonte: (CULLITY & GRAHAM, 2009).

Apesar das ligas amorfas já terem entrado em produção industrial, os transformadores com estes materiais ainda possuem um custo em torno de 20% superior comparado com o custo de um transformador tradicional.

De acordo com CAMPOS (2006), as principais características destas ligas que influenciam diretamente nos transformadores são:

- 1) Curvas de magnetização: A capacidade de magnetização de um material é expressa pela relação entre densidade de fluxo magnético B e a intensidade de campo magnético H . Os núcleos amorfos apresentam características magnéticas extremamente favoráveis para a indução magnética, apresentando um ciclo de histerese estreito e uma elevada permeabilidade. Na figura 3.3 é possível comparar a curva de magnetização da liga amorfa Fe80B11Si9 com a curva de magnetização do aço silício de grão orientado e verificar que existem variações entre as mesmas, principalmente na área do ciclo de histerese e na indução de saturação.

Figura 3.3 – Curva de magnetização de uma liga amorfa e de um aço silício de grão orientado.



Fonte: (Adaptado de CAMPOS, 2006).

- 2) Espessura das lâminas: As lâminas que formam os núcleos de metal amorfo têm uma espessura aproximadamente 10 vezes menor em relação ao aço silício convencional utilizado na fabricação dos núcleos ferromagnéticos, o que diminui bastante as perdas de Foucault. Deste modo se faz necessário um maior número de lâminas para formar o núcleo do transformador, o que implica em um aumento nos custos de produção.
- 3) Desgaste do ferramental: O metal amorfo possui maior dureza se comparado com os aços usado nos transformadores convencionais, portanto, as ferramentas usadas sofrem um desgaste mais rápido, elevando assim o custo dos transformadores com núcleos amorfos.
- 4) Fator de empilhamento: A grande dureza mecânica, baixa espessura e a superfície rugosa das lâminas faz com que o ferro amorfo possua um fator de empilhamento baixo, na ordem dos 80%, em comparação com os núcleos de aço silício, que possuem um fator de empilhamento na ordem dos 95%. Isto significa que para uma mesma área geométrica, a seção magnética do metal amorfo será 15% inferior a seção magnética do aço silício.
- 5) Indução e saturação: Os materiais amorfos geralmente possuem uma composição de 80% de ferro e 20% de boro, o que torna a indução de saturação aproximadamente 20% menor para a mesma temperatura se comparado a outros materiais usados na fabricação de núcleos ferromagnéticos. Este fator implica na necessidade de um aumento da seção de material amorfo para se obter a mesma quantidade de fluxo magnético se comparado ao aço silício.
- 6) Magnetostricção: À alteração das dimensões físicas de um material magnético quando se encontra magnetizado dá-se o nome de magnetostricção. As ligas amorfas exibem uma magnetostricção semelhante à dos aços silício, bem como semelhantes níveis de ruído.
- 7) Volume físico: O aumento da seção do núcleo do transformador, devido a uma menor indução de saturação e um menor fator de empilhamento, faz com que o

volume dos transformadores com núcleo de ferro amorfo aumente cerca de 15% comparado com os transformadores com núcleo de aço silício.

- 8) Corrente de magnetização: Uma das grandes vantagens dos transformadores com núcleos de ferro amorfo é a baixa corrente de magnetização, em comparação com os transformadores convencionais de aço silício.

3.3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE UM TRANSFORMADOR IDEAL

De acordo com COLTMAN (2002), em 1820 o físico dinamarquês Hans Christian Oersted, mostrou que uma corrente eléctrica que flui através de um material condutor, gerava um campo magnético em torno do mesmo. Nesta época pensava-se que a eletricidade e o magnetismo eram forças separadas e independentes.

Em 1831, Michael Faraday demonstrou que para um campo magnético induzir uma corrente em um condutor o campo deve sofrer uma variação e essa interação entre eletricidade e magnetismo veio a ser conhecida como indução eletromagnética. Através da figura 3.4 pode-se observar o transformador criado por Faraday.

Figura 3.4 – Transformador original de Faraday.



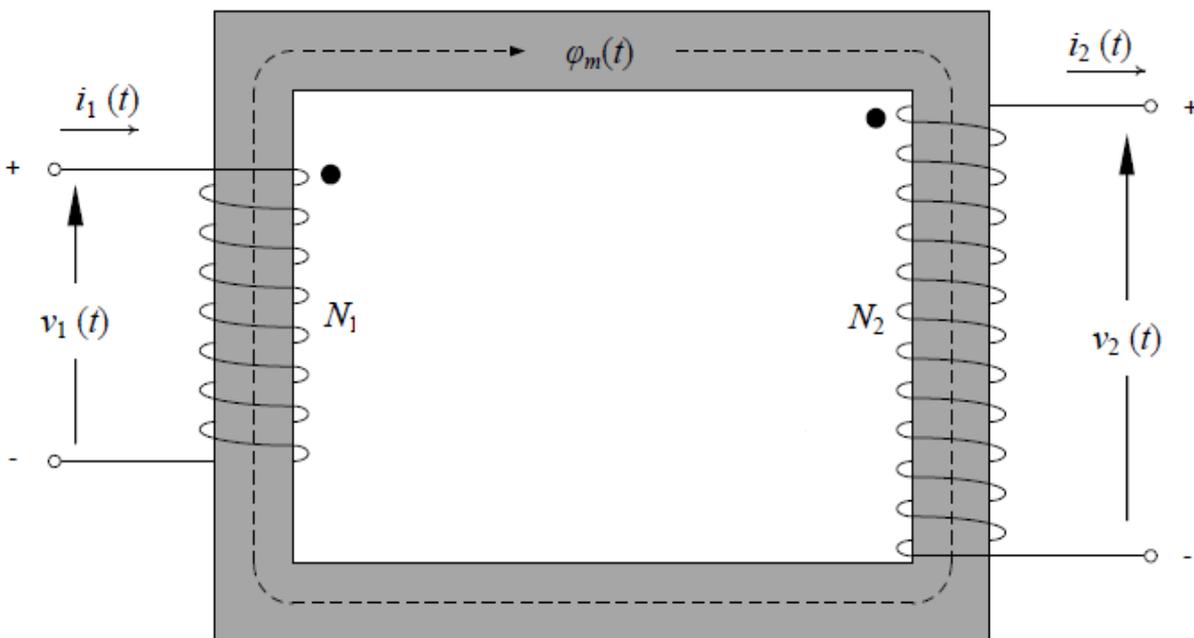
Fonte: (COLTMAN, 2002)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas o transformador é definido como um equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternada em outro sistema de tensão e corrente alternadas, de valores geralmente diferentes, mas à mesma frequência.

O transformador ideal, teoricamente, é capaz de transferir toda a potência absorvida pelo enrolamento primário para o enrolamento secundário, onde enrolamento primário é o nome dado ao enrolamento que será conectado a fonte e enrolamento secundário é o nome dado ao enrolamento que será conectado a carga. Para isso entende-se que todas as perdas decorrentes da operação devem ser desprezadas, ou seja, resistência dos condutores desprezíveis, fluxo magnético confinado no núcleo enlaçando totalmente os enrolamentos, perdas no núcleo desprezíveis e permeabilidade magnética infinita.

Na figura 3.5, pode ser observada a representação de um transformador ideal com a concepção de núcleo do tipo envolvido com dois enrolamentos. Sendo o primeiro enrolamento constituído por N_1 espiras e o segundo enrolamento constituído por N_2 espiras.

Figura 3.5 – Transformador ideal.



De acordo com a Lei de Faraday, na condição ideal pode-se considerar que a tensão no primário é dada por:

$$v_1(t) = N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (3.1)$$

E a tensão no secundário é dada por:

$$v_2(t) = N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Como no caso ideal as perdas são desconsideradas, pode-se dizer que a força eletromotriz primária é igual à tensão aplicada no primário e que a força eletromotriz secundária é igual à tensão no secundário. Portanto, a relação entre a tensão no primário e a tensão no secundário é:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt}}{N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt}} \quad (3.3)$$

Simplificando a equação (3.3), tem-se:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.4)$$

No caso do transformador ideal, a potência de entrada deve ser igual à potência de saída, o que equivale dizer que:

$$v_1(t) \cdot i_1(t) = v_2(t) \cdot i_2(t) \quad (3.5)$$

Onde: $V_1(t)$ é a tensão no enrolamento primário; $V_2(t)$ é a tensão no enrolamento secundário; $i_1(t)$ é a corrente que circula no enrolamento primário; $i_2(t)$ é a corrente que circula no enrolamento secundário;

Ainda desta relação, pode-se rearranjar a equação (3.5) e aplicar a equação (3.4), que resulta em:

$$N_1 i_1(t) = N_2 i_2(t) \quad (3.6)$$

A partir das equações (3.4) e (3.6), observa-se que a transformação da tensão é diretamente proporcional à relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário. Já a transformação de corrente obedece a razão inversa à relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário.

A relação entre a tensão aplicada ao primário e a tensão induzida no secundário é chamada de relação de transformação k_v , e pode ser descrita por:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = k_v \quad (3.7)$$

Sendo que, quando a tensão do primário for superior à tensão do secundário ($k_v > 1$), o transformador é denominado abaixador e quando a tensão do primário for inferior à tensão do secundário ($k_v < 1$), o transformador é denominado elevador. Tal equação somente é válida para valores diferentes de zero.

Segundo CHAPMAN (2005), a impedância da carga Z_2 pode ser substituída por outra impedância Z'_2 conectada ao primário, este procedimento consiste em referir a impedância ao primário do transformador sem que haja mudança no comportamento do circuito, e acaba se tornando uma ferramenta muito útil para simplificação e solução de circuitos envolvendo transformadores.

Portanto, a impedância da carga Z'_2 referida ao primário pode ser calculada por:

$$Z'_2 = k_v^2 Z_2 \quad (3.8)$$

Apesar da grande facilidade de compreensão teórica que o transformador ideal proporciona, sabe-se que na realidade o mesmo não poderia ser feito.

3.4. O TRANSFORMADOR REAL

Neste tópico será analisado o transformador real, ou seja, envolvendo todas as perdas e demais fenômenos decorrentes de sua operação em regime permanente e à frequência industrial.

3.4.1. Perdas

Ao contrário do transformador ideal analisado no anterior, o transformador real possui perdas decorrentes de sua operação, fazendo com que a potência de saída seja diferente da potência de entrada. Existem três principais perdas que afetam o transformador, sendo elas:

- a) Perdas nos enrolamentos: Trata-se da dissipação de potência na forma de calor, devido ao efeito Joule, isto ocorre quando uma corrente circula pelos condutores, pois os mesmos possuem uma resistência própria e não nula. A mesma pode ser obtida por:

$$P_J = I^2 \cdot R_{Eq} \quad (3.9)$$

Onde: P_J são as perdas no enrolamento, em watts; I , é o valor eficaz da corrente que circula no enrolamento em amperes; R_{Eq} , a resistência equivalente do enrolamento em ohms.

- b) Perdas de Foucault: Quando o núcleo magnético do transformador é submetido a um fluxo variante no tempo, começam a circular corrente no seu interior, também conhecidas como correntes parasitas, provocando perdas por efeito Joule. De acordo com BASTOS (2004), as perdas devido ao efeito das correntes parasitas podem ser calculadas por:

$$P_F = k_F \cdot f^2 \cdot B_M^2 \cdot h^2 \quad (3.10)$$

Onde: P_F são as perdas por correntes parasitas, em W/kg; f , a frequência em Hz; BM , a indução em Wb/m²; h , a espessura da chapa, em m; k_F , é uma constante que depende do material.

Através da equação (3.10), pode-se observar que as perdas estão relacionadas com o quadrado da espessura do núcleo, portanto, a utilização de lâminas menos espessas contribui muito para redução das perdas por Foucault. Outra forma de reduzir tal perda é a utilização de lâminas eletricamente isoladas entre si, tal isolamento geralmente é feita através do recozimento do metal, formando uma camada superficial dielétrica (MEURER, 2005);

- c) Perdas por histerese: Está associada ao alinhamento dos domínios magnéticos do material ferromagnético do núcleo. Ao aplicar uma força magnetizante, os domínios se alinham com o campo aplicado. Ao invertemos o sentido do campo, os domínios também inverterão sua orientação. Nos transformadores, o campo magnético muda de sentido constantemente de acordo com a frequência da rede, e o mesmo ocorre com os domínios do núcleo. Para inverter sua orientação, os domínios precisam superar o atrito e a inércia, ao fazer isso dissipam certa quantidade de potência na forma de calor.

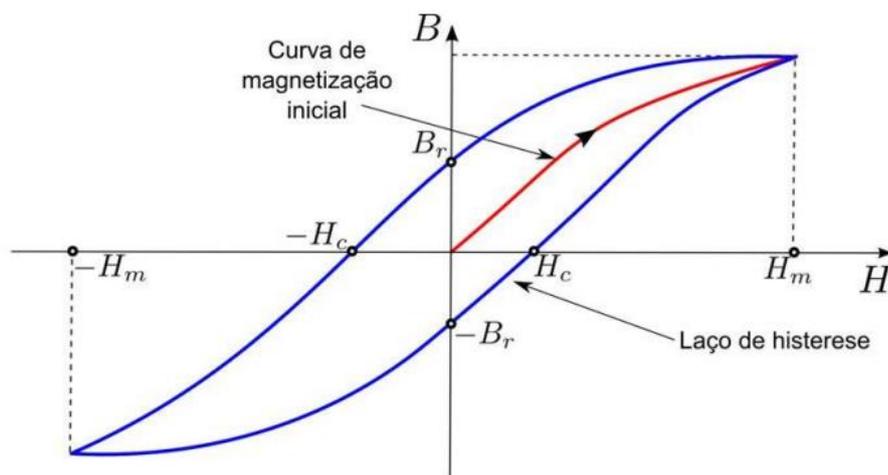
De acordo com BASTOS (2004), em uma amostra de material ferromagnético as perdas por histerese são proporcionais à área do ciclo de histerese, obtido em regime quase-estático, ou seja a potência perdida por ciclo será:

$$P_H = f \cdot V \oint H dB \quad (3.11)$$

Onde: P_H são as perdas pelo efeito de histerese, em W; $\oint H dB$ é a densidade volumétrica de energia no ciclo, em J/m³; f , a frequência de ensaio em Hz; V , é o volume da amostra em m³.

Através da figura 3.6, pode-se observar o laço de histerese, que é formado pela relação entre a densidade de fluxo magnético B e o campo magnético H , que estão confinados no núcleo.

Figura 3.6 – Laço de histerese.



- B_r campo remanente (B para $H=0$)
- H_c força coercitiva (H necessário para desmagnetizar o material)
- H_m é o valor máximo de H analisado

Fonte: (BASTOS, 2004)

Quando a força magnetomotriz é removida, o fluxo no núcleo não zera. Isto porque um campo magnético ainda permanece no núcleo. Esse campo magnético é denominado fluxo residual do núcleo. Para que o fluxo seja zerado, um valor de força magnetomotriz conhecido como força magnetomotriz coercitiva F_c deve ser aplicado ao núcleo no sentido oposto.

Segundo BASTOS (2004), A área de laço de histerese para materiais utilizados em máquinas elétricas pode ser aproximada pela seguinte equação empírica desenvolvida por Steinmetz:

$$P_H = K_h \cdot B_{max}^n \cdot f \quad (3.12)$$

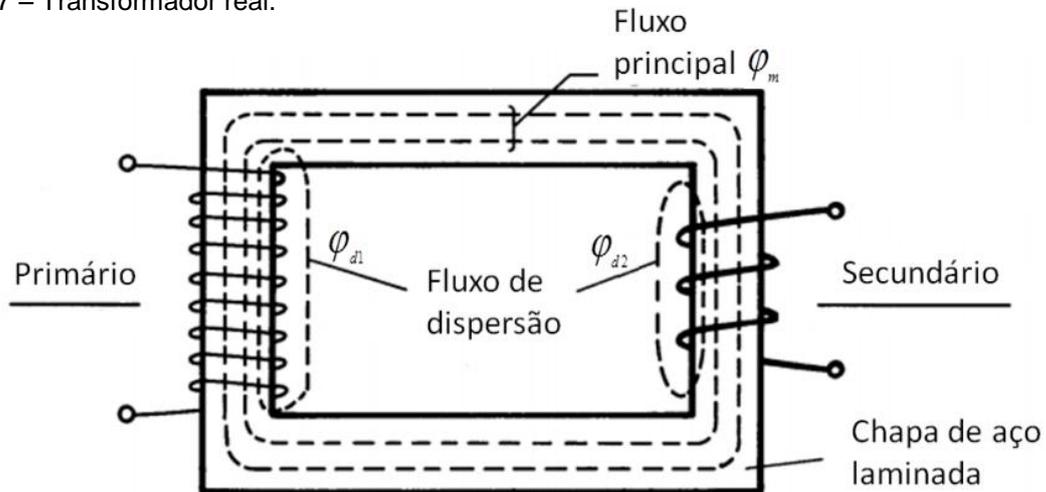
Onde: P_H são as perdas pelo efeito de histerese, em W; n e K_h , são constantes que depende do material magnético, sendo obtidos a partir de testes em laboratório; B_{max} , é a máxima densidade de fluxo, em Wb/m²; f , a frequência de ensaio em Hz.

3.4.2. Fluxo magnético de dispersão

No caso do transformador ideal, foi considerado que todo o fluxo magnético ficasse confinado no núcleo enlaçando totalmente os enrolamentos, mas na realidade existe dispersão de certa quantia deste fluxo, o qual se fecha no ar ao redor do enrolamento.

Na figura 3.7, pode-se observar um transformador monofásico com o enrolamento primário sobre uma coluna e o enrolamento secundário sobre outra, sendo φ_m o fluxo principal canalizado no núcleo, φ_{d1} o fluxo disperso primário e φ_{d2} o fluxo disperso secundário.

Figura 3.7 – Transformador real.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Como o fluxo disperso passa pelo ar, o mesmo não está sujeito à saturação e acaba se mantendo quase proporcional a corrente que o produz. Portanto, sendo L_1 um coeficiente de proporcionalidade, tem-se:

$$\varphi_{d1} = L_1 I_1 \quad (3.13)$$

A variável L_1 constitui a indutância de dispersão primária e corresponde a reatância de dispersão primária, dada por:

$$X_1 = \omega L_1 \quad (3.14)$$

A mesma análise pode ser feita para o enrolamento secundário, considerando L_2 a indutância de dispersão secundária, o fluxo disperso no secundário é dado por:

$$\varphi_{d2} = L_2 I_2 \quad (3.15)$$

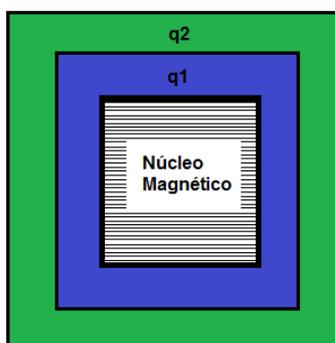
Resultando em uma reatância de dispersão secundária X_2 , conforme abaixo:

$$X_2 = \omega L_2 \quad (3.16)$$

Os valores das reatâncias de dispersão, para uma dada frequência, dependem dos fluxos de dispersão, portanto, dependem do tipo e da posição recíproca dos enrolamentos. Deste modo, os fluxos dispersos serão maiores quanto mais longe entre si estiverem os dois enrolamentos, portanto, a disposição dos enrolamentos em colunas distintas, conforme figura 3.8, produz mais dispersões e por esta razão é pouco utilizada.

Para evitar grande dispersão do fluxo, é comum dispor o enrolamento primário (q_1) ao redor do núcleo e o enrolamento secundário (q_2) ao redor do enrolamento primário, conforme se observa na figura 3.8.

Figura 3.8 – Enrolamento concêntrico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

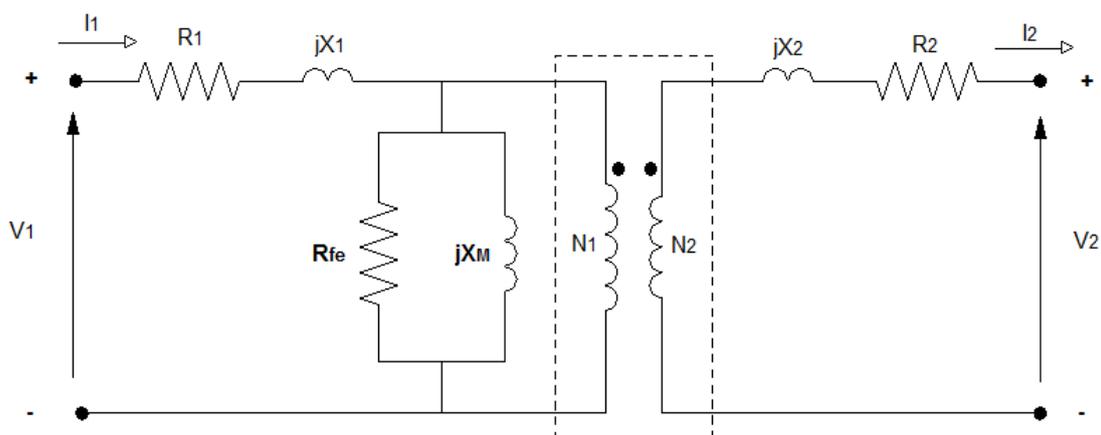
3.5 ANÁLISE DO TRANSFORMADOR

Para realização de estudos de desempenho dos transformadores existem basicamente duas maneiras distintas: a primeira delas consiste na análise e simulação através da construção de um circuito equivalente que possibilite calcular os parâmetros mais importantes e verificar o funcionamento do transformador real e a segunda é pela realização de ensaios práticos.

3.5.1. Circuito equivalente do transformador

Neste tópico será abordada a análise através do circuito equivalente, começando pelo modelo preciso do transformador real, conforme figura 3.9.

Figura 3.9 – Circuito equivalente do transformador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

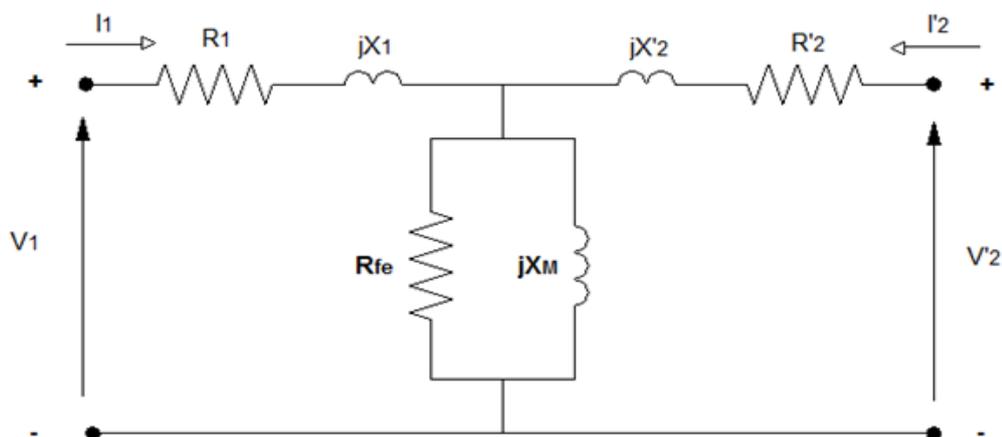
O modelo consiste em um núcleo de um transformador ideal, em série com R_1 e R_2 , que representam as resistências do enrolamento primário e secundário, respectivamente. Em série com as resistências, tem-se a reatância de dispersão do primário X_1 e a reatância de dispersão do secundário X_2 . Em paralelo com o enrolamento primário N_1 , ainda é possível identificar a resistência equivalente das perdas no ferro R_{fe} e a reatância magnetizante X_M que introduz o efeito da corrente de magnetização, necessária para estabelecer o fluxo magnético.

Apesar deste modelo representar os fenômenos mais importantes do funcionamento do transformador, a solução deste circuito torna-se mais complexa do

que o necessário. Para facilitar os cálculos, é possível e aconselhado, referir todas as variáveis de um lado do circuito equivalente para o outro.

Por meio da figura 3.10, pode-se verificar o circuito equivalente do transformador referido ao primário.

Figura 3.10 – Circuito equivalente do transformador referido ao primário.

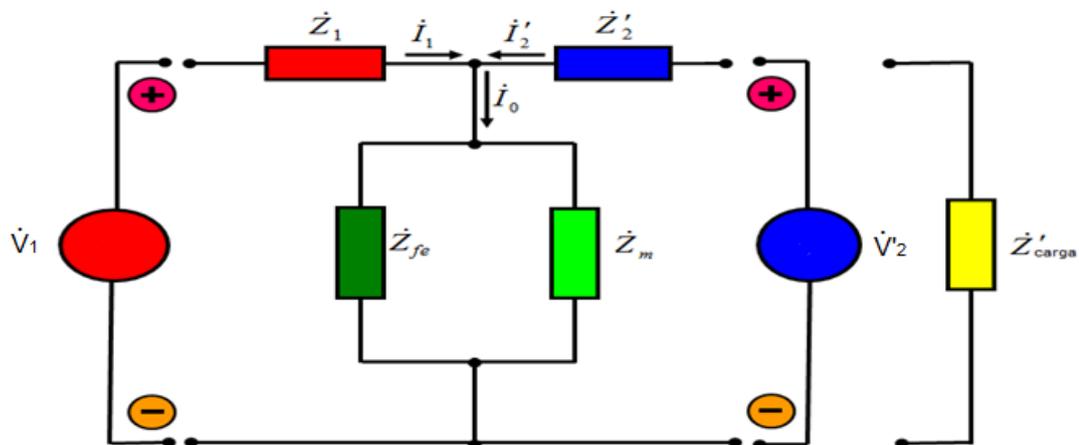


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Nada impede que se refira o circuito equivalente ao enrolamento secundário ao invés do primário, porém, é menos usual, já que o número de variáveis a serem referidas é maior devido ao ramo magnetizante.

O circuito equivalente do transformador mostrado na figura 3.10, também pode ser representado na forma de fasores, conforme figura 3.11.

Figura 3.11 – Circuito equivalente em forma de fasores.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Assim tem-se a constante de transformação das tensões:

$$k_V = \frac{V'_2}{V_2} \quad (3.17)$$

Sendo a constante de transformação das correntes dada por:

$$k_I = \frac{I'_2}{I_2} \quad (3.18)$$

E a constante de transformação das impedâncias por:

$$k_Z = \frac{Z'_2}{Z_2} \quad (3.19)$$

Em seguida, baseando-se no circuito equivalente da figura 3.10 definem-se as impedâncias do transformador, sendo a impedância do enrolamento primário dada por:

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.20)$$

A impedância do secundário referida ao primário:

$$\dot{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2 \quad (3.21)$$

A impedância de perdas no ferro:

$$\dot{Z}_{fe} = R_{fe} + j0 \quad (3.22)$$

A impedância magnetizante:

$$\dot{Z}_M = 0 + jX_M \quad (3.23)$$

A impedância equivalente do ramo em vazio:

$$\dot{Z}_0 = \frac{\dot{Z}_{fe} \cdot \dot{Z}_M}{\dot{Z}_{fe} + \dot{Z}_M} \quad (3.24)$$

A impedância equivalente do transformador:

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_0 \cdot (\dot{Z}'_2 + \dot{Z}'_{carga})}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}'_2 + \dot{Z}'_{carga}} \quad (3.25)$$

Onde a impedância da carga referida ao primário é dada por:

$$\dot{Z}'_{carga} = R'_{carga} + jX'_{carga} \quad (3.26)$$

O valor eficaz da corrente do enrolamento primário:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_{eq}} \quad (3.27)$$

O valor eficaz da corrente do ramo em vazio:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1}{\dot{Z}_0} \quad (3.28)$$

O valor eficaz da corrente magnetizante:

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1}{\dot{Z}_M} \quad (3.29)$$

O valor eficaz da corrente do enrolamento secundário referida ao primário:

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - \dot{I}_1 \quad (3.30)$$

O valor eficaz da tensão no enrolamento primário:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_1 + j.0 \quad (3.31)$$

O valor eficaz da tensão no enrolamento secundário referida ao primário com o circuito aberto:

$$\dot{V}'_2 = \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1 \quad (3.32)$$

O valor eficaz da tensão no enrolamento secundário referida ao primário nos terminais da carga:

$$\dot{V}'c_2 = \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1 + \dot{I}'_2 \cdot \dot{Z}'_2 \quad (3.33)$$

A potência aparente do enrolamento primário:

$$\dot{S}_1 = \dot{P}_1 + j \cdot \dot{Q}_1 = \dot{V}_1 \cdot \dot{I}_1^* \quad (3.34)$$

Onde: \dot{I}_1^* representa o conjugado complexo da corrente primaria \dot{I}_1 .

A potência ativa do enrolamento primário:

$$\dot{P}_1 = \dot{S}_1 \cdot \cos \phi_1 \quad (3.35)$$

E a potência reativa do enrolamento primário:

$$\dot{Q}_1 = \dot{S}_1 \cdot \text{sen} \phi_1 \quad (3.36)$$

Onde: ϕ_1 é o ângulo de fase ou defasagem entre a tensão e a corrente do enrolamento primário.

A potência aparente do enrolamento secundário, que corresponde à potência aparente da carga:

$$\dot{S}_2 = \dot{P}_2 + j \cdot \dot{Q}_2 = \dot{V}_2 \cdot \dot{I}_2^* \quad (3.37)$$

Onde: \dot{I}_2^* representa o conjugado complexo da corrente primaria \dot{I}_2 .

A potência ativa do enrolamento secundário:

$$\dot{P}_2 = \dot{S}_2 \cdot \cos \phi_2 \quad (3.38)$$

E a potência reativa do enrolamento secundário:

$$\dot{Q}_2 = \dot{S}_2 \cdot \text{sen} \phi_2 \quad (3.39)$$

Onde: ϕ_2 é o ângulo de fase ou defasagem entre a tensão e a corrente do enrolamento secundário.

As perdas joule no enrolamento primário:

$$P_{J1} = I_1^2 \cdot R_1 \quad (3.40)$$

As perdas joule no enrolamento secundário:

$$P_{J2} = I_2^2 \cdot R_2 \quad (3.41)$$

O somatório das perdas por histerese e por Foucault, totalizando as perdas no ferro:

$$P_{ferro} = P_F + P_H = \frac{(V_1 - I_1 \cdot Z_1)^2}{R_{fe}} \quad (3.42)$$

E o rendimento do transformador:

$$\eta = \frac{\dot{P}_2}{\dot{P}_2 + P_{j1} + P_{j2} + P_{ferro}} \quad (3.43)$$

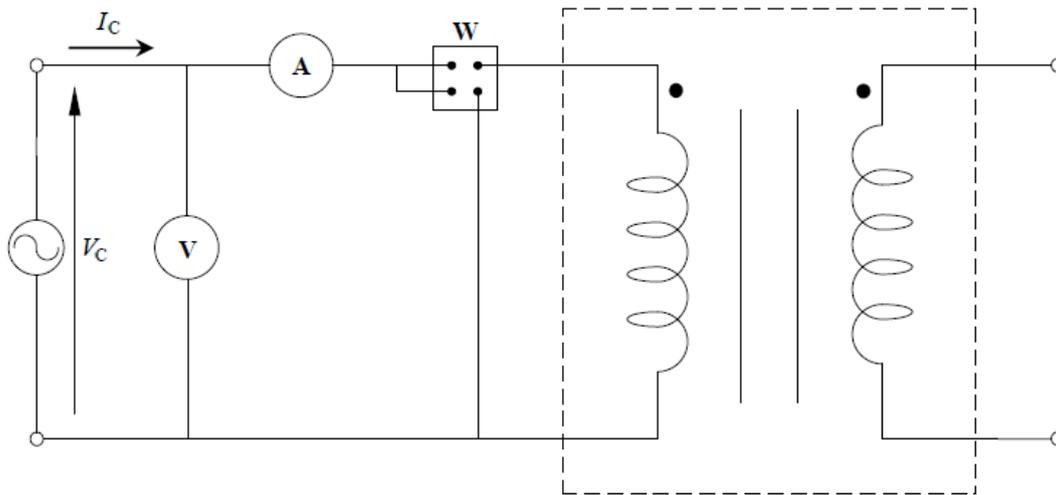
Assim, uma vez resolvido o circuito equivalente do transformador, pode-se verificar o comportamento em regime permanente do mesmo.

3.5.2. Ensaio de circuito aberto

Este ensaio é realizado para determinação dos elementos do ramo magnetizante do transformador, incluindo as perdas no ferro, sendo que o mesmo deve ser feito em ambos os enrolamentos. O ensaio de circuito aberto é realizado aplicando-se tensão nominal ao primário enquanto os terminais do secundário estiverem abertos e em seguida aplicando-se tensão nominal ao secundário enquanto os terminais do primário estiverem abertos.

Para a realização do ensaio de circuito aberto são necessários além do variador de tensão, um voltímetro (V), um amperímetro (A) e um wattímetro (W), montados conforme ilustrado na figura 3.12.

Figura 3.12 – Montagem dos instrumentos para ensaio de circuito aberto.



Fonte: (CHAPMAN, 2005)

Após montado o circuito com os instrumentos, ajusta-se a fonte de tensão até obter-se tensão nominal do enrolamento, em seguida, anota-se os valores de corrente I_c e potência P_c dada pelo wattímetro. Faz-se o ensaio novamente para o outro lado transformador e anotam-se novamente os valores de corrente I_c e potência P_c dada pelo wattímetro.

3.5.3. Ensaio de curto-circuito

O ensaio em curto-circuito é realizado para determinação dos elementos série do circuito equivalente do transformador, pois como a tensão aplicada durante o ensaio é relativamente baixa em relação à tensão nominal e a impedância magnetizante (Z_M) é muito maior que a impedância do secundário (Z'_2), portanto admite-se que a corrente no ramo a vazio (I_0) seja desprezível.

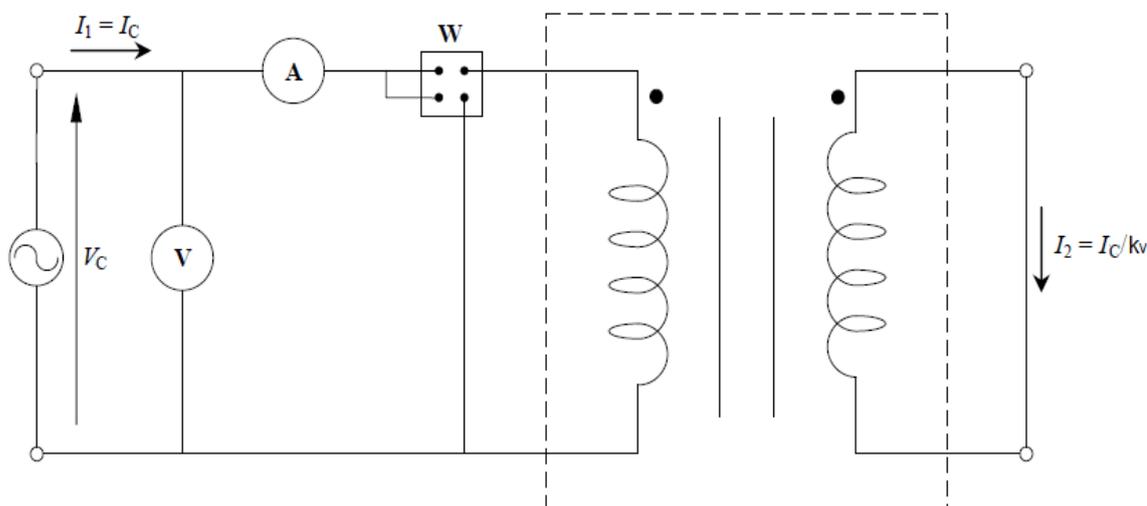
O procedimento consiste em curto-circuitar os terminais do enrolamento secundário e aplicar gradativamente no primário uma tensão, até que provoque a circulação da corrente nominal no secundário. Como a impedância série equivalente

do transformador é pequena, cerca de 7% da tensão nominal do primário já são suficientes para estabelecer a corrente nominal no secundário.

O ensaio de curto-circuito também pode ser feito curto-circuitando o enrolamento primário, sendo que, o mais indicado é alimentar o enrolamento de maior tensão e manter o de menor tensão em curto-circuito. Isto pelo fato que oferece maior segurança no caso de aumento excessivo da tensão aplicada no ensaio.

Da mesma forma que o ensaio de circuito aberto, para a realização deste ensaio, além do variador de tensão, são necessários um voltímetro (V), um amperímetro (A) e um wattímetro (W), montados conforme ilustrado na figura 3.13.

Figura 3.13 – Montagem dos instrumentos para ensaio de curto-circuito.



Fonte: (CHAPMAN, 2005)

Após montado o circuito com os instrumentos, ajusta-se a fonte de tensão até obter-se corrente nominal no secundário, em seguida, anota-se os valores de tensão aplicada V_{cc} , a corrente I_{cc} e a potência P_{cc} dada pelo wattímetro.

3.5.4. Ensaio de perdas magnéticas em função da indução

Existem muitos parâmetros que influenciam as perdas magnéticas dos transformadores, sendo que a caracterização das mesmas é complexa e não faz parte do escopo desta dissertação, entretanto podem ser verificadas através da referência (RÜNCOS, 2018). De forma a simplificar a análise, serão

especificadamente medidas as perdas magnéticas totais dos transformadores fabricados através do ensaio de circuito aberto, variando a tensão de alimentação, conforme tabela 3.2, a fim de avaliar tais perdas em função de diferentes valores de indução magnética que são diretamente proporcionais a tensão de alimentação.

Tabela 3.2 – Tensão de ensaio para obtenção da curva de perdas.

Tensão Eficaz de ensaio núcleo GO	Tensão Eficaz de ensaio núcleo Amorfo	Densidade de Fluxo Magnético
104,8 V	88,0 V	0,50 T
167,6 V	140,8 V	0,80 T
209,5 V	176 V	1,00 T
261,9 V	220 V	1,25 T
314,3 V	264 V	1,50 T
335,2 V	281,6 V	1,60 T
356,2 V	299,2 V	1,70 T
377,1 V	316,8 V	1,80 T

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.5.5. Ensaio de elevação de temperatura

De acordo com (ABNT NBR 5356-2, 2007), existem dois métodos principais para o ensaio de elevação de temperatura, sendo eles o método da variação da resistência e o método termométrico.

O método da variação da resistência baseia-se na característica física dos metais na qual a resistividade de um material depende, entre outros fatores, da temperatura. Em geral, a resistência dos metais aumenta com a temperatura. Isto não é uma surpresa, pois o aumento da resistividade com a temperatura vem do aumento do número de colisões entre os elétrons e a rede cristalina do metal. Se a temperatura ambiente não varia, pode-se dizer que as resistividades dos metais aumentam linearmente com a temperatura. Como a resistência elétrica depende da temperatura, é possível calcular a temperatura final do fio em função da variação da resistência.

O método termométrico consiste basicamente em fixar termômetros nos pontos mais quentes da bobina, e ao final subtrair a temperatura ambiente da

temperatura registrada. Alguns cuidados devem ser tomados antes de iniciar o ensaio de elevação de temperatura. Inicialmente o local escolhido não deve apresentar circulação excessiva de ar. O valor da temperatura ambiente deve ser calculado através da média de, no mínimo, três medidas tomadas a uma distância de 1 a 2 metros do transformador. Sensores de temperatura devem ser colocados em pontos do transformador, na superfície da bobina ou no interior, para registrar o momento de estabilização da temperatura.

A utilização da carga real consiste na aplicação da carga nominal ao transformador, fazendo circular a corrente nominal sob tensão nominal, ou seja, simula-se a condição real de operação. Este método de carga é utilizado somente em transformadores de pequeno porte devido a grandes quantidades de energia necessária para grandes transformadores, sendo o método mais preciso. Considera-se que o transformador está estabilizado termicamente quando a máxima variação de temperatura for inferior a 1°C em 60 minutos.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo se apresentam os cálculos efetuados para o transformador com núcleo de ferro amorfo e de núcleo de aço silício, bem como, a fabricação e ensaio dos transformadores em estudo.

4.1 PROJETO DOS TRANSFORMADORES

Para dar início a elaboração do projeto do transformador são necessários alguns dados de entrada, sendo que para este projeto de transformador monofásico foram consideradas as seguintes características:

Potência no secundário = 1000 VA;
Tensão eficaz no primário = 220 V;
Tensão eficaz no secundário = 110 V;
Frequência de operação = 60 Hz;

4.1.1 Definição da potência primária

Em geral, o projeto se inicia com o cálculo da potência primária, devido às perdas decorrentes da operação o mesmo precisará de uma potência maior em relação à potência disponível no secundário. Portanto, utiliza-se o coeficiente k_S para dar um incremento à potência secundária para obter-se a potência primária, conforme a equação 4.1.

$$S_1 = k_S \cdot S_2 \quad (4.1)$$

Onde: S_1 é a potência aparente do enrolamento primário, em VA; S_2 é a potência aparente do enrolamento secundário, em VA; k_S é um coeficiente adotado que geralmente varia entre $1,05 < k_S < 1,15$ (MARTIGNONI, 1991).

Neste caso optou-se por utilizar núcleo do tipo envolvido (dupla perna), tal modelo de núcleo magnético acaba possuindo um fluxo magnético de dispersão elevado se fabricado com o enrolamento primário em uma coluna e o enrolamento

secundário na outra, portanto, a fim de diminuirmos o fluxo magnético de dispersão e conseqüentemente diminuirmos o fator de incremento de espiras k_N para compensação da queda de tensão do enrolamento secundário, utiliza-se a metodologia de fabricar ambos os enrolamentos primário e secundário em cada coluna do núcleo magnético com metade da potencia em cada enrolamento. Desta forma o transformador irá possuir dois enrolamentos primários e dois enrolamentos secundários que serão ligados em paralelo para obtermos a potência total do transformador, portanto, para o cálculo de cada enrolamento foi considerado metade da potência nominal, conforme pode ser observado na equação 4.2.

$$S_1 = 0,5 . K_s . S_2 = 0,5 . 1,1 . 1000 = 550 \text{ VA} \quad (4.2)$$

4.1.2 Definição das seções condutoras

Para se determinar a seção dos condutores dos enrolamentos primário e secundário, primeiramente é preciso calcular os valores eficazes das correntes de cada enrolamento. O valor eficaz da corrente no secundário em amperes pode ser obtida diretamente pela equação 4.3.

$$I_2 = \frac{S_2}{V_2} \quad (4.3)$$

Onde: S_2 é a potência aparente do secundário, em VA; V_2 é a tensão do secundário, em volts.

Da mesma forma calcula-se o valor eficaz da corrente no primário pela equação 4.4.

$$I_1 = \frac{S_1}{V_1} \quad (4.4)$$

Onde: S_1 é a potência aparente do primário, em VA; V_1 é a tensão do primário, em volts.

Desta forma, os valores eficazes de corrente nos enrolamentos primário e secundário podem ser observadas através das equações 4.5 e 4.6, respectivamente.

$$I_1 = \frac{S_1}{V_1} = \frac{550}{220} = 2,5 \text{ A} \quad (4.5)$$

$$I_2 = \frac{S_2}{V_2} = \frac{550}{110} = 5 \text{ A} \quad (4.6)$$

Depois de calculadas os valores eficazes das correntes, precisa-se definir um valor de densidade de corrente admissível nos condutores. Quanto maior a potência do transformador menor é a densidade de corrente admissível, isto se deve ao fato que com o aumento do volume, aumentam as dificuldades de transferência térmica. Em geral, para transformadores até 3000 VA de potência consideram-se preliminarmente densidades de corrente de 1,5 A/mm² e 3 A/mm², para enrolamentos de alumínio e cobre, respectivamente.

Determinado os valores de densidade de corrente, calcula-se a seção condutora do enrolamento primário S_{C1} e secundário S_{C2} através das equações 4.7 e 4.8, respectivamente.

$$S_{c1} = \frac{I_1}{J_1} \quad (4.7)$$

$$S_{c2} = \frac{I_2}{J_2} \quad (4.8)$$

Onde: I_1 é o valor eficaz da corrente do primário, em A; J_1 é a densidade de corrente do primário, em A/mm²; I_2 é o valor eficaz da corrente do secundário, em A; J_2 é a densidade de corrente do secundário, em A/mm².

Depois de calculadas as seções condutoras, devem-se consultar tabelas como a 4.1 e verificar qual o fio que mais se aproxima da seção calculada.

Tabela 4.1 – Tabela de fios de cobre esmaltados.

AWG	Diâmetro (mm)	Seção Circular (mm ²)
7	3,665	10,55
8	3,264	8,36
9	2,906	6,63
10	2,588	5,26
11	2,305	4,17
12	2,053	3,31
13	1,828	2,63
14	1,628	2,08
15	1,45	1,65
16	1,291	1,31
17	1,15	1,04
18	1,024	0,82

Fonte: (BRAGA, 2019).

Considerando a potência de 550VA por bobina, optou-se em utilizar a densidade de corrente de $J=2,5$ A/mm². Assim a seção condutora no enrolamento primário pode ser calculada através da equação 4.9.

$$S_{c1} = \frac{I_1}{J_1} = \frac{2,5}{2,5} = 1 \text{ mm}^2 \quad (4.9)$$

Através da tabela 4.1, verifica-se que a seção circular de cobre do fio 17 AWG é o mais próximo ao desejado, portanto será o fio utilizado no enrolamento primário. O mesmo cálculo se faz para a seção condutora no enrolamento secundário através da equação 4.10.

$$S_{c2} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{5}{2,5} = 2 \text{ mm}^2 \quad (4.10)$$

Através da tabela 4.1, verifica-se que o fio circular de cobre 14 AWG possui a seção circular mais próxima à desejada, portanto será o fio utilizado no enrolamento secundário.

4.1.3 Definição do volume ativo

De acordo com Martignoni (1991), Para pré-determinar o volume ativo do transformador a ser projetado, geralmente, utiliza-se a seção magnética teórica como parâmetro inicial de projeto. Para transformadores monofásicos de dupla perna com altura de janela do núcleo três vezes maior do que a largura da coluna pode-se utilizar a equação 4.11 para se determinar um valor inicial de seção magnética do projeto, que posteriormente pode ser adequado de acordo com as experiências práticas do projetista.

$$S_M = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{S_2}{f}} \text{ cm}^2 \quad (4.11)$$

Portanto, a seção magnética teórica do núcleo será:

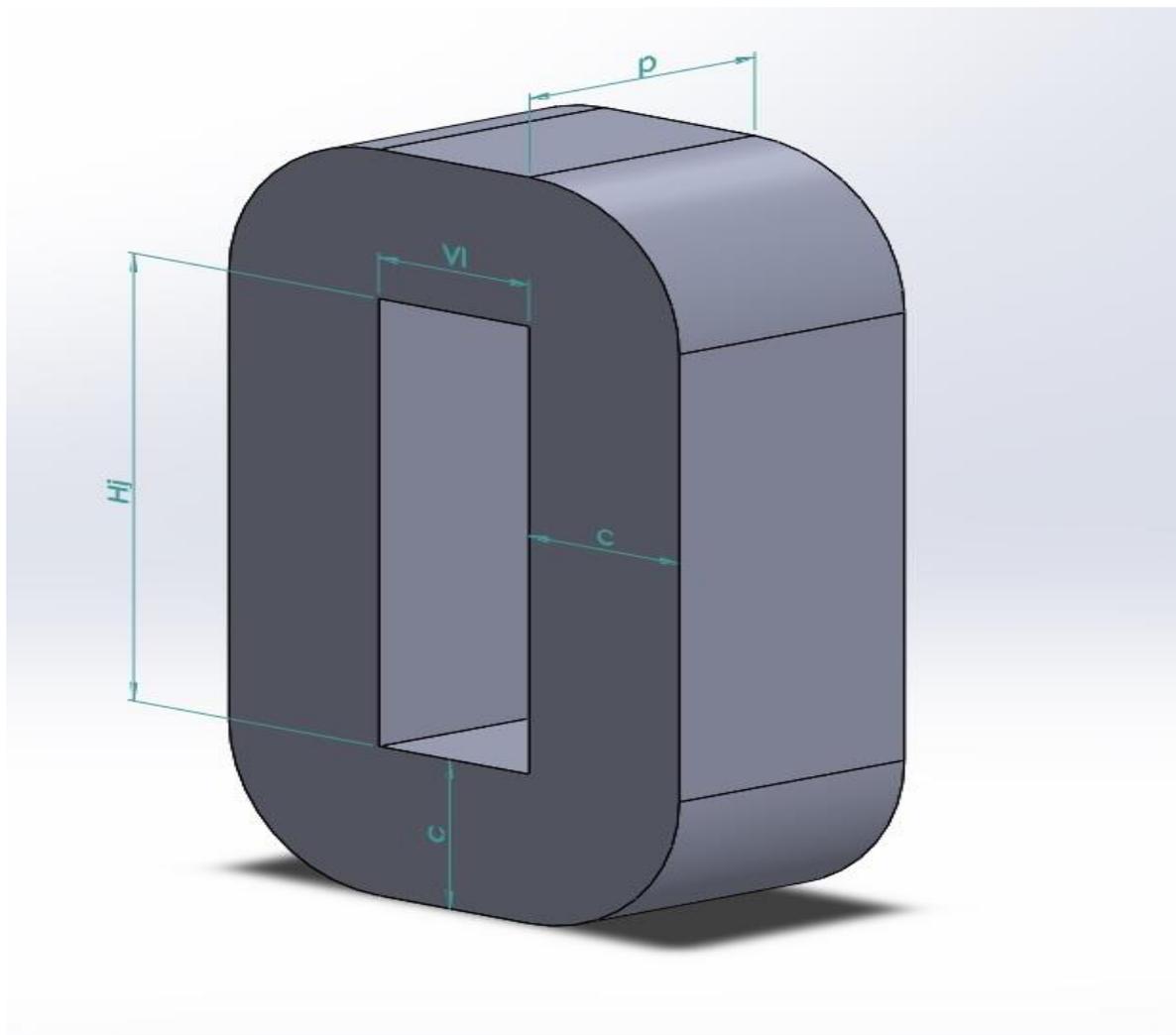
$$S_M = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{1000}{60}} = 18,37 \text{ cm}^2 \quad (4.12)$$

Em transformadores monofásicos, é construtivamente vantajoso que a forma da seção magnética do núcleo seja próxima da forma quadrada, portanto, a seção magnética do núcleo pode ser obtida através da equação 4.12.

$$S_M = k_{emp} \cdot c \cdot p \quad (4.13)$$

Através da equação 4.13, observa-se que a seção magnética é dada pelo produto da largura da coluna do núcleo do transformador (c), pelo comprimento do pacote de chapas (p) e pelo fator de empilhamento (k_{emp}), que também pode ser verificado através da figura 4.1.

Figura 4.1 - Núcleo magnético.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Como calculado através da equação 4.12, a seção magnética mínima deverá ser aproximadamente de 18,37 cm², para posteriormente prosseguir com os cálculos e verificar a possibilidade de fabricação. Neste caso, optou-se por escolher medidas padronizadas pelos fabricantes de núcleos magnéticos e foi considerado $c=40$ mm, $p=60$ mm e $K_{emp}=0,80$ para o núcleo de metal amorfo e $c=40$ mm, $p=60$ mm e $K_{emp}=0,95$ para o núcleo de aço silício GO, conforme se observa nas equações 4.14 e 4.15, respectivamente.

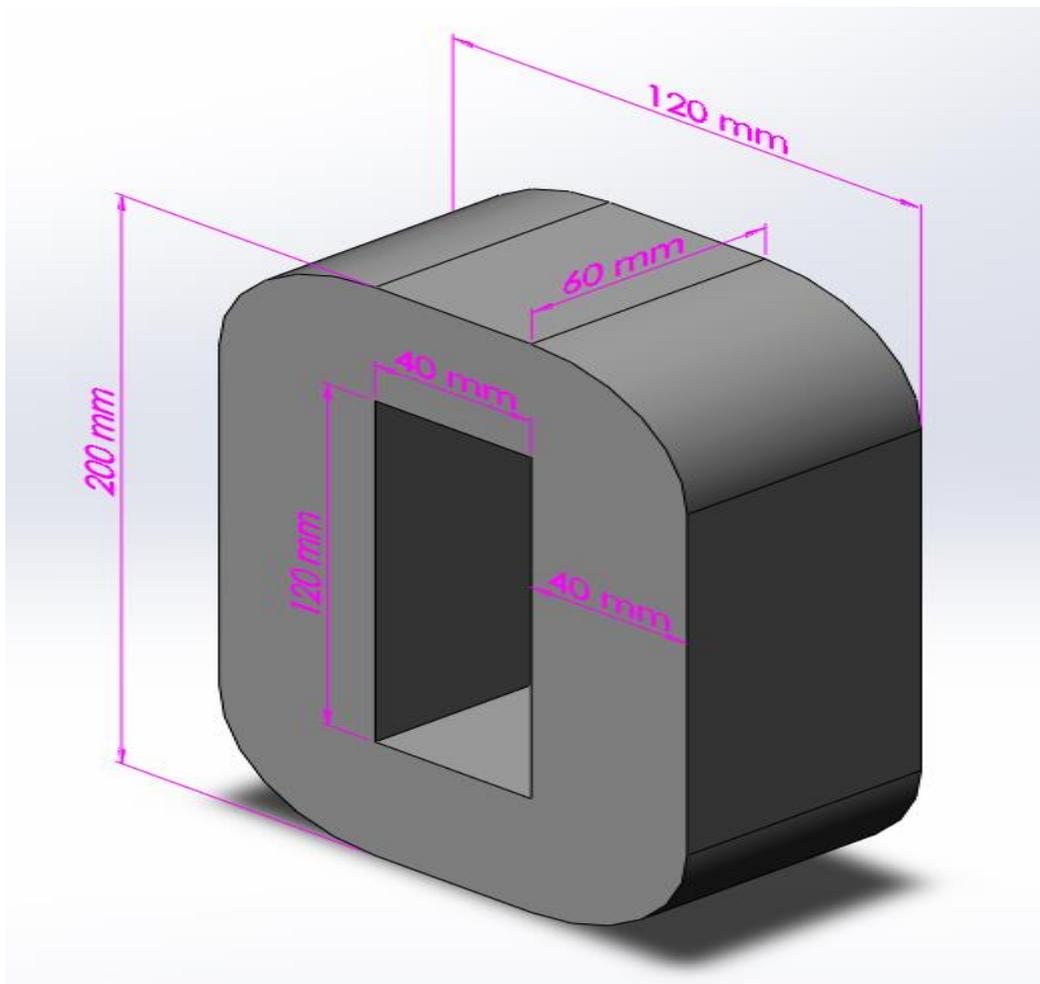
$$S_{MGO} = 0,8 \cdot 0,040 \cdot 0,060 = 19,2 \text{ cm}^2 \quad (4.14)$$

$$S_{MAMORFO} = 0,95 \cdot 0,040 \cdot 0,060 = 22,8 \text{ cm}^2 \quad (4.15)$$

Nota-se que os valores de seção magnética ficaram acima dos valores mínimos pré-estabelecidos através da equação 4.12, isto devido à disponibilidade de mercado dos núcleos magnéticos com tais dimensões. Também se verifica que ao manteve-se a mesma seção geométrica dos núcleos, as seções magnéticas acabam divergindo devido ao fator de empilhamento que são diferentes para ambos os materiais magnéticos.

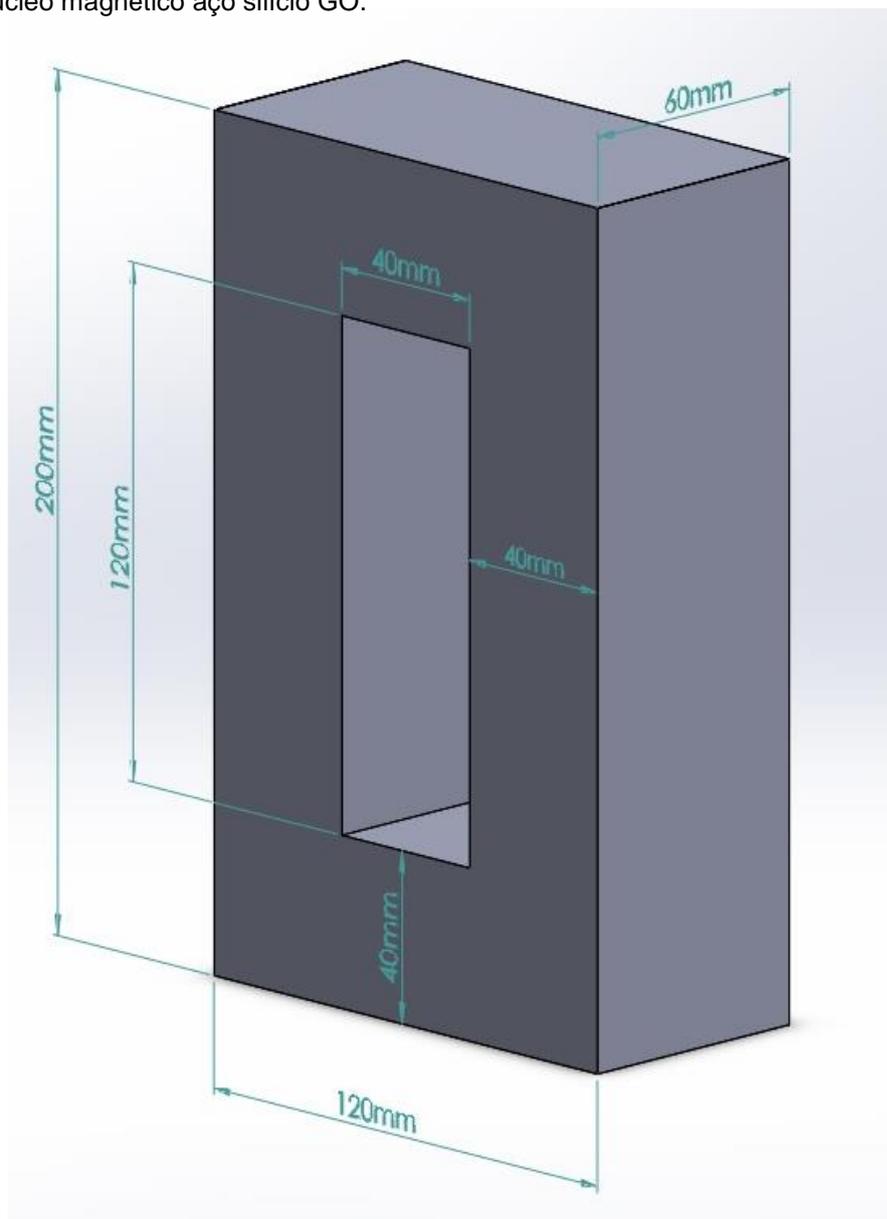
Através da figura 4.2, é possível observar o desenho 3D do núcleo magnético de metal amorfo e através da figura 4.3 é possível observar o desenho 3D do núcleo magnético de aço silício GO.

Figura 4.2 - Núcleo magnético metal amorfo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 4.3 - Núcleo magnético aço silício GO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.1.4 Definição do número de espiras

De acordo com W.G. Hurley e W.H. Wölfle (2013), o número de espiras ou número de voltas completadas, para o enrolamento primário, pode ser calculado através da equação 4.16.

$$N_1 = \frac{V_1}{4,44 \cdot B_M \cdot S_M \cdot f} \quad (4.16)$$

Para o cálculo do número de espiras do secundário utiliza-se o coeficiente k_N para dar um incremento ao resultado, a fim de compensar a queda de tensão no enrolamento devido a dispersão do fluxo magnético e efeito Joule, portanto, calcula-se através da equação 4.17.

$$N_2 = \frac{k_N \cdot V_2}{4,44 \cdot B_M \cdot S_M \cdot f} \quad (4.17)$$

Onde: N_1 é o número de espiras do primário; V_1 é a tensão do circuito primário, em volts; N_2 é o número de espiras do secundário; V_2 é a tensão do secundário, em volts; B_M é a indução magnética, em Teslas; S_M , a seção magnética em m^2 ; f , a frequência em Hz.

Para se calcular o número de espiras do projeto, previamente precisa-se definir a indução magnética, portanto, para o transformador de metal amorfo a mesma foi definida em 1,25 T, abaixo da indução de saturação que é em torno de 1,60 T. Desta forma, o número de espiras do primário e secundário é determinado pelas equações 4.18 e 4.19, respectivamente.

$$N_1 = \frac{220}{4,44 \cdot 1,25 \cdot 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 344 \text{ espiras} \quad (4.18)$$

$$N_2 = \frac{110,1,03}{4,44 \cdot 1,25 \cdot 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 177 \text{ espiras} \quad (4.19)$$

Foi utilizado o coeficiente $k_N=1,03$ para dar um incremento de 3% ao resultado, a fim de compensar a queda de tensão no enrolamento secundário.

Com o objetivo de manter o máximo de características possíveis idênticas em ambos os projetos para posterior comparação, foram mantidas as mesmas dimensões geométricas do núcleo magnético, o mesmo número de espiras e as mesmas bitolas de fios condutores. Entretanto, ao manter o mesmo número de espiras em ambos os projetos, a indução magnética do projeto de aço silício GO acaba sendo menor do que os 1,25 T estipulados no metal amorfo, pois devido ao fator de empilhamento ser maior, consecutivamente tem-se uma maior seção magnética para a mesma seção geométrica do núcleo.

Da equação 4.16 retira-se que:

$$B_M = \frac{V_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot S_M \cdot f} \quad (4.20)$$

Portanto, a densidade de fluxo magnético do transformador de aço silício GO pode ser calculada conforme equação 4.21.

$$B_M = \frac{220}{4,44 \cdot 344 \cdot 2,28 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 1,05 \text{ T} \quad (4.21)$$

4.1.5 Definição do fator de enchimento

Depois de calculado o número de espiras primárias N_1 e secundárias N_2 e a seção condutora do primário S_{C1} e do secundário S_{C2} , deve-se calcular o fator de enchimento do transformador, que irá medir a possibilidade de execução do projeto com base em valores práticos.

Para se calcular o fator de enchimento, primeiramente precisa-se calcular a seção condutora total e a área da janela do carretel. Sendo que a seção condutora total S_C em mm^2 pode ser calculada através da equação 4.22.

$$S_C = N_1 \cdot S_{C1} + N_2 \cdot S_{C2} \quad (4.22)$$

Portanto, uma vez definido o número de espiras, calcula-se a seção condutora total através da equação 4.23.

$$S_C = 344 \cdot 1,04 + 177 \cdot 2,08 = 726 \text{ mm}^2 \quad (4.23)$$

E a área da janela do carretel S_J em mm^2 para núcleos retangulares pode ser calculada através da equação 4.24.

$$S_J = \frac{H_J \cdot V_L}{2} \quad (4.24)$$

Onde: V_l , é o vão livre entre as pernas do núcleo magnético em mm; H_j , é a altura da janela do núcleo magnético em mm;

Portanto, uma vez definida as dimensões do núcleo magnético, calcula-se a área da janela do carretel S_j através da equação 4.25.

$$S_j = \frac{120.40}{2} = 2400 \text{ mm}^2 \quad (4.25)$$

O fator de enchimento (F_E) pode ser obtido através da equação 4.26

$$F_E = \frac{S_j}{S_C} \geq 3,00 \quad (4.26)$$

Na prática, quando o F_E é menor que três, a fabricação do transformador torna-se muito dificultosa ou até mesmo impossível, portanto deve-se projetar o transformador para que o F_E fique o mais próximo possível de três.

Desta forma, já é possível calcular o fator de enchimento e verificar a possibilidade de execução do projeto, conforme equação 4.27.

$$F_E = \frac{2400}{726} = 3,30 \quad (4.27)$$

Neste caso, o fator de enchimento resultou em um número maior que 3,00, indicando que o transformador é possível de ser fabricado.

Através da tabela 4.2, pode-se observar os dados de projeto de ambos os transformadores que serão fabricados.

Tabela 4.2 – Dados de projeto dos transformadores.

Modelo	Transformador 01	Transformador 02
Material magnético	Metal Amorfo $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$	Aço silício GO 0,30mm espessura
Número de espiras do primário	344 espiras	344 espiras
Número de espiras do secundário	177 espiras	177 espiras

Bitola do condutor do primário	Fio circular de cobre 17AWG	Fio circular de cobre 17AWG
Bitola do condutor do secundário	Fio circular de cobre 14AWG	Fio circular de cobre 14AWG
Indução de projeto	1,25 T	1,05 T
Seção magnética	1920 mm ²	2280 mm ²
Seção geométrica	2400 mm ²	2400 mm ²
Massa do núcleo magnético	6,71 kg	8,19 kg

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

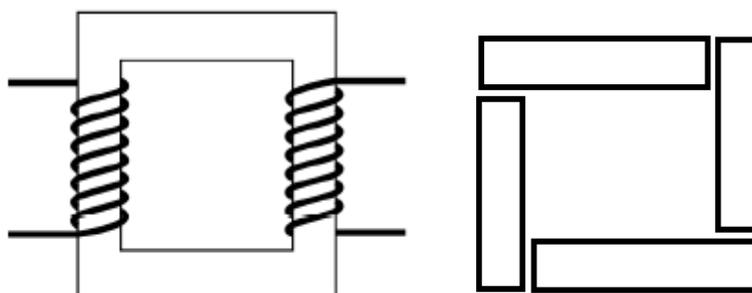
4.2 FABRICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

A fabricação de transformadores a seco envolve diversos processos produtivos, sendo que os mesmos variam de acordo com as características do transformador e os recursos disponíveis para fabricação dos mesmos. Em geral, pode-se separar a fabricação dos transformadores em dois principais processos, a confecção das bobinas e a montagem do núcleo magnético.

4.2.1 Montagem do núcleo magnético

Na indústria, a montagem do núcleo magnético pode ser executada de diversas maneiras, de forma manual ou automatizada. Para o transformador com núcleo de aço silício GO foi utilizada a concepção de núcleo do tipo envolvido, montado manualmente de forma empilhada, conforme figura 4.4.

Figura 4.4 – Núcleo de aço silício tipo envolvido.



Fonte: (MARTGNONI, 1971).

Em contrapartida, o núcleo de metal amorfo já foi adquirido em seu formato final, montado e isolado, pronto para utilização, conforme pode observar na figura 4.5.

Figura 4.5 – Núcleo de metal amorfo do tipo envolvido.



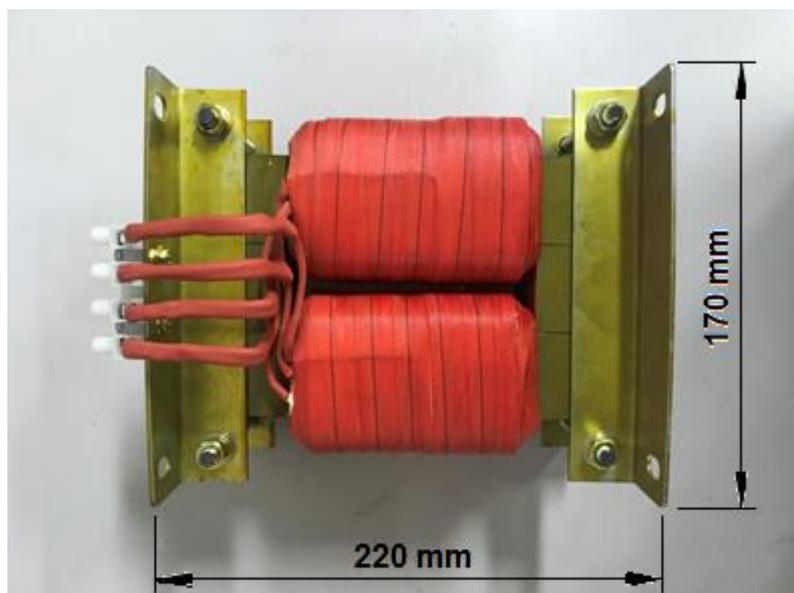
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.2.2 Confeção das bobinas

Na indústria, a confecção das bobinas para transformadores geralmente é realizada através de máquinas automáticas específicas para a processo de bobinagem, entretanto, para realização de estudos é muito comum no meio acadêmico fabricá-las de forma manual. Neste caso, o transformador com núcleo magnético de aço silício GO foi fabricado em cortesia pela empresa Pólux Transformadores, sediada em Jaraguá do Sul, Santa Catarina e o transformador com núcleo magnético de metal amorfo foi fabricado manualmente pelo próprio autor.

Para o transformador com núcleo de aço silício GO foram fabricadas as bobinas separadamente em carretéis fabricados em PRFV (placa resinada de fibra de vidro) e filmes isolantes de Poliéster, por fim, foi dado acabamento com cadarço de fibra de vidro e encaixadas no núcleo pré montado, após as bobinas serem encaixadas foi feito o fechamento do núcleo magnético, conforme pode ser observado na figura 4.6.

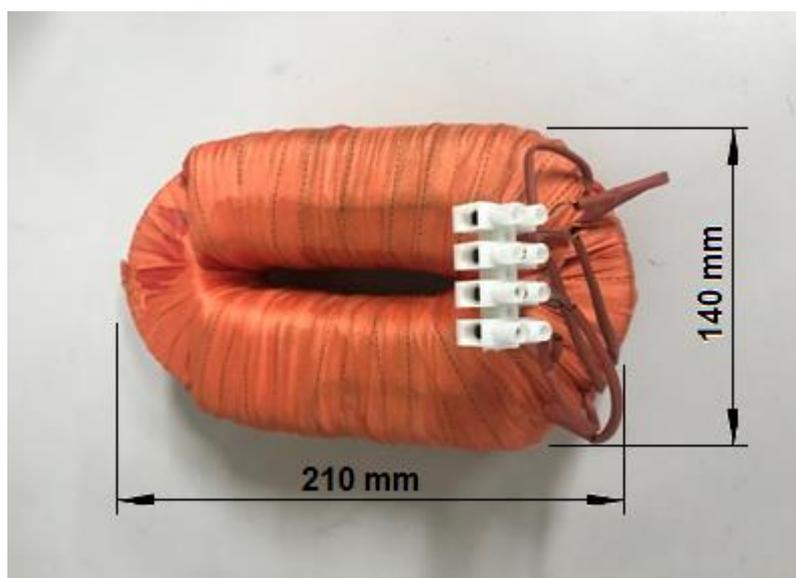
Figura 4.6 – Transformador com aço silício GO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para o transformador com núcleo de metal amorfo não foi possível fabricar as bobinas separadamente e encaixa-las no núcleo magnético, isto porque o núcleo de metal amorfo não possui partição, portanto a bobinagem foi realizada manualmente e diretamente sobre o metal amorfo, sem utilização de carretéis, apenas filmes isolantes de Poliéster, por fim, foi dado acabamento com cadaço de fibra de vidro, conforme pode ser observado na figura 4.7.

Figura 4.7 – Transformador com metal amorfo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

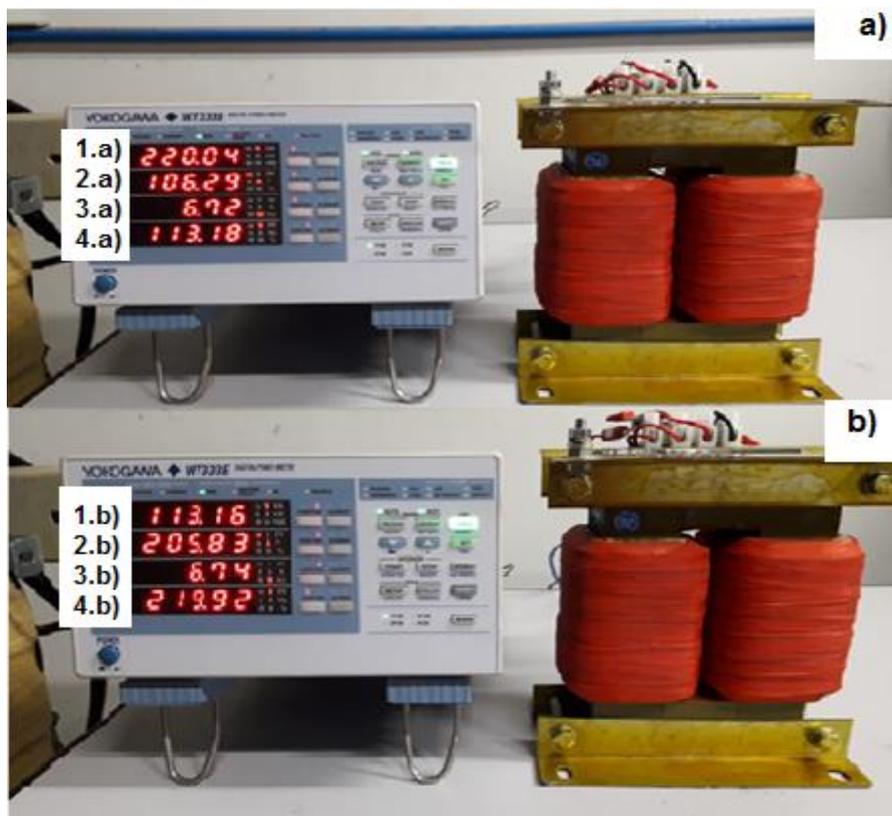
4.3 ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES

Neste capítulo serão apresentados os ensaios de circuito aberto, curto-circuito, elevação de temperatura e perdas magnéticas realizados nos transformadores fabricados.

4.3.1. Ensaio de circuito aberto aplicado

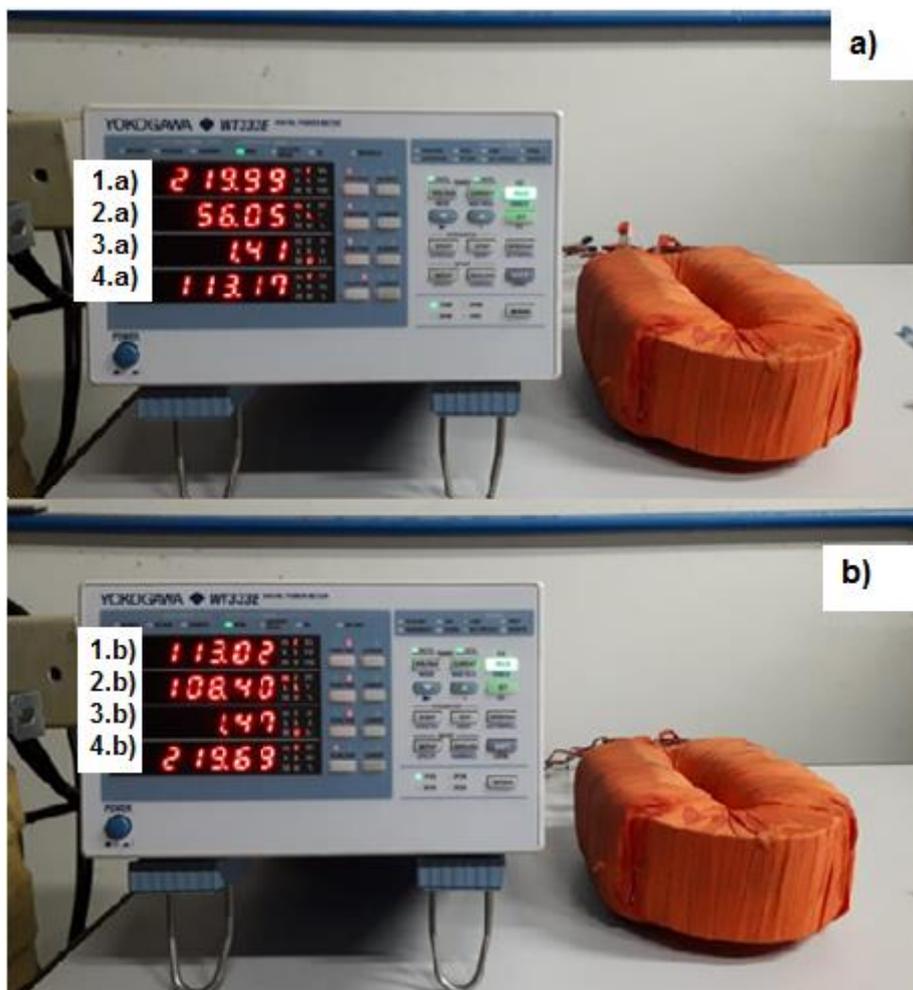
Para a realização deste ensaio nos transformadores fabricados, foram utilizados um variador de tensão da STP (Sociedade Técnica Paulista Ltda) modelo ATV-215-M e um analisador de potência da YOKOGAWA modelo WT333E, que possui a medição de tensão, corrente e potências englobadas no aparelho, conforme se observa nas figuras 4.8 e 4.9, os transformadores foram ensaiados pelo enrolamento de 220 V e posteriormente pelo enrolamento de 110 V.

Figura 4.8 – Ensaio de circuito aberto no transformador com núcleo de aço silício GO: a) 220 V b) 110 V.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 4.9 – Ensaio de circuito aberto no transformador com núcleo de metal amorfo: a) 220 V b) 110 V.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Com o enrolamento de 110 V em aberto, foram obtidos os seguintes valores no ensaio:

Tabela 4.3 – Medições do ensaio de circuito aberto com o enrolamento de 110 V aberto.

Medição	Aço Silício GO	Metal Amorfo
1.a) - Potência no primário (W)	6,72	1,41
2.a) - Tensão no primário (V)	220,04	219,99
3.a) - Corrente no primário (mA)	106,29	56,05
4.a) - Tensão no secundário (V)	113,18	113,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

E com o enrolamento de 220 V aberto, foram obtidos os seguintes valores no ensaio:

Tabela 4.4 – Medições do ensaio de circuito aberto com o enrolamento de 220 V aberto.

Medição	Aço Silício GO	Metal Amorfo
1.b) - Potência no secundário (W)	6,74	1,47
2.b) - Tensão no primário (V)	113,16	113,02
3.b) - Corrente no primário (mA)	205,83	108,40
4.b) - Tensão no secundário (V)	219,92	219,69

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3.2. Ensaio de curto-circuito aplicado

Através das figuras 4.10 e 4.11 observa-se a realização dos ensaios de curto-circuito no transformador de aço silício GO e no transformador de metal amorfo, respectivamente.

Figura 4.10 – Ensaio de curto-circuito no transformador com núcleo de aço silício GO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 4.11 – Ensaio de curto-circuito no transformador com núcleo de metal amorfo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Com o enrolamento de 220 V em curto-circuito, foram obtidos os seguintes valores:

Tabela 4.5 – Medições do ensaio de curto-circuito com o secundário em curto.

Medição	Aço Silício GO	Metal Amorfo
a) Potência (W)	31,27	28,14
b) Tensão (V)	7,02	6,33
c) Corrente (A)	4,54	4,54
d) Fator de potência (p.u)	0,98	0,98

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3.3. Ensaio de elevação de temperatura aplicado

Os transformadores foram postos em aquecimento utilizando o método da carga real, para isso foi utilizado um banco de resistências de fio de níquel cromo com base de porcelana, conforme figura 4.12, ou seja, o fator de potência da carga é unitário. Para execução deste ensaio utilizou-se os procedimentos da norma Brasileira NBR 5356-2.

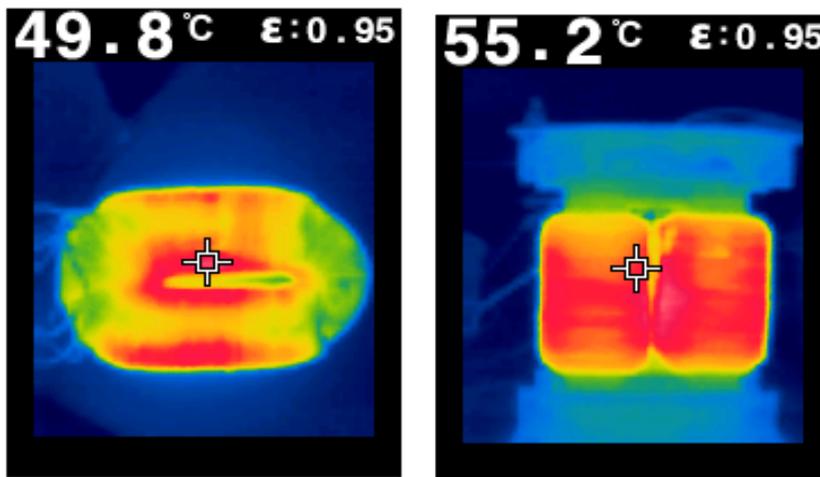
Figura 4.12 – Ensaio de elevação de temperatura com banco de resistência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para medição da temperatura foi utilizada uma câmera de imagem térmica da marca FLIR modelo TG165, conforme figura 4.13, tal ferramenta provê praticidade e segurança.

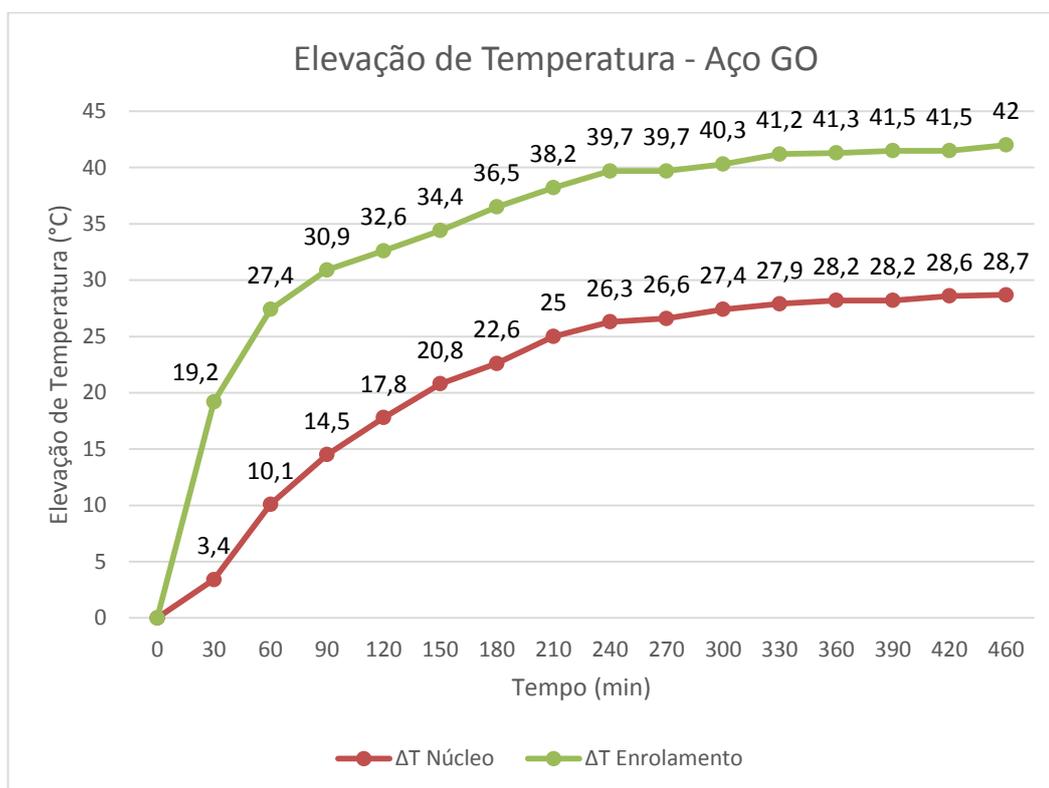
Figura 4.13 – Imagens térmicas do ensaio de elevação de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Através do gráfico 4.1 é possível observar a elevação de temperatura no núcleo e no enrolamento do transformador fabricado com aço silício GO, sendo que já foi descontado o valor da temperatura ambiente de cada medição. O núcleo magnético estabilizou termicamente com elevação de 28,7° C enquanto o enrolamento possuiu uma maior elevação de temperatura, chegando a uma variação de 42° C.

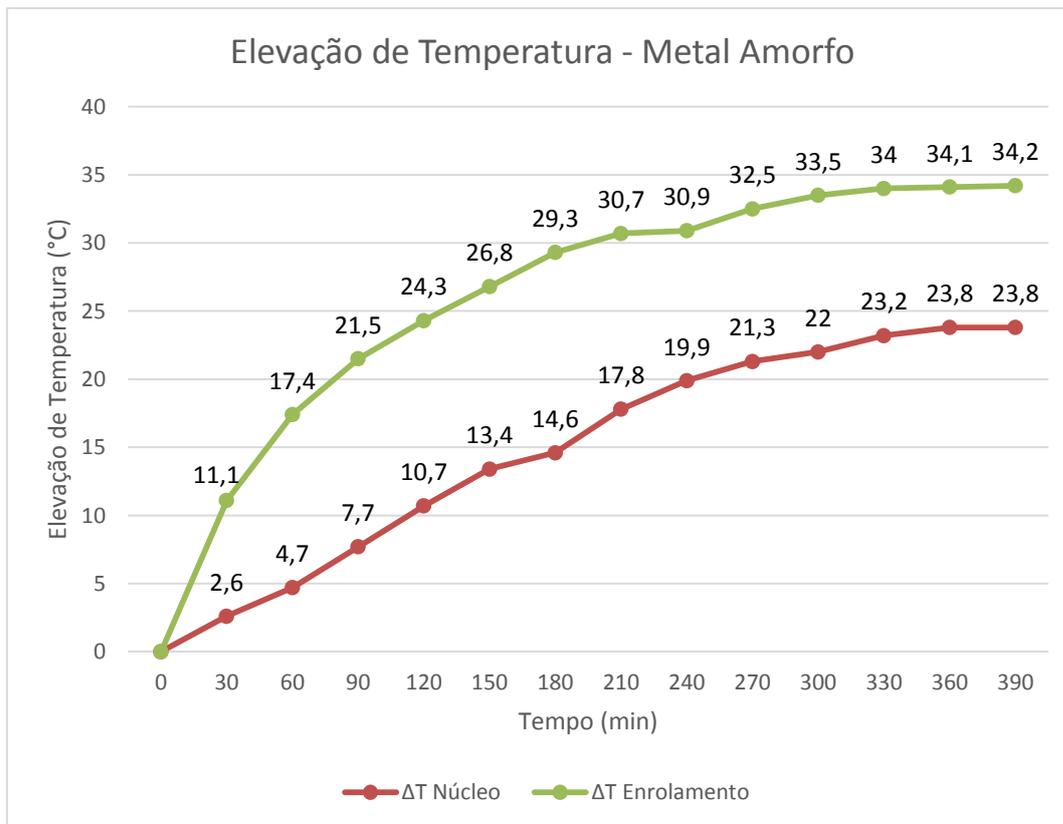
Gráfico 4.1 – Elevação de temperatura no transformador com núcleo de aço silício GO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Através do gráfico 4.2 é possível observar a elevação de temperatura no núcleo e no enrolamento do transformador fabricado com metal amorfo, sendo que já foi descontado o valor da temperatura ambiente de cada medição. O núcleo magnético estabilizou termicamente com elevação de 23,8° C enquanto o enrolamento possuiu uma maior elevação de temperatura, chegando a uma variação de 34,2° C.

Gráfico 4.2 – Elevação de temperatura no transformador com núcleo de metal amorfo.

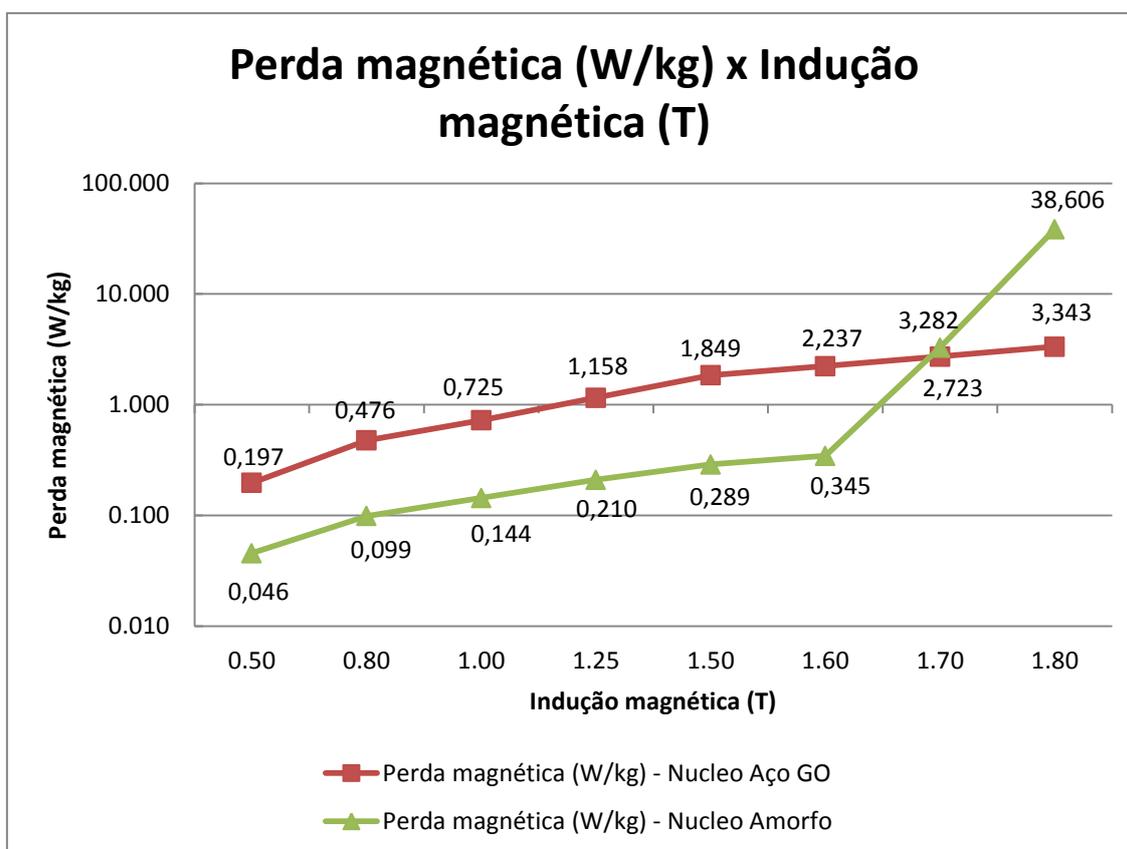


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3.4. Ensaio aplicado das perdas magnéticas em função da indução

Através do gráfico 4.3 pode-se verificar a curva de perdas magnéticas em ambos os transformadores para diferentes valores de indução magnética na frequência de 60 Hz. É possível observar no gráfico que até 1,60 T de densidade de fluxo magnético o núcleo de metal amorfo possui as perdas magnéticas muito inferiores às perdas do núcleo de aço silício GO e que a partir de 1,60 T o núcleo de metal amorfo satura magneticamente e seus valores de perdas magnéticas começa a crescer exponencialmente, ficando muito próximo ao núcleo de aço silício GO em 1,70 T e muito acima em 1,80 T de indução.

Gráfico 4.3 – Perda magnética dos transformadores em função da indução magnética.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS FÍSICOS ENSAIADOS

Neste capítulo serão apresentados os cálculos dos parâmetros físicos dos transformadores com base nos valores obtidos nos ensaios de curto-circuito e de circuito aberto. Sendo que para isso, as devidas alterações serão feitas, de forma que todas as impedâncias estejam referidas a um mesmo enrolamento do transformador.

4.4.1. Parâmetros físicos do transformador de aço silício GO

Utilizando os valores obtidos no ensaio com o secundário aberto calcula-se o ângulo de fase ϕ_1 por:

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{6,72}{220,04 \cdot 0,106} \right) = 73,25^\circ \quad (4.28)$$

Sendo a tensão no primário:

$$\dot{V}_1 = 220,04 [0^\circ V] \quad (4.29)$$

E o valor eficaz da corrente no primário:

$$\dot{I}_1 = 0,106 [-73,25^\circ A] \quad (4.30)$$

Calcula-se a impedância equivalente do primário por:

$$\dot{Z}_{eq1} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = 2076 [73,25^\circ \Omega] \quad (4.31)$$

Considerando:

$$\dot{Z}_{eq1} = \dot{Z}_1 + \frac{(R_{fe} \cdot jX_M)}{(R_{fe} + jX_M)} \quad (4.32)$$

Readequando a equação 4.32, tem-se que:

$$\dot{Z}_{eq1} = \left(R_1 + \frac{(R_{fe} \cdot X_M^2)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \right) + j \cdot \left(X_1 + \frac{(R_{fe}^2 \cdot X_M)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \right) \quad (4.33)$$

Sendo a resistência do enrolamento de 220V R_1 medida a 14 °C com o micro ohmímetro da marca INSTRUM modelo MicroOhm 100i:

$$R_{1(14^\circ C)} = 0,830 \, \Omega \quad (4.34)$$

Utiliza-se a equação 4.35 para corrigir as resistências dos enrolamentos para uma temperatura normalizada.

$$R_{(T_2)} = R_{(T_1)} \cdot (1 + \alpha_{T_2} \cdot (T_2 - T_1)) \quad (4.35)$$

Onde: $R_{(T_2)}$ é a resistência do condutor corrigida na temperatura T_2 , em Ω ; $R_{(T_1)}$ é a resistência do condutor na temperatura T_1 , em Ω ; α_{T_2} é o coeficiente de temperatura do condutor; T_2 é a temperatura de referência, em °C; T_1 é a temperatura da medição, em °C;

Corrigindo a resistência R_1 para uma temperatura de 100 °C, tem-se:

$$R_{1(100^\circ C)} = 0,830 \cdot (1 + 0,00364 \cdot (100 - 14)) = 1,090 \, \Omega \quad (4.36)$$

E a tensão medida no secundário a vazio, referida ao primário:

$$V'_2 = 113,18 \cdot \left(\frac{344}{177} \right) = 219,96 \, V \quad (4.37)$$

Determina-se a resistência equivalente das perdas no ferro por:

$$R_{fe} = \frac{(V'_2)^2}{P_{ferro}} = \frac{(V'_2)^2}{P_1 - I_1^2 \cdot R_1} = \frac{219,96^2}{6,72 - 0,106^2 \cdot 1,090} = 7213 \, \Omega \quad (4.38)$$

Da equação 4.33, retira-se que:

$$Z_{eq1} \cdot \cos(\phi_1) = R_1 + \frac{(R_{fe} \cdot X_M^2)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \quad (4.39)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância magnetizante:

$$X_M = 2167 \, \Omega \quad (4.40)$$

Da equação 4.33, também se retira que:

$$Z_{eq1} \cdot \sin(\phi_1) = X_1 + \frac{(R_{fe}^2 \cdot X_M)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \quad (4.41)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância de dispersão do primário:

$$X_1 = 0,405 \, \Omega \quad (4.42)$$

Utilizando os valores obtidos no ensaio com o primário aberto calcula-se o ângulo de fase ϕ_2 por:

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left(\frac{P_2}{V_2 \cdot I_2} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{6,74}{113,16 \cdot 0,206} \right) = 73,19^\circ \quad (4.43)$$

Sendo a tensão no secundário:

$$\dot{V}_2 = 113,16 \angle 0^\circ \, V \quad (4.44)$$

E o valor eficaz da corrente no secundário:

$$\dot{I}_1 = 0,206 \angle -73,19^\circ \, A \quad (4.45)$$

Calcula-se a impedância equivalente do secundário por:

$$\dot{Z}_{eq2} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2} = 549 \angle 73,19^\circ \, \Omega \quad (4.46)$$

Considerando:

$$\dot{Z}_{eq2} = \dot{Z}_2 + \frac{(R_{fe} \cdot jX_M)}{(R_{fe} + jX_M)} \quad (4.47)$$

Readequando a equação 4.46, tem-se que:

$$\dot{Z}_{eq2} = \left(R_2 + \frac{(R_{fe} \cdot X_M^2)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \right) + j \cdot \left(X_2 + \frac{(R_{fe}^2 \cdot X_M)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \right) \quad (4.48)$$

Sendo a resistência R_2 medida a 14 °C:

$$R_{2(14^\circ C)} = 0,188 \, \Omega \quad (4.49)$$

Corrigindo a resistência R_2 para uma temperatura de 100 °C, tem-se:

$$R_{2(100^\circ C)} = 0,188 \cdot (1 + 0,00364 \cdot (100 - 14)) = 0,247 \, \Omega \quad (4.50)$$

E a tensão medida no primário a vazio, referida ao secundário:

$$V'_1 = 219,92 \cdot \left(\frac{177}{344} \right) = 113,16 \, V \quad (4.51)$$

Determina-se a resistência equivalente das perdas no ferro por:

$$R_{fe2} = \frac{(V'_1)^2}{P_{ferro}} = \frac{(V'_1)^2}{P_2 - I_2^2 \cdot R_2} = \frac{113,16^2}{6,74 - 0,206^2 \cdot 0,247} = 1903 \, \Omega \quad (4.52)$$

Referindo a resistência equivalente das perdas no ferro para o primário fica:

$$R_{fe} = 1903 \cdot \left(\frac{344}{177} \right)^2 = 7188 \, \Omega \quad (4.53)$$

Da equação 4.48, retira-se que:

$$Z_{eq2} \cdot \cos(\phi_2) = R_2 + \frac{(R_{fe2} \cdot X_{M2}^2)}{(R_{fe2}^2 + X_{M2}^2)} \quad (4.54)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância magnetizante:

$$X_{M2} = 572 \, \Omega \quad (4.55)$$

Referindo o valor da reatância magnetizante para o primário fica:

$$X_M = 572 \cdot \left(\frac{344}{177}\right)^2 = 2160 \, \Omega \quad (4.56)$$

Da equação 4.48, também se retira que:

$$Z_{eq2} \cdot \sin(\phi_2) = X_2 + \frac{(R_{fe2}^2 \cdot X_{M2})}{(R_{fe2}^2 + X_{M2}^2)} \quad (4.57)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância de dispersão do secundário:

$$X_2 = 1,216 \, \Omega \quad (4.58)$$

Referindo o valor da reatância de dispersão do secundário para o primário fica:

$$X'_2 = 1,216 \cdot \left(\frac{344}{177}\right)^2 = 4,59 \, \Omega \quad (4.59)$$

Utilizando os valores obtidos no ensaio com o secundário em curto-circuito e admitindo que devido ao fato de X_M ser muito maior que $(R'_2 + j \cdot X'_2)$ calcula-se o ângulo de fase ϕ_{cc1} por:

$$\phi_{cc1} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{cc1}}{V_{cc1} \cdot I_{cc1}} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{31,27}{7,02 \cdot 4,54} \right) = 11,14^\circ \quad (4.60)$$

Sendo a tensão de curto-circuito do primário:

$$V_{cc1} = 7,02 [0^\circ V \quad (4.61)$$

E o valor eficaz da corrente de curto-circuito no primário:

$$I_{cc1} = 4,54 [-11,14^\circ A \quad (4.62)$$

Calcula-se a impedância equivalente na condição de curto-circuito por:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc1}}{I_{cc1}} = 1,55 [11,14^\circ \Omega \quad (4.63)$$

Sendo:

$$\dot{Z}_{cc1} = (R_1 + R'_2) + j.(X_1 + X'_2) \quad (4.64)$$

A reatância ($X_1 + X'_2$) é dada por:

$$(X_1 + X'_2) = Z_{cc} \cdot \text{sen}(11,14^\circ) = 1,55 \cdot \text{sen}(11,14^\circ) = 0,299 \Omega \quad (4.65)$$

De acordo com CHAPMAN (2005), para determinar a reatância de cada um dos enrolamentos, pode-se assumir que:

$$X_1 = X'_2 = 0,5 \cdot X_{eq} \quad (4.66)$$

Portanto, através do ensaio de curto-circuito chega-se a novos valores de reatâncias de dispersão dos enrolamentos:

$$X_1 = 0,149 \Omega \quad (4.67)$$

$$X'_2 = 0,149 \Omega \quad (4.68)$$

4.4.2. Parâmetros físicos do transformador de metal amorfo

Utilizando os valores obtidos no ensaio com o secundário aberto calcula-se o ângulo de fase ϕ_1 por:

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1,41}{219,99 \cdot 0,056} \right) = 83,43^\circ \quad (4.69)$$

Sendo a tensão no primário:

$$\dot{V}_1 = 219,99 \angle 0^\circ \text{ V} \quad (4.70)$$

E o valor eficaz da corrente no primário:

$$\dot{I}_1 = 0,056 \angle -83,43^\circ \text{ A} \quad (4.71)$$

Calcula-se a impedância equivalente do primário por:

$$\dot{Z}_{eq1} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = 3928 \angle 83,43^\circ \Omega \quad (4.72)$$

Considerando:

$$\dot{Z}_{eq1} = \dot{Z}_1 + \frac{(R_{fe} \cdot jX_M)}{(R_{fe} + jX_M)} \quad (4.73)$$

Sendo a resistência do enrolamento de 220V R1 medida a 14 °C com o micro ohmímetro da marca INSTRUM modelo MicroOhm 100i:

$$R_{1(14^\circ\text{C})} = 0,620 \Omega \quad (4.74)$$

Corrigindo a resistência R_1 para uma temperatura de 100 °C, tem-se:

$$R_{1(100^\circ\text{C})} = 0,620 \cdot (1 + 0,00364 \cdot (100 - 14)) = 0,814 \Omega \quad (4.75)$$

E a tensão medida no secundário a vazio, referida ao primário:

$$V_2' = 113,17 \cdot \left(\frac{344}{177}\right) = 219,95 \text{ V} \quad (4.76)$$

Determina-se a resistência equivalente das perdas no ferro por:

$$R_{fe} = \frac{(V_2')^2}{P_{ferro}} = \frac{(V_2')^2}{P_1 - I_1^2 \cdot R_1} = \frac{219,95^2}{1,41 - 0,056^2 \cdot 0,814} = 34373 \Omega \quad (4.77)$$

Da equação 4.73, retira-se que:

$$Z_{eq1} \cdot \cos(\phi_1) = R_1 + \frac{(R_{fe} \cdot X_M^2)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \quad (4.78)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância magnetizante:

$$X_M = 3954 \Omega \quad (4.79)$$

Da equação 4.73, também se retira que:

$$Z_{eq1} \cdot \sin(\phi_1) = X_1 + \frac{(R_{fe}^2 \cdot X_M)}{(R_{fe}^2 + X_M^2)} \quad (4.80)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância de dispersão do primário:

$$X_1 = 0,693 \Omega \quad (4.81)$$

Utilizando os valores obtidos no ensaio com o primário aberto calcula-se o ângulo de fase ϕ_2 por:

$$\phi_2 = \cos^{-1} \cdot \left(\frac{P_2}{V_2 \cdot I_2}\right) = \cos^{-1} \cdot \left(\frac{1,47}{113,02 \cdot 0,108}\right) = 83,08^\circ \quad (4.82)$$

Sendo a tensão no secundário:

$$\dot{V}_2 = 113,02 \angle 0^\circ \text{ V} \quad (4.83)$$

E o valor eficaz da corrente no secundário:

$$I_1 = 0,108 \angle -83,08^\circ \text{ A} \quad (4.84)$$

Calcula-se a impedância equivalente do secundário por:

$$Z_{eq2} = \frac{\dot{V}_2}{I_2} = 1046 \angle 83,08^\circ \Omega \quad (4.85)$$

Considerando:

$$\dot{Z}_{eq2} = \dot{Z}_2 + \frac{(R_{fe} \cdot jX_M)}{(R_{fe} + jX_M)} \quad (4.86)$$

Sendo a resistência R_2 medida a 14 °C:

$$R_{2(14^\circ\text{C})} = 0,187 \Omega \quad (4.87)$$

Corrigindo a resistência R_2 para uma temperatura de 100 °C, tem-se:

$$R_{2(100^\circ\text{C})} = 0,188 \cdot (1 + 0,00364 \cdot (100 - 14)) = 0,244 \Omega \quad (4.88)$$

E o valor eficaz da tensão medida no primário a vazio, referida ao secundário:

$$V'_1 = 219,69 \cdot \left(\frac{177}{344}\right) = 113,04 \text{ V} \quad (4.89)$$

Determina-se a resistência equivalente das perdas no ferro por:

$$R_{fe2} = \frac{(V'_1)^2}{P_{ferro}} = \frac{(V'_1)^2}{P_2 - I_2^2 \cdot R_2} = \frac{113,04^2}{1,47 - 0,108^2 \cdot 0,244} = 8709 \Omega \quad (4.90)$$

Referindo a resistência equivalente das perdas no ferro para o primário fica:

$$R_{fe} = 8709 \cdot \left(\frac{344}{177}\right)^2 = 32896 \Omega \quad (4.91)$$

Da equação 4.80, retira-se que:

$$Z_{eq2} \cdot \cos(\phi_2) = R_2 + \frac{(R_{fe2} \cdot X_{M2}^2)}{(R_{fe2}^2 + X_{M2}^2)} \quad (4.92)$$

Deste modo, chega-se ao valor da reatância magnetizante:

$$X_{M2} = 1052 \Omega \quad (4.93)$$

Referindo o valor da reatância magnetizante para o primário fica:

$$X_M = 1052 \cdot \left(\frac{344}{177}\right)^2 = 3974 \Omega \quad (4.94)$$

Através da equação 4.80, também se chega ao valor da reatância de dispersão do secundário:

$$X_2 = 2,125 \Omega \quad (4.95)$$

Referindo o valor da reatância de dispersão do secundário para o primário fica:

$$X'_2 = 2,125 \cdot \left(\frac{344}{177}\right)^2 = 8,027 \Omega \quad (4.96)$$

Utilizando os valores obtidos no ensaio com o secundário em curto-circuito e admitindo que $\dot{I}_1 = \dot{I}'_2$ devido ao fato de X_M ser muito maior que $(R'_2 + j \cdot X'_2)$ calcula-se o ângulo de fase ϕ_{cc1} por:

$$\phi_{cc1} = \cos^{-1} \cdot \left(\frac{P_{cc1}}{V_{cc1} \cdot I_{cc1}}\right) = \cos^{-1} \cdot \left(\frac{28,14}{6,334,54}\right) = 11,71^\circ \quad (4.97)$$

Sendo a tensão de curto-circuito do primário:

$$V_{cc1} = 6,33 [0^\circ V \quad (4.98)$$

E o valor eficaz corrente de curto-circuito no primário:

$$I_{cc1} = 4,54 [-11,71^\circ A \quad (4.99)$$

Calcula-se a impedância equivalente na condição de curto-circuito por:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc1}}{I_{cc1}} = 1,39 [11,71^\circ \Omega \quad (4.100)$$

Sendo:

$$\dot{Z}_{cc1} = (R_1 + R'_2) + j.(X_1 + X'_2) \quad (4.101)$$

A reatância ($X_1 + X'_2$) é dada por:

$$(X_1 + X'_2) = Z_{cc} \cdot \text{sen}(11,71^\circ) = 1,39 \cdot \text{sen}(11,71^\circ) = 0,282 \Omega \quad (4.102)$$

De acordo com (CHAPMAN, 2005), para determinar a reatância de cada um dos enrolamentos, pode-se assumir que:

$$X_1 = X'_2 = 0,5 \cdot X_{eq} \quad (4.103)$$

Portanto, através do ensaio de curto-circuito chega-se a novos valores de reatâncias de dispersão dos enrolamentos:

$$X_1 = 0,141 \Omega \quad (4.104)$$

$$X'_2 = 0,141 \Omega \quad (4.105)$$

4.4.3. Cálculo do rendimento dos transformadores fabricados

De acordo com (NOGUEIRA; ALVES, 2009), o rendimento (η) para cada transformador é obtida pela razão entre as potências reais de entrada e saída, ou seja, considerando o rendimento de um transformador, será a razão entre a potência ativa aplicada na carga e a potência ativa, proveniente da fonte, entregue ao transformador. O rendimento pode ser calculado conforme equação 4.106.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \cdot 100\% \quad (4.106)$$

Para que as perdas nos transformadores possam ser supridas, é necessário que a potência de entrada seja igual a potência de saída incluindo a potência das perdas, como verificado na equação 4.107.

$$P_{entrada} = P_{saída} + P_{ferro} + P_{condutor} \quad (4.107)$$

Desta forma, a equação (4.106) pode ser reescrita como:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{ferro} + P_{condutor}} \cdot 100\% \quad (4.108)$$

De acordo com Chapman (2013), a potência de saída de um transformador pode ser determinada de acordo com a equação 4.109.

$$P_{saída} = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\theta) \quad (4.109)$$

Sendo: $\cos(\theta)$ o fator de potência da carga.

As perdas no condutor e as perdas no ferro foram obtidas nos ensaios em vazio e curto-circuito, pois quando o transformador está a vazio, não existe corrente no secundário e não há perdas no cobre deste enrolamento. A corrente em vazio no primário é muito reduzida de tal forma que as perdas no condutor possam ser desprezadas, portanto, a potência ativa medida em vazio representa as perdas no ferro.

No ensaio de curto-circuito circulam as correntes nominais nos enrolamentos, estando o transformador alimentado com tensão reduzida. O fluxo magnético é muito pequeno devido ao fato das tensões serem pequenas, praticamente não produzindo perdas no ferro. Deste modo a potência ativa consumida durante o ensaio de curto-circuito representa as perdas nos condutores do transformador.

Desta maneira, o rendimento pode ser determinado por:

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\theta)}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\theta) + P_{ferro} + P_{condutor}} \cdot 100\% \quad (4.110)$$

Portanto, considerando uma carga puramente resistiva, por consequência, um fator de potência da carga unitário, calcula-se o rendimento do transformador com núcleo de aço silício GO por:

$$\eta = \frac{110 \cdot 9,09 \cdot 1}{110 \cdot 9,09 \cdot 1 + 6,72 + 31,27} \cdot 100\% = 96,34\% \quad (4.111)$$

E o rendimento do transformador com núcleo de metal amorfo por:

$$\eta = \frac{110 \cdot 9,09 \cdot 1}{110 \cdot 9,09 \cdot 1 + 1,41 + 28,14} \cdot 100\% = 97,13\% \quad (4.112)$$

5. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentados os principais valores ensaiados e calculados, bem como serão comparados e analisados e por fim serão feitas as considerações finais.

5.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da tabela 5.1 podem-se verificar os resultados obtidos através dos ensaios e medições realizados nos transformadores fabricados.

Tabela 5.1 – Valores ensaiados dos transformadores fabricados.

Características Ensaizadas	Transformador Núcleo Aço GO	Transformador Núcleo Metal Amorfo
Relação de transformação	$k_v = 1,94 \text{ p.u.}$	$k_v = 1,94 \text{ p.u.}$
Resistência do enrolamento primário	$R_{1(100^\circ\text{C})} = 1,090 \Omega$	$R_{1(100^\circ\text{C})} = 0,814 \Omega$
Resistência do enrolamento secundário	$R_{2(100^\circ\text{C})} = 0,247 \Omega$	$R_{2(100^\circ\text{C})} = 0,244 \Omega$
Reatância de dispersão do primário (ensaio a vazio)	$X_1 = 0,405 \Omega$	$X_1 = 0,693 \Omega$
Reatância de dispersão do primário (ensaio em curto)	$X_1 = 0,149 \Omega$	$X_1 = 0,141 \Omega$
Reatância de dispersão do secundário (ensaio a vazio)	$X_2 = 1,216 \Omega$	$X_2 = 2,125 \Omega$
Reatância de dispersão do secundário (ensaio em curto)	$X_2 = 0,0394 \Omega$	$X_2 = 0,0373 \Omega$
Resistência do ferro (secundário aberto)	$R_{fe} = 7213 \Omega$	$R_{fe} = 34373 \Omega$

Resistência do ferro (primário aberto)	$R_{fe} = 7188 \Omega$	$R_{fe} = 32896 \Omega$
Reatância magnetizante (secundário aberto)	$X_M = 2167 \Omega$	$X_M = 3954 \Omega$
Reatância magnetizante (primário aberto)	$X_M = 2160 \Omega$	$X_M = 3974 \Omega$
Corrente a vazio	$I_0 = 0,106 A$	$I_0 = 0,056 A$
Impedância de curto-circuito	$Z_{cc} = 1,55 \%$	$Z_{cc} = 1,39 \%$
Perdas nos condutores	$P_{condutor} = 31,27 W$	$P_{condutor} = 28,14 W$
Perdas no ferro	$P_{ferro} = 6,72 W$	$P_{ferro} = 1,41 W$
Rendimento	$\eta = 96,34\%$	$\eta = 97,13\%$
Elevação de temperatura no núcleo	$\Delta T_{nuc.} = 28,7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T_{nuc.} = 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Elevação de temperatura no enrolamento	$\Delta T_{enr.} = 42,0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T_{enr.} = 34,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Perda magnética a 1,25T 60Hz	$P_{mag} = 1,158 W/kg$	$P_{mag} = 0,210 W/kg$
Perda magnética a 1,80T 60Hz	$P_{mag} = 3,343 W/kg$	$P_{mag} = 38,606 W/kg$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Com os resultados obtidos foi possível obter algumas importantes informações:

- A relação de transformação e as resistências dos enrolamentos secundários ficaram bem próximas entre os dois transformadores, isto devido ao fato de ter sido mantido o mesmo número de espiras e mesmas dimensões geométricas, entretanto as resistências dos enrolamentos primários apresentaram uma diferença na ordem de 34%, provavelmente ocasionado pela diferença no espalhamento das espiras no momento da bobinagem.
- As reatâncias de dispersão do primário e secundário, medidas através do ensaio de curto-circuito apresentaram valores praticamente idênticos, entretanto, quando comparado ao valor das reatâncias de dispersão medidos através do ensaio de circuito aberto existe uma grande diferença. Esta

diferença ocorre pelo fato que, se comparar os valores das reatâncias X_1 e X_2 com o valor da reatância magnetizante X_M , os mesmos se tornam praticamente desprezíveis, sendo assim, os valores ensaiados de X_1 e X_2 acabam ficando muito susceptíveis a pequenos erros de medição, que acabam resultando em grandes variações. Portanto, apesar de tecnicamente ser possível a utilização de ambos os ensaios para obtenção dos valores de reatância de dispersão, na prática é mais aconselhável e confiável a utilização do ensaio de curto-circuito para obtenção dos valores.

- A resistência de perdas no ferro do transformador de metal amorfo ficou próxima a 4,8 vezes maior do que a do transformador de aço silício GO e a reatância magnetizante na ordem de 2 vezes maior, isto significa que o metal amorfo possui uma impedância equivalente do ramo magnetizante do transformador superior ao aço silício GO. Esta impedância é tanto maior quanto maiores forem a permeabilidade magnética e a resistividade elétrica do material do núcleo. Uma vez que o valor máximo da permeabilidade magnética relativa do metal amorfo a 60 Hz se situa em torno de 70000, enquanto a mesma grandeza para o aço silício GO fica na faixa dos 40000. Já a resistividade elétrica do metal amorfo está entre 130 e 150 $\mu\Omega\text{m}$, enquanto para o aço silício GO esta entre 10 e 47 $\mu\Omega\text{m}$ (FINOCCHIO et al, 2015).
- A elevada permeabilidade magnética do metal amorfo favorece um melhor acoplamento magnético e seu elevado valor de resistência elétrica acarreta em menores perdas por correntes parasitas no núcleo, ocasionando assim uma corrente a vazio bem inferior.
- A impedância de curto-circuito e as perdas nos condutores ficaram semelhantes em ambos os transformadores, entretanto, as perdas no ferro do transformador de metal amorfo foram praticamente 80% menores, que somando às perdas nos enrolamentos, impactaram em um acréscimo de 0,79% no rendimento do transformador quando comparado ao transformador de aço silício GO.

- O transformador de metal amorfo apresentou elevações de temperatura inferiores em relação ao transformador de aço silício GO, isto devido ao fato de apresentar menores perdas que consecutivamente resultam em dissipação térmica. Também se verificou que as perdas magnéticas (W/kg) do núcleo de metal amorfo em 60 Hz são muito inferiores às perdas do aço silício GO, entretanto, a partir do momento de saturação magnética do metal amorfo (1,60 T) as perdas magnéticas crescem exponencialmente, equivalendo ao aço silício GO próximo a 1,70 T e se tornando 15 vezes superior em 1,80 T, o que é comum acontecer em materiais magneticamente saturados, e por isso deve ser evitada.

Através da tabela 5.2 podem-se verificar algumas vantagens e desvantagens da utilização de ambos os materiais magnéticos na fabricação de transformadores.

Tabela 5.2 – Vantagens e desvantagens.

Transformador Núcleo Aço GO	Transformador Metal Amorfo
Vantagens	Vantagens
Ampla gama de fornecedores	Redução das perdas magnéticas
Tecnologia de fabricação bem difundida	Menor corrente de Excitação
Menor preço de aquisição	Menor elevação de temperatura no núcleo magnético
Desvantagens	Desvantagens
Maiores perdas magnéticas	Limitação de fornecedores
Maior corrente de excitação	Tecnologia de fabricação em aprimoramento
Maior elevação de temperatura no núcleo magnético	Maior preço de aquisição

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo projetar e construir dois transformadores monofásicos de mesmas características, sendo um construído com núcleo de ferro amorfo e outro com aço silício de grão orientado para posteriores comparações e análises entre ambos.

Neste estudo podem-se avaliar as principais características do metal amorfo, principalmente relacionadas à utilização na fabricação dos núcleos magnéticos de transformadores, bem como pontuar as principais diferenças técnicas e físicas em relação aos núcleos magnéticos comuns de aço silício.

Também foi elaborado um guia de cálculo para elaboração do projeto de um transformador monofásico com núcleo de metal amorfo, bem como foi fabricado e comparado através de ensaios elétricos com um transformador monofásico com núcleo de aço silício GO.

Foi provado que os transformadores com núcleo de metal amorfo possuem as menores perdas magnéticas dentro da zona linear (não saturado) e menor corrente de magnetização se comparado com os transformadores de aço silício de grão orientado, contudo, seu custo de aquisição superior faz com que, por motivos econômicos, em diversas aplicações ainda seja cooptado pelos núcleos de aço silício.

A simples substituição dos transformadores comuns com núcleo de aço silício por transformadores de metal amorfo pode proporcionar uma elevada economia de energia, principalmente nos sistemas de distribuição de energia elétrica rurais, onde os transformadores operam na maior parte do tempo em baixa carga. Nessas condições, a redução das perdas no núcleo se torna extremamente importante, trazendo implicações positivas econômicas e ambientais.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que para trabalhos futuros sejam aprofundados os estudados nos seguintes tópicos:

- Medição e análise da corrente IN-RUSH em transformadores com núcleo de metal amorfo;
- Estimação do tempo de vida útil em transformadores com núcleo de metal amorfo;
- Verificação da viabilidade financeira e cálculo do tempo de retorno do investimento para substituição de transformadores de distribuição com núcleo de aço silício GO por transformadores com núcleo de metal amorfo;
- Elaborar o mesmo estudo utilizando ambos os transformadores com mesmas seções magnéticas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARTIGNONI, A. **Transformadores**, Porto Alegre, RS: Editora Globo, 1991.

MAURÍCIO A. F. S. “**Construção e caracterização de um transformador de 562,5 VA com núcleo de ferro amorfo**” (Dissertação de Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Electrotécnica, Universidade Nova de Lisboa, 2014.

CAMPOS, M.L. **Estudo de Aplicação Experimental e Viabilidade de Utilização de Transformadores de Distribuição com Núcleo Amorfo**, (Dissertação de Mestrado), Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2006.

GUEDES, M. V. **Máquinas Eléctricas I** - Apontamentos. Faculdade de Engenharia- Universidade do Porto, 2003.

DECRISTOFARO, N. **An Amorphous core transformer: design and experimental performance**. Materials Science and Engineering A226-228, (pp. 1079-1082), 1997.

CHAVES, D. **Eficiência Energética com transformadores de distribuição de metal amorfo (TDMAs)**, Promotion Partnership Vijai Elétrica do Brasil, 2010.

ZHAO, X. *et al.* **Development of a 630 kVA Three-Phase Transformer With Amorphous Alloy Cores**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, (pp. 2051-2054), 2007.

PINA, J. M. **Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura**. Dissertação de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.

B. X. DU & D. S. LIU, "**Dynamic Behavior of Magnetostriction-Induced Vibration and Noise of Amorphous Alloy Cores**," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 4, pp. 1-8, April 2015, Art no. 7208708.

W. SIMA, Y. LIU, P. SUN, Y. ZHOU, D. PENG & M. YANG, "**The Effect of Different Core Materials on Transformer Inrush Currents**," 2018 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), Singapore, 2018.

B. A. LUCIANO, M. E. DE MORAIS & C. S. KIMINAMI, "**Single phase 1-kVA amorphous core transformer: design, experimental tests, and performance after annealing**" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 4, pp. 2152-2154, July 1999.

M. R. ISLAM, G. LEI, Y. GUO & J. ZHU, "**Optimal Design of High-Frequency Magnetic Links for Power Converters Used in Grid-Connected Renewable Energy Systems**" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 2006204.

M. JAFARI, Z. MALEKJAMSHIDI, G. LEI, T. WANG, G. PLATT & J. ZHU, "**Design and Implementation of an Amorphous High-Frequency Transformer Coupling Multiple Converters in a Smart Microgrid**" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, pp. 1028-1037, Feb. 2017.

F. R. ISMAGILOV, V. E. VAVILOV & D. V. GUSAKOV, "**High-Efficiency Transformer-Rectifier Unit: Design and Experimental Studies**" 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2019, pp. 1-4.

O. ALDOSARI, L. A. G. RODRIGUEZ, J. C. BALDA & S. K. MAZUMDER, "**Design Trade-Offs for Medium- and High-Frequency Transformers for Isolated Power Converters in Distribution System Applications**" 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Charlotte, NC, 2018, pp. 1-7.

MIN CHEN *et al.*, "The magnetic properties of the ferromagnetic materials used for HTS transformers at 77 K" in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 2313-2316, June 2003.

HITACHI METALS, "**Liga metálica amorfa para uso em transformador para distribuição eficiente de energia**" [Online]. Disponível em: <https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-p/pdf/electricity/E-06.pdf> [Acesso em 17 de julho de 2019].

LAWRENCE V. H. "**Princípio da Ciência dos Materiais**", 5ª ed. Edgard Blücher Ltda, 1970.

CULLITY, B. D., & GRAHAM, C. D. (2009). "**Introduction to Magnetic Materials**". New Jersey: A.Johm Wiley&Sons. Inc.

APERAM, "**Produtos**". [Online]. Disponível em: <http://brasil.aperam.com/produtos/aco-eletrico/>. [Acesso em 15 de junho de 2019].

BARROS, D. F. T. "**Análise da viabilidade financeira da utilização de transformadores de núcleo amorfo estudo de caso aplicado ao projeto de subestação aérea de 75 KVA**" Monografia de Graduação, Universidade Federal do Ceará, 2011.

SILVA, P. R. D. "**Otimização de projeto de transformadores de distribuição que empregam núcleo amorfo e óleo vegetal isolante**" Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria - RS, 2015.

COLTMAN, J. W. "**The transformer**", IEEE - Industry Applications Magazine, Janeiro 2002.

ABNT NBR 5356-1:2007 – **Transformadores de Potência. Parte 1: Generalidades.**

CHAPMAN, S. J. “**Electric Machinery Fundamentals**”. 4ª ed. Nova York: McGraw Hill, 2005.

MEURER, E. J. “**Estudos das Perdas Interlaminares em Máquinas Elétricas**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BASTOS, J. P. A. “**Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**”. 2. ed. [S.I.]: UFSC, 2004.

RÜNCOS, F. “**Projeto e análise da máquina elétrica trifásica – Vol. 3: As perdas da máquina elétrica**”. 1ª ed. Jaraguá do Sul - SC, 2018. p.282.

ABNT NBR 5356-2:2007 – **Transformadores de Potência. Parte 2: Aquecimento.**

BRAGA N., “**Tabela de fios de cobre**” [Online]. Disponível em: <http://newtonbraga.com.br/index.php/almanaque/129-tabela-de-fios-de-cobre-awg-x-mm-alm0009.html>. [Acesso em 17 junho 2019].

W.G. HURLEY E W. H. WÖLFLE. “**Transformers and inductors for power electronics: theory, design and applications**”. 1ª edição, 2013. P.345.

NOGUEIRA, D, D. S.; ALVES, D. P. “**Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais**”. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. p.212.

FINOCCHIO, M. A. F.; MENDONÇA, M. ; DESTRO, J. Z.; GONÇALVES, L. F. M. “**Análise da eficiência energética do transformador de distribuição com metal amorfo**”. Revista Técnico-Científica do CREA-PR - ISSN 2358-5420 - 3ª edição - outubro de 2015.