

Daniel Schmitz

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO
ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO PARA ANÁLISE DE
PERDAS MAGNÉTICAS EM ESTADORES DE MOTORES
ELÉTRICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Coorientador: Eng. Sebastião Lauro Nau, Dr.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schmitz, Daniel

Desenvolvimento de um dispositivo eletromagnético trifásico para análise de perdas magnéticas em estatores de motores elétricos / Daniel Schmitz ; orientador, Nelson Sadowski ; co-orientador, Sebastião Lauro Nau. - Florianópolis, SC, 2013.

134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Perdas magnéticas. 3. Chapas de aço. 4. Métodos de ensaio. 5. Máquinas elétricas. I. Sadowski, Nelson. II. Nau, Sebastião Lauro. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Daniel Schmitz

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO
ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO PARA ANÁLISE DE
PERDAS MAGNÉTICAS EM ESTADORES DE MOTORES
ELÉTRICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de Setembro de 2013.

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pedro Armando da Silva Jr, Dr.

IFSC

À minha noiva, Bruna que soube me compreender nos momentos mais difíceis, não me faltando amor e carinho.

Aos meus pais, Amilton e Claudia, base da minha vida e meu porto seguro. Verdadeiros mestres que me ensinaram o significado das palavras honestidade e trabalho.

Ao meu irmão, Claudio por estar sempre presente e pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

À UFSC e ao GRUCAD, por proporcionarem um ensino gratuito e de qualidade indiscutível.

Ao professor Nelson Sadowski, pela confiança depositada em mim ao me orientar e incentivar nos momentos mais difíceis do mestrado.

Aos professores João Pedro Assumpção Bastos, Walter Pereira Carpes Júnior, Mauricio Valencia Ferreira da Luz e Renato Carlson pelas aulas ministradas.

Ao professor Nelson Jhoe Batistela, pelas importantes contribuições durante a realização deste trabalho.

À empresa WEG Equipamentos Elétricos, por disponibilizar toda a sua estrutura e por incentivar constantemente o desenvolvimento de seus colaboradores. Aos senhores Sebastião Lauro Nau e Hugo Gustavo Gomez Mello pela confiança e apoio durante todo o período do mestrado.

Aos colegas de trabalho pelo convívio diário e pela contribuição na produção dos protótipos e execução dos inúmeros ensaios ao longo dessa jornada, especialmente aos colegas Matheus Andre Campregher, Marcio Gabler, Ana Paula Stolf, Briam Cavalca Bork, Vinicius Sell Goncalves, Thiago Schwinden Leal. Obrigado a todos.

Aos senhores Mário Celio Contin e João Evangelista Pacheco de Souza por compartilharem seus conhecimentos.

Aos colegas Fabio Tadashi Horigome e Waldiberto De Lima Pires pelo tempo que dedicaram na leitura dessa dissertação e pelas importantes contribuições no texto final.

À minha família que soube compreender minhas ausências neste período.

A todos meu sincero muito obrigado!

“... sofrimento não é castigo, é lapidação.”

*Roberto Ferreira, trecho de uma das suas músicas
“Bombeiros de Deus”.*

RESUMO

Este estudo envolve o projeto e o desenvolvimento de um dispositivo eletromagnético trifásico para análise de perdas magnéticas em estatores de máquinas elétricas girantes. O trabalho foi amparado por uma revisão bibliográfica que motivou a confecção de uma bancada experimental, desenvolvida pelo GRUCAD em conjunto com a empresa WEG Equipamentos Elétricos. Durante o trabalho são avaliadas principalmente as perdas magnéticas nas chapas de aço para fins elétricos no formato de um estator de um motor elétrico de indução trifásico. São avaliados três fornecedores de um mesmo tipo de chapa de aço, para fins de comparação entre os resultados obtidos por três métodos experimentais diferentes, a saber: quadro de Epstein, ensaio em motores elétricos de indução trifásicos completos e bancada experimental desenvolvida.

Palavras-chave: perdas magnéticas, chapas de aço, métodos de ensaio, máquinas elétricas.

ABSTRACT

This study approaches the design and development of a three-phase electromagnetic device for analysis of magnetic losses in the stators of rotating electric machines. It was supported by a literature review that led to the construction of an experimental bench that was developed by GRUCAD and WEG Electric Equipments company. The proposed method allows a faithful evaluation of the magnetic losses taking place in the stator core of a three phase induction motor. For comparative purposes, three suppliers of the same type of electrical steel sheets are evaluated using three different experimental methods, namely: the Epstein frame test, the no-load test with complete three phase induction motor, and the proposed electromagnetic device.

Keywords: Magnetic losses, steel plate, testing methods, electric machine

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Representação simplificada da estrutura de domínios para um material ferromagnético policristalino [3]. 34
- Figura 2.2 – Correntes de Foucault geradas pela variação do fluxo magnético em (a) um núcleo maciço (b) um núcleo laminado [3]..... 35
- Figura 2.3 – Polo de um motor síncrono com ímãs permanentes. (a) Indicação dos pontos para análise do comportamento da indução magnética. (b) Distribuição do fluxo magnético. [5].. 36
- Figura 2.4 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “A”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5]...... 37
- Figura 2.5 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “B”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5]...... 37
- Figura 2.6 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “C”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5]...... 37
- Figura 2.7 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “D”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5]...... 38
- Figura 2.8 – Perdas por histerese alternante e rotacional em função do campo magnético [7]. 39
- Figura 2.9 - Quadro de Epstein. a) Quadro de Epstein comercial da Brockhaus [8], b) Domínio de cálculo e distribuição do fluxo magnético nas amostras do quadro de Epstein [9]. 40
- Figura 2.10 - Equipamento de teste com chapa única (Single Sheet) [8]. 41
- Figura 2.11 - Ensaio Core Test, a) Estator como amostra no ensaio, [10] b) Distribuição do fluxo magnético no estator..... 42
- Figura 3.1 - Sistema de ensaio. a) Visualização da bancada de ensaio com estator na posição de ensaio, b) Visualização em corte da posição do dispositivo no interior do estator. 43

- Figura 3.2 - Simulação de $\frac{1}{4}$ do dispositivo de ensaio. a) Distribuição das linhas de fluxo, b) Mapeamento das induções magnéticas. 44
- Figura 3.3 - Sistema de Calibração. a) Vista externa do dispositivo de calibração, b) Vista interna do dispositivo de calibração. 45
- Figura 3.4 - Simulação do ensaio de calibração do dispositivo. a) Distribuição do fluxo magnético no dispositivo eletromagnético e no anel de calibração, b) Mapeamento das induções magnéticas no dispositivo eletromagnético e no anel de calibração..... 46
- Figura 3.5 – Simulação do ensaio Core Test com o anel laminado. 47
- Figura 3.6 – Simulação do ensaio de calibração do dispositivo junto com o anel laminado, ambos estáticos..... 47
- Figura 4.1 - Cotas das ranhuras projetadas. a) Estator, b) Dispositivo. 50
- Figura 4.2 – Simulação em MEF do dispositivo eletromagnético com estator. (a) Geometria, (b) Malha. 50
- Figura 4.3 - Fluxo magnético no entreferro do dispositivo com 12 ranhuras. 51
- Figura 4.4 - Fluxo magnético no entreferro do dispositivo com 24 ranhuras. 52
- Figura 4.5 – Diagrama de bobinagem do dispositivo eletromagnético. 52
- Figura 4.6 - Localização dos enrolamentos dentro da ranhura..... 53
- Figura 4.7 - Simulação do ensaio de calibração em elementos finitos. (a) Geometria, (b) Malha. 55
- Figura 4.8 –Induções magnéticas e as linhas de fluxo magnético no dispositivo e no anel de calibração. 55
- Figura 4.9 – Sistema projetado para permitir o giro do anel em torno do dispositivo eletromagnético..... 56
- Figura 4.10 - Induções magnéticas e as linhas de fluxo magnético no anel laminado no ensaio Core Test. 57
- Figura 4.11 - Diagrama das amostras fabricadas para validação dos resultados. 58
- Figura 5.1 – Chapa de aço estampada para o dispositivo eletromagnético. 59

Figura 5.2 – Eixo e pacote de chapas para a fabricação do dispositivo.	60
Figura 5.3 – Dispositivo eletromagnético trifásico bobinado.....	61
Figura 5.4 – Dispositivo eletromagnético trifásico fixado na base de ensaio.	62
Figura 5.5 – Bancada de calibração. a) Anel laminado, b) Dispositivo dentro da carcaça com o anel laminado inserido.	62
Figura 5.6 – Tampas dianteira e traseira para a bancada de ensaio.	63
Figura 5.7 – Bancada desenvolvida para calibração do dispositivo eletromagnético.....	64
Figura 5.8 – Esquema Elétrico da bancada de calibração do dispositivo – Método 1	65
Figura 5.9 – Bancada de calibração do dispositivo eletromagnético – Método 1.....	66
Figura 5.10 – Anel laminado bobinado, utilizado no ensaio de Core Test.	67
Figura 5.11 - Esquema Elétrico da bancada de ensaio Core Test – Método 2.....	68
Figura 5.12 - Bancada de ensaio Core Test – Método 2.....	69
Figura 5.13 – Bobina Exploratória em torno do anel laminado – Método 2	70
Figura 5.14 - Esquema Elétrico da bancada de calibração do dispositivo – Método 2	71
Figura 5.15 - Bancada de calibração do dispositivo eletromagnético – Método 2.....	72
Figura 5.16 – Programa desenvolvido para aquisição dos dados na realização dos ensaios.	73
Figura 5.17 – Programa desenvolvido para o processamento dos dados e visualização dos resultados.	74
Figura 5.18 - Circuito equivalente do dispositivo eletromagnético.....	75
Figura 5.19 – Defasagem da tensão do primário com a tensão do secundário.	77

Figura 5.20 – Indução magnética no dente do dispositivo medida através da bobina exploratória.	79
Figura 5.21 - Bobina embalada fornecida para empresa, [14].	80
Figura 5.22 – Tiras recortadas para a fabricação das amostras.	81
Figura 5.23 - Amostras para os ensaios com o quadro de Epstein.	81
Figura 5.24 - Amostras para os ensaios com o dispositivo eletromagnético.	82
Figura 5.25 - Amostras para os ensaios com o dinamômetro.	82
Figura 6.1 – Resultados dos ensaios com o quadro de Epstein em 60Hz.	85
Figura 6.2– Resultados dos ensaios com o quadro de Epstein em 50Hz.	86
Figura 6.3 – Resultados dos ensaios com o quadro de Epstein em 40Hz.	87
Figura 6.4 - Resultados dos ensaios com os motores da carcaça IEC/ABNT 112.	89
Figura 6.5 - Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 1.	91
Figura 6.6 – Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 1.	92
Figura 6.7 - Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 2.	94
Figura 6.8 - Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 2.	95
Figura 6.9 – Comparação dos resultados obtidos nos diferentes métodos de calibração.	97
Figura 6.10 – Resultados das amostras do dispositivo em função da indução magnética máxima em 60Hz.	99
Figura 6.11 – Resultados das amostras do dispositivo em função da tensão eficaz de fase do secundário em 60Hz.	100
Figura 6.12 – Resultados das amostras do dispositivo em função da indução magnética máxima em 50Hz.	101

Figura 6.13 – Resultados das amostras do dispositivo em função da tensão eficaz de fase do secundário em 50Hz.....	102
Figura 6.14 – Resultados das amostras do dispositivo em função da indução magnética máxima em 40Hz.	103
Figura 6.15 – Resultados das amostras do dispositivo em função da tensão eficaz de fase do secundário em 40Hz.....	104
Figura 6.16 – Perdas Magnéticas em função da indução magnética e da frequência (Fornecedor A).....	105
Figura A.1 – Desenho da Chapa do Dispositivo Eletromagnético.	113
Figura A.2 – Desenho da Chapa do Estator (Amostra).	114
Figura A.3 – Desenho da Chapa do Anel de Calibração.	115
Figura B.1 – Desenho do Eixo do Dispositivo Eletromagnético.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados do Estator (amostra do ensaio).....	53
Tabela 4.2 - Dados do Dispositivo Eletromagnético Trifásico.....	54
Tabela 5.1 – Validação da medição da indução magnética no dispositivo eletromagnético.....	78
Tabela 5.2 –Validação do método de medição dos dois wattímetros. ...	80
Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios com os motores de indução.	88
Tabela 6.2 – Variação entre os resultados de perdas magnéticas obtidos pelos diferentes métodos de calibração.....	96
Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de repetibilidade de 1 a 5.	106
Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios de repetibilidade de 6 a 10.....	106
Tabela 6.5 – Resultados estatísticos dos ensaios de repetibilidade.	107
Tabela 6.6 – Classificação dos fornecedores através dos valores médios.	108
Tabela C.1 - Resultados do ensaio com o quadro de Epstein em 60Hz.	119
Tabela C.2 - Resultados do ensaio com o quadro de Epstein em 50Hz.	120
Tabela C.3 - Resultados do ensaio com o quadro de Epstein em 40Hz.	121
Tabela D.1 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase - método 1.	123
Tabela D.2 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética - método 1.	124
Tabela D.3 - Resultados do ensaio de Core Test com anel laminado..	125
Tabela D.4 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase - método 2.	126

Tabela D.5 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética - método 2. 127

Tabela E.1 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética, em 60Hz 129

Tabela E.2 - Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase, em 60Hz. 130

Tabela E.3 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética, em 50Hz 131

Tabela E.4 - Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase, em 50Hz. 132

Tabela E.5 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética, em 40Hz 133

Tabela E.6 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase, em 40Hz. 134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GRUCAD	- Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
GO	- Grão Orientado
GNO	- Grão Não Orientado
RSST	- Teste Rotacional de Chapa Única (<i>Rotational Single Sheet Tester</i>)
MEF	- Método de Elementos Finitos
WMO	- WEG Motores
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

B_t	- Indução magnética tangencial, [T]
B_r	- Indução magnética radial, [T]
P_{abs}	- Potência total de entrada, [W]
$P_{t_{ens}}$	- Perdas magnéticas totais, [W]
P_{j_1}	- Perda joule do enrolamento primário, [W]
I_{a_p}	- Corrente da Fase A do enrolamento primário, [A]
I_{b_p}	- Corrente da Fase B do enrolamento primário, [A]
V_{ac_p}	- Tensão entre as Fases A e C do enrolamento primário, [V]
V_{bc_p}	- Tensão entre as Fases B e C do enrolamento primário, [V]
φ	- Defasagem entre a tensão e a corrente do enrolamento primário, [°]
R_{j1}	- Resistência do enrolamento primário, [Ω]
P_{Est}	- Perdas magnéticas do estator, [W]
P_{dis}	- Perdas magnéticas do dispositivo, [W]
B_{pk}	- Indução magnética máxima, [T]
V_s	- Tensão eficaz de fase do enrolamento secundário, [V]
K_b	- Fator de enrolamento, [adimensional]
f	- Frequência da fonte de alimentação, [Hz]
N_e	- Número de espiras por fase
S	- Seção magnética dos dentes de um polo do dispositivo, [m ²]
FF	- Fator de forma, [adimensional]
V_{2_med}	- Tensão retificada média de fase do enrolamento secundário, [V]

V_p	- Tensão eficaz de fase do enrolamento primário, [V]
R_{fe}	- Resistência no ferro, [Ω]
X_{disp}	- Reatância de dispersão, [Ω]
X_{mag}	- Reatância de magnetização, [Ω]
C_v	- Coeficiente de variação, [%]
σ	- Desvio padrão, [W]
\bar{x}	- Média aritmética, [W]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	MOTIVAÇÃO.....	29
1.2	OBJETIVO.....	30
1.2.1	Objetivos específicos.....	30
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	31
2	ESTADO DA ARTE.....	33
2.1	CHAPA DE AÇO PARA FINS ELÉTRICOS.....	33
2.2	PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS ...	34
2.3	PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ROTACIONAIS...	36
2.4	HARMÔNICAS DE SATURAÇÃO.....	39
2.5	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS.....	40
2.5.1	Quadro de Epstein.....	40
2.5.2	<i>Single Sheet</i>	41
2.5.3	<i>Core Test</i>	41
3	MÉTODO DE ENSAIO PROPOSTO.....	43
3.1	CALIBRAÇÃO – MÉTODO 1.....	45
3.2	CALIBRAÇÃO – MÉTODO 2.....	46
3.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	48
4	DETALHAMENTO DO PROJETO.....	49
4.1	DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO.....	49
4.2	SISTEMA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 1.....	54
4.3	SISTEMA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 2.....	56
4.4	MÉTODO PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	58
5	FABRICAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	59
5.1	DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO.....	59
5.2	BANCADA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 1.....	62
5.3	BANCADA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 2.....	67
5.4	PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	72
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO.....	75
5.6	FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	80
6	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	83
6.1	DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO.....	83

6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O QUADRO DE EPSTEIN	84
6.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS MOTORES DE INDUÇÃO	88
6.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO	90
6.4.1 Calibração – Método 1	90
6.4.2 Calibração – Método 2	93
6.4.3 Comparação entre os métodos de calibração	96
6.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO	98
6.6 REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS	106
6.7 INCERTEZA DE MEDIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	107
6.8 CONCLUSÕES DA ANÁLISE EXPERIMENTAL	108
7 CONCLUSÕES	109
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
REFERÊNCIAS	111
APÊNDICE A – DESENHO DAS CHAPAS DESENVOLVIDAS NESTE TRABALHO	113
APÊNDICE B – DESENHO DO EIXO DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO	117
APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O QUADRO DE EPSTEIN	119
APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO ..	123
APÊNDICE E – RESULTADOS COM AS AMOSTRAS DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO	129

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente, aliada à necessidade de se adequar às normas de eficiência energética e de se obter menor custo na fabricação de motores elétricos, faz com que os fabricantes demonstrem uma maior preocupação referente ao rendimento de seus produtos.

Um dos fatores determinantes no valor do rendimento de um motor elétrico é a perda no núcleo magnético, que normalmente é construído com chapas de aço para fins elétricos. As chapas de aço, quando submetidas a um campo magnético variável, geram perdas magnéticas que dependem diretamente de fatores como a intensidade da indução magnética, da frequência do campo magnético, da espessura da chapa de aço, da composição química, da laminação e do recozimento. A busca por melhores parâmetros para projetos de dispositivos eletromagnéticos (especialmente motores elétricos) e dados mais confiáveis para negociações de compra e venda de matéria prima justificam a grande quantidade de pesquisa realizada no desenvolvimento de novos dispositivos para avaliação de chapas de aço para fins elétricos.

Em 2008, o mercado mundial de chapas de aço de grão não orientado atingiu a produção de 14 milhões de toneladas, representando o nicho de 1% da produção total de aço [1], interessando principalmente dois grandes segmentos econômicos, onde o Brasil tem uma forte engenharia: a siderurgia e a indústria da eletricidade.

1.1 MOTIVAÇÃO

Para a avaliação das perdas magnéticas em chapas de aço, um dos métodos mais usados é o quadro de Epstein, pois o ensaio é normatizado, simples, rápido e possui boa repetibilidade. Mas em alguns casos, nas aplicações de motores elétricos, os resultados dos ensaios realizados com amostras de chapas de aço no quadro de Epstein mostram-se incoerentes com a realidade percebida no motor, isto é, a melhor escolha do aço com base no quadro de Epstein não necessariamente resulta nas menores perdas no ferro do motor.

Dentre as razões que contribuem para essa discrepância está o fato de que no ensaio de Epstein as amostras são no formato de tiras retangulares, não sendo fiéis à geometria da chapa de um motor elétrico. Além disso, o fluxo magnético gerado nas tiras é somente de natureza

alternante não existindo as perdas magnéticas associadas ao campo magnético rotativo, existentes em uma máquina elétrica girante.

O dispositivo eletromagnético proposto nesta dissertação é associado a uma bancada experimental capaz de medir as perdas magnéticas geradas em um estator de motor elétrico (pacote de chapas), o qual é formado por dentes e por uma coroa. A alimentação elétrica do dispositivo de ensaio é realizada de forma que o fluxo magnético gerado no corpo de prova possua as mesmas características do fluxo gerado nos motores de indução trifásicos, permitindo uma melhor avaliação das perdas magnéticas nas chapas de aço, pois as condições do ensaio são mais fiéis às características de uma máquina elétrica girante.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma bancada de ensaio, possibilitando uma avaliação mais precisa das perdas magnéticas das chapas de aço que formam o núcleo ferromagnético do estator de uma máquina elétrica girante. O desenvolvimento da metodologia é assistido e validado por uma análise experimental, comparando-se os resultados de diferentes metodologias de ensaios na avaliação de perdas magnéticas em chapas de aço para fins elétricos.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Desenvolver, projetar e construir um dispositivo eletromagnético, a fim de analisar fielmente as perdas magnéticas que ocorrem nas chapas de aço dos estatores de motores elétricos trifásicos;
2. Fabricar as amostras para os ensaios com a bancada experimental proposta nesta dissertação (estatores), para o quadro de Epstein (tiras de chapa) e os motores de indução trifásicos completos para ensaio em laboratório;
3. Realizar ensaios com o quadro de Epstein (*Brockhaus Measurements*) localizado no laboratório do departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica da WEG Motores;
4. Realizar os ensaios em vazio com os motores de indução trifásicos no laboratório da WEG Motores;
5. Realizar os ensaios de calibração do dispositivo eletromagnético trifásico proposto;
6. Realizar os ensaios com os estatores fabricados para o dispositivo eletromagnético trifásico proposto;

7. Comparar os resultados obtidos nos diferentes tipos de ensaios realizados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada como segue. No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica dos trabalhos associados ao estado da arte da conceituação e dos métodos de avaliação das perdas no núcleo de dispositivos eletromagnéticos. Tal revisão aborda os principais tipos de perdas magnéticas e ensaios para determinação das mesmas. O Capítulo 3 descreve o método de ensaio proposto nesta dissertação para avaliação das perdas magnéticas em estatores de motores elétricos. No Capítulo 4 é detalhado o projeto tanto elétrico como mecânico da bancada de ensaio proposta no Capítulo 3. No Capítulo 5 é demonstrada toda a confecção da bancada de ensaio e dos protótipos construídos ao longo do estudo. No capítulo 6 é apresentado o procedimento experimental de ensaio por meio do dispositivo proposto, descrevendo a metodologia de aquisição e tratamento de dados para os diversos ensaios realizados nesta dissertação. No Capítulo 7, o trabalho é finalizado com a apresentação das conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 ESTADO DA ARTE

Os estudos mais significativos que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho serão apresentados neste capítulo, situando o estado da arte das perdas no ferro em dispositivos eletromagnéticos.

2.1 CHAPA DE AÇO PARA FINS ELÉTRICOS

A constante pesquisa em torno dos materiais ferromagnéticos é justificada pela possibilidade de redução do tamanho e melhoria do desempenho das máquinas elétricas. As chapas de aço para fins elétricos constituem-se na principal matéria prima para a fabricação de máquinas elétricas, formando seus núcleos ferromagnéticos. As chapas de aço possuem a capacidade de concentrar o fluxo magnético aplicado no exterior de uma amostra, dependendo da possibilidade e capacidade de número de “spins” se alinharem [2]. Esta propriedade é denominada como permeabilidade magnética.

As chapas de aço para fins elétricos podem ser divididas em dois grupos: Grão Orientado (GO) e Grão Não Orientado (GNO). As chapas de aço de grão orientado possuem uma maior permeabilidade magnética em uma direção, sendo utilizadas em dispositivos em que é necessária uma direção preferencial do fluxo magnético, como em transformadores de potência. As chapas de aço de grão não orientado são utilizadas em dispositivos em que é necessária a passagem do fluxo em todas as direções, como no caso de um motor elétrico. Em transformadores pequenos (baixa potência) são utilizadas chapas de grão não orientado devido ao menor custo em relação às chapas de grão orientado.

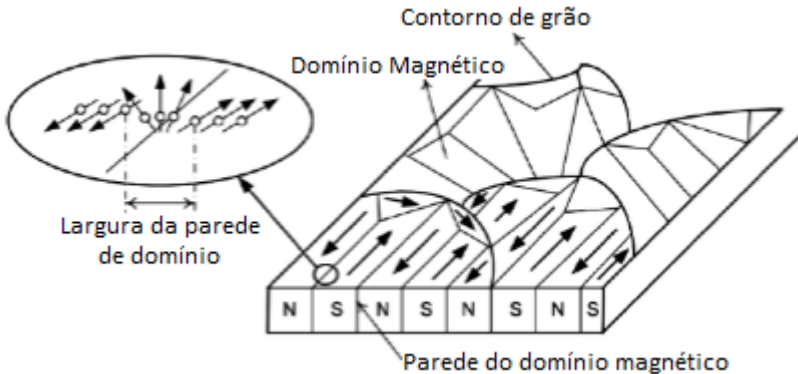
Além da permeabilidade magnética, as chapas de aço são caracterizadas pelas perdas magnéticas em função de induções magnéticas máximas. Mesmo com diversos trabalhos e estudos realizados na composição química e no processo de fabricação, o fenômeno das perdas magnéticas continua sendo significativo no rendimento de uma máquina elétrica.

2.2 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS

As perdas magnéticas clássicas são divididas em duas naturezas distintas: a perda quase estática de histerese magnética e a perda dinâmica por correntes induzidas chamadas de Correntes de Foucault [2].

A magnetização do material é realizada através da movimentação e da rotação das paredes dos domínios magnéticos, vide Figura 2.1. Os domínios magnéticos são formados por vários “spins” de elétrons orientados em uma mesma direção [2], sendo delimitados pelas paredes de domínio. A energia absorvida para o deslocamento destas paredes através da aplicação de um fluxo magnético neste material é conhecida como perda por Histerese.

Figura 2.1 – Representação simplificada da estrutura de domínios para um material ferromagnético policristalino [3].

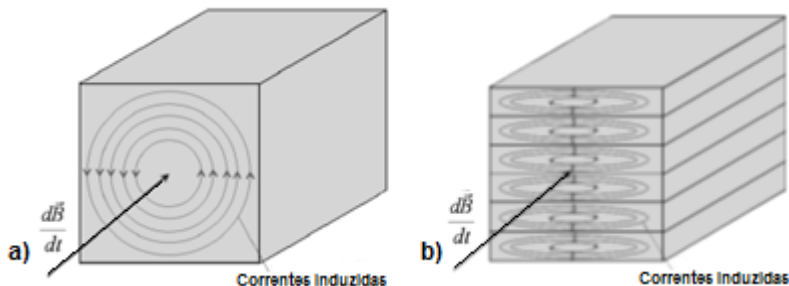


As perdas por histerese dependem de características micro estruturais do material, como as inclusões de impurezas, tensões mecânicas, do tamanho e das ligações dos grãos [2]. As perdas por histerese também são conhecidas como perdas quase estáticas, por não dependerem da frequência, e devem ser medidas em frequências baixas, nas quais as perdas dinâmicas são praticamente nulas.

As perdas dinâmicas, também conhecidas como perdas por corrente de Foucault, são perdas por efeito “Joule” produzidas pelas correntes elétricas induzidas no núcleo ferromagnético. A corrente de Foucault circula na direção perpendicular ao fluxo magnético que a gerou, vide a Figura 2.2, justificando a utilização de lâminas de aço bem

finas (mas não a ponto de comprometer as propriedades mecânicas do material) na construção dos núcleos ferromagnéticos.

Figura 2.2 – Correntes de Foucault geradas pela variação do fluxo magnético em (a) um núcleo maciço (b) um núcleo laminado [3].



Como as chapas de aço possuem uma condutividade elétrica, permitindo a circulação de correntes parasitas, sendo a mesma limitada somente pela resistência elétrica do material, é acrescentado silício (material com alta resistividade) nas chapas de aço com o objetivo de aumentar a resistividade elétrica do material. Mas mesmo utilizando núcleos laminados e acrescentando materiais resistivos nas chapas de aço o fenômeno das correntes de Foucault (correntes parasitas) produzem perdas significativas, influenciando o projeto de uma máquina elétrica.

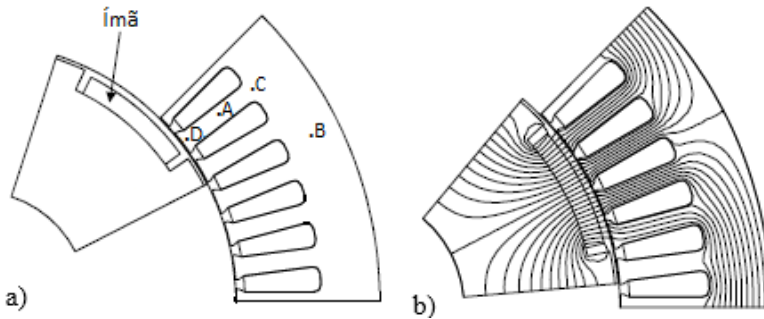
Ainda na parcela de perdas dinâmicas é encontrado um terceiro tipo de perda, conhecido como perda excedente ou anômala. Essa perda muitas vezes é confundida ou somada às perdas por correntes de Foucault, devido à dificuldade em mensurar somente a perda excedente. Conforme Bertotti [4], a existência desta perda excedente baseia-se no fato de que o cálculo clássico das perdas por correntes de Foucault não considera a divisão do material em domínios magnéticos elementares, que modificam a distribuição das correntes induzidas nas chapas de aço, aumentando as perdas magnéticas.

2.3 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ROTACIONAIS

Em algumas regiões das máquinas elétricas, nas juntas em “T” de transformadores, ou em pontos de junção dos dentes e coroa de uma máquina elétrica girante, a indução magnética apresenta não apenas um comportamento alternante, mas também um comportamento rotacional variando a amplitude e a direção.

Para a compreensão do comportamento da indução magnética em uma máquina elétrica girante serão analisados os resultados obtidos em um estudo feito em um motor síncrono com ímãs permanentes, realizado por [5]. A Figura 2.3 ilustra um polo do motor simulado, identificando os pontos analisados (Figura 2.3a) e a distribuição do fluxo magnético nas chapas (Figura 2.3b).

Figura 2.3 – Polo de um motor síncrono com ímãs permanentes. (a) Indicação dos pontos para análise do comportamento da indução magnética. (b) Distribuição do fluxo magnético. [5]



A seguir é analisado o comportamento das induções magnéticas tangencial (B_t) e radial (B_r) em função da posição do rotor (Figuras 2.4a - 2.7a). A avaliação do comportamento alternante ou rotacional da indução magnética é realizada através do lócus das induções magnéticas $B_t \times B_r$ (Figuras 2.4b - 2.7b).

Figura 2.4 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “A”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5].

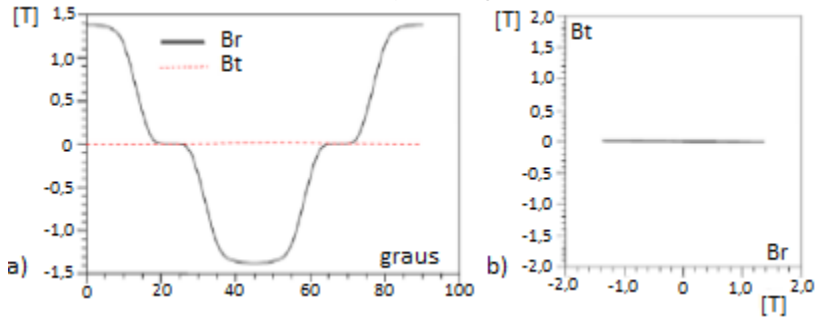


Figura 2.5 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “B”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5].

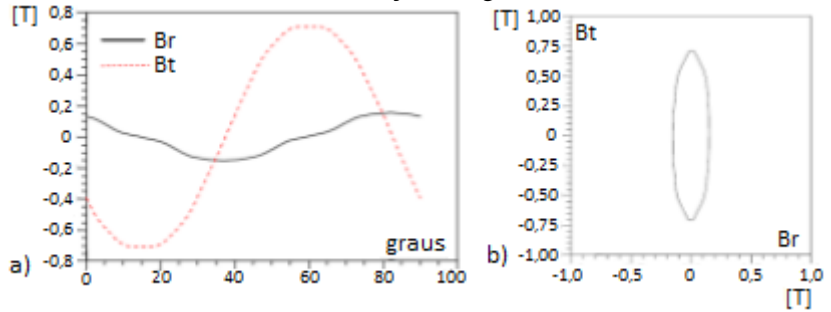


Figura 2.6 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “C”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço $B_t \times B_r$ das induções magnéticas [5].

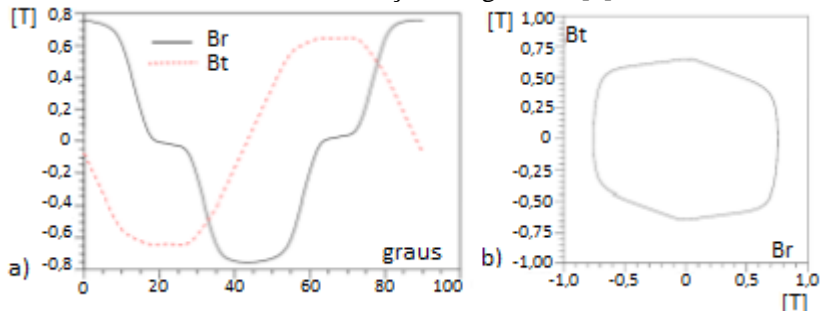
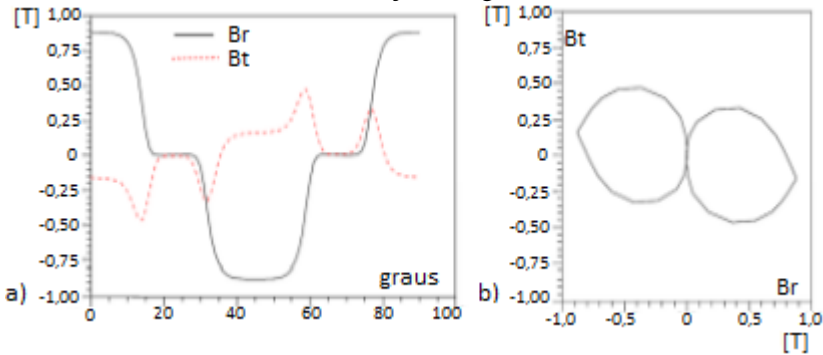


Figura 2.7 – Induções magnéticas radial e tangencial no ponto “D”. (a) Comportamento das induções em função da posição do rotor. (b) Laço B_t x B_r das induções magnéticas [5].



Na Figura 2.4a é analisada a indução magnética no ponto “A”, e verifica-se que neste ponto, há apenas a componente radial da indução magnética. Pode-se afirmar também, pela Figura 2.4b, que neste ponto a indução magnética é somente de natureza alternante.

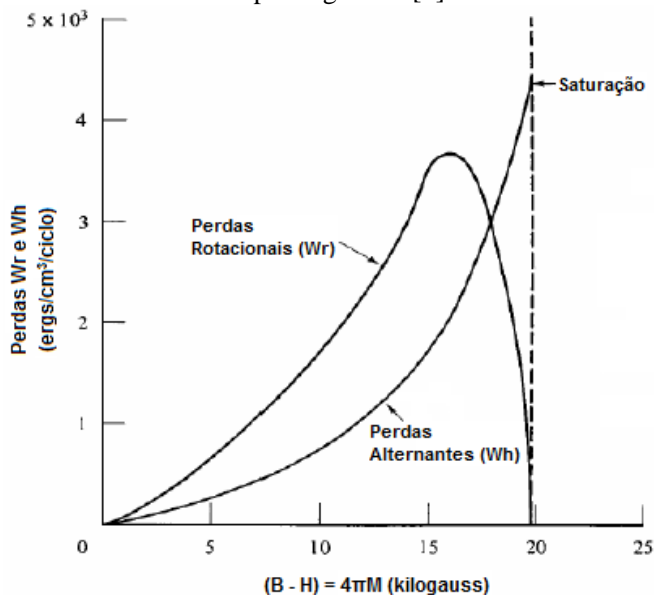
Os pontos “B”, “C” e “D” são analisados nas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 respectivamente. Verifica-se que nestes pontos há tanto componente radial quanto tangencial de indução magnética. Nestes pontos o comportamento da indução magnética é rotativo, ou seja, varia em amplitude e direção.

Em 1908, através de ensaios realizados em uma lâmina de níquel magnetizada por um meio quase estático, P. Weiss relatou que para um campo rotacional havia um aumento de perdas com o incremento da indução, seguido de um decréscimo das perdas até chegar a zero durante a saturação do material [6].

Em 1939, F. Brailsford realizou alguns ensaios de torque em um disco de ferro silício de grãos orientados, relacionando as perdas magnéticas por histerese com os valores de campo magnético, distinguindo o comportamento de perdas magnéticas devido a campos alternantes e a campos rotacionais, vide Figura 2.8 [7].

Para os campos alternantes, as perdas aumentam regularmente com o aumento do campo magnético até o ponto de saturação do material. Para os campos rotativos, as perdas magnéticas crescem até um valor máximo e em seguida decrescem, sendo nulas no ponto de saturação do material.

Figura 2.8 – Perdas por histerese alternante e rotacional em função do campo magnético [7].



O comportamento das perdas magnéticas por histerese rotacionais explica-se pelo fato de que, na saturação, quando sujeita a um campo rotacional, não há mais deslocamento das paredes de domínio na amostra do material durante o processo de magnetização. Já para as perdas magnéticas puramente alternantes, o material atinge a saturação para uma direção, desmagnetiza e satura novamente para outra direção em cada ciclo, aumentando cada vez mais as perdas com o aumento do nível de indução magnética [7].

2.4 HARMÔNICAS DE SATURAÇÃO

As harmônicas de saturação são geradas em função da elevada amplitude da indução magnética e de especificidades do circuito magnético, que, mesmo com uma alimentação senoidal, pode distorcer o fluxo local em algumas regiões [2]. As harmônicas são geradas principalmente nas quinas (cantos) e nas juntas em “T” de transformadores, ou nos dentes de uma máquina elétrica girante, devido à não homogeneidade do caminho magnético e à variação da anisotropia do material ferromagnético. As perdas magnéticas nestas regiões

normalmente são maiores do que a média das perdas no restante do circuito, que provavelmente podem ser amplificadas com a presença de um fluxo magnético já distorcido.

2.5 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS

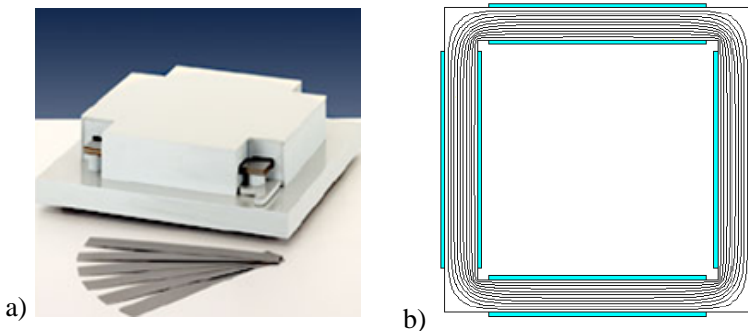
Atualmente há vários métodos relativamente bem desenvolvidos e geralmente aceitos pela comunidade científica para avaliar as perdas magnéticas em chapas de aço para fins elétricos. Dentre eles, os mais usuais são: quadro de Epstein, *Single Sheet* e o *Core Test*.

2.5.1 Quadro de Epstein

Provavelmente o método mais popular é o ensaio com o quadro de Epstein, vide Figura 2.9a, por ser um ensaio normatizado, simples, rápido e apresentar uma boa repetibilidade. Este método normalmente é utilizado para a caracterização de chapas de aço para fins elétricos de máquinas elétricas rotativas (GNO) e para núcleos de transformadores (GO).

Porém, este ensaio não condiz com a realidade do que ocorre com a chapa de aço quando utilizada em motores elétricos. As amostras são em forma de tiras retangulares e o fluxo magnético aplicado nas chapas é predominantemente de natureza alternante, vide Figura 2.9b. Assim este método não avalia as perdas magnéticas geradas pelo campo rotacional.

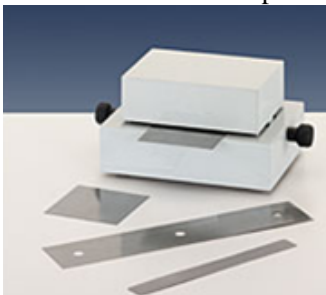
Figura 2.9 - Quadro de Epstein. a) Quadro de Epstein comercial da Brockhaus [8], b) Domínio de cálculo e distribuição do fluxo magnético nas amostras do quadro de Epstein [9].



2.5.2 *Single Sheet*

O ensaio *Single Sheet*, vide Figura 2.10, possui o mesmo conceito do ensaio com o quadro de Epstein, porém, com a vantagem de requerer somente uma chapa para a realização do ensaio, simplificando a preparação das amostras. A amostra deste ensaio é preparada em forma de um quadrado, para compensar a anisotropia magnética gerada na chapa devido ao sentido de laminação.

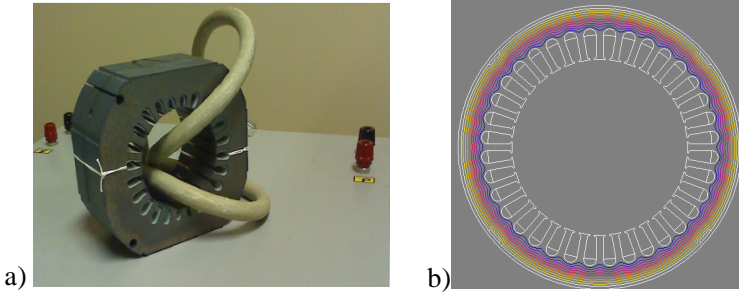
Figura 2.10 - Equipamento de teste com chapa única (*Single Sheet*) [8].



2.5.3 *Core Test*

O ensaio *Core Test* é utilizado para avaliar as chapas de aço em forma de núcleos toroidais. No caso de máquinas elétricas rotativas, o elemento avaliado é o estator, ou, mais precisamente, a coroa do estator. As amostras são envolvidas por dois enrolamentos, um primário e outro secundário, vide Figura 2.11a, sendo que o fluxo magnético que circula pela amostra possui somente sentido tangencial à coroa, vide Figura 2.11b. No caso de ensaios com estatores, o fluxo magnético não passa pelos dentes, sendo medidas apenas as perdas magnéticas geradas na coroa do estator. Neste método, há incertezas relacionadas com a quantidade precisa de material que contribui para a geração das perdas e com a determinação do caminho magnético médio em função dos valores de indução. Assim, os resultados obtidos através deste ensaio são geralmente utilizados somente para fins comparativos, permitindo uma avaliação qualitativa entre diferentes amostras.

Figura 2.11 - Ensaio *Core Test*, a) Estator como amostra no ensaio, [10]
b) Distribuição do fluxo magnético no estator.



Os ensaios citados acima são equipamentos comerciais e possuem a característica em comum de aplicar campo magnético de natureza alternante nas amostras, não abordando as perdas magnéticas geradas pelo campo magnético rotacional, como o encontrado em alguns pontos do motor elétrico, principalmente na região entre os dentes e a coroa do estator.

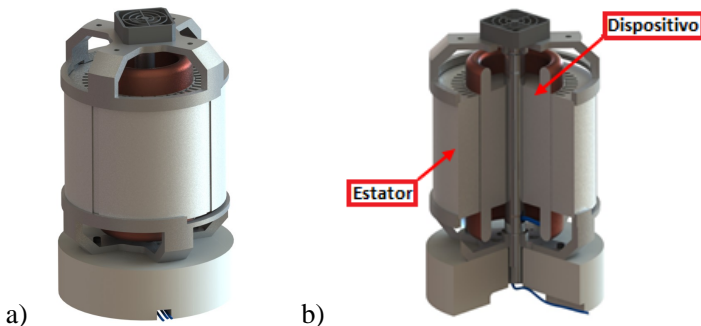
Diversos trabalhos já foram realizados com o objetivo de estudar o comportamento das perdas magnéticas em lâminas de aços elétricos, especificamente quando o material está sujeito a campos rotacionais. Em 2007, SILVA JÚNIOR [11] abordou o desenvolvimento e a implementação de uma bancada para ensaios de materiais ferromagnéticos baseado no teste rotacional de chapa única (RSST), sendo capaz de avaliar as perdas magnéticas em uma única lâmina de aço elétrico quando submetida a campos rotacionais.

CAPÍTULO 3

3 MÉTODO DE ENSAIO PROPOSTO

O método proposto tem o intuito de prover um sistema de ensaio inovador e mais fiel à realidade de uma máquina elétrica rotativa, abordando as perdas magnéticas geradas devido à geometria da chapa do estator sendo sujeita a um campo magnético girante. Foi desenvolvido um dispositivo eletromagnético trifásico (neste trabalho denominado simplesmente como dispositivo eletromagnético) capaz de gerar um fluxo magnético fiel ao encontrado em um motor elétrico de indução. Ao contrário do ensaio de *Core Test*, o método de ensaio proposto é capaz de avaliar as perdas magnéticas totais do estator, englobando aquelas geradas na coroa e nos dentes. O dispositivo eletromagnético foi projetado para ocupar o local do rotor, vide Figura 3.1, uma vez que a intenção é avaliar as perdas magnéticas geradas nas chapas do estator.

Figura 3.1 - Sistema de ensaio. a) Visualização da bancada de ensaio com estator na posição de ensaio, b) Visualização em corte da posição do dispositivo no interior do estator.



Similarmente aos ensaios citados anteriormente, o dispositivo desenvolvido possui dois enrolamentos, um primário e outro secundário, porém, neste caso os dois enrolamentos são trifásicos. O enrolamento primário é responsável por gerar o campo magnético girante no estator e por medir as perdas magnéticas geradas durante os ensaios. As perdas magnéticas são obtidas pelo método direto, subtraindo-se da potência total de entrada as perdas Joule ocasionadas no enrolamento primário, conforme as Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$Pt_{ens} = P_{abs} - Pj_1 \quad (3.1)$$

$$P_{abs} = Ia_p \cdot Vac_p \cdot \cos(\varphi) + Ib_p \cdot Vbc_p \cdot \cos(\varphi) \quad (3.2)$$

$$Pj_1 = R_{j1} \cdot Ia_p^2 \quad (3.3)$$

onde,

P_{abs} : Potência total de entrada (Método dos 2 Wattímetros), [W];

Pt_{ens} : Perdas magnéticas totais, [W];

Pj_1 : Perda joule do enrolamento primário, [W];

Ia_p : Corrente da Fase A do enrolamento primário, [A];

Ib_p : Corrente da Fase B do enrolamento primário, [A];

Vac_p : Tensão entre as Fases A e C do enrolamento primário, [V];

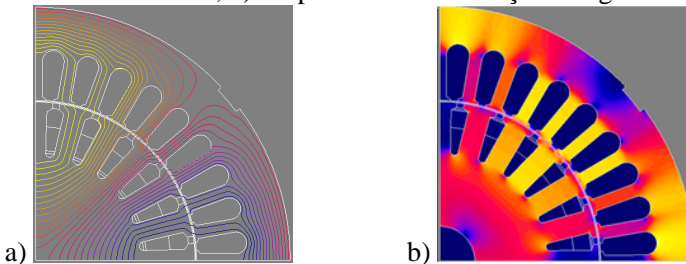
Vbc_p : Tensão entre as Fases B e C do enrolamento primário, [V];

φ : Defasagem entre a tensão e a corrente do enrolamento primário, [°];

R_{j1} : Resistência do enrolamento primário, [Ω].

O enrolamento trifásico secundário é o sensor de enlace de fluxo magnético, utilizado para o cálculo das induções magnéticas na chapa de aço do estator. Nas Figuras 3.2a e 3.2b são visualizadas a distribuição das linhas de fluxo e o mapeamento das induções magnéticas em $\frac{1}{4}$ de máquina, respectivamente. Percebe-se que as linhas de fluxo magnético passam por toda a amostra (dentes e coroa) e a indução magnética não é homogênea em todo núcleo ferromagnético.

Figura 3.2 - Simulação de $\frac{1}{4}$ do dispositivo de ensaio. a) Distribuição das linhas de fluxo, b) Mapeamento das induções magnéticas.



O ensaio consiste na geração e medição das perdas magnéticas no sistema de ensaio como um todo. Durante o ensaio, as perdas magnéticas medidas são a soma das perdas magnéticas do dispositivo e do estator. Como o objetivo é avaliar somente as perdas magnéticas do estator, é necessário subtrair as perdas magnéticas do dispositivo eletromagnético das perdas magnéticas totais medidas. As perdas magnéticas do estator são obtidas através da Equação 3.4.

$$P_{Est} = P_{t_{ens}} - P_{dis} \quad (3.4)$$

onde,

P_{Est} : Perdas magnéticas do estator, [W];

P_{dis} : Perdas magnéticas do dispositivo, [W].

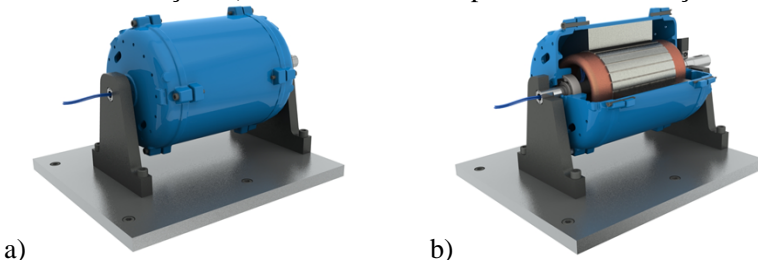
Para a obtenção das perdas magnéticas do núcleo do dispositivo eletromagnético trifásico foram desenvolvidos dois métodos de calibração.

3.1 CALIBRAÇÃO – MÉTODO 1

O método 1 de calibração do dispositivo eletromagnético baseia-se no princípio de que quando não há variação do fluxo magnético não ocorre a geração de perdas magnéticas.

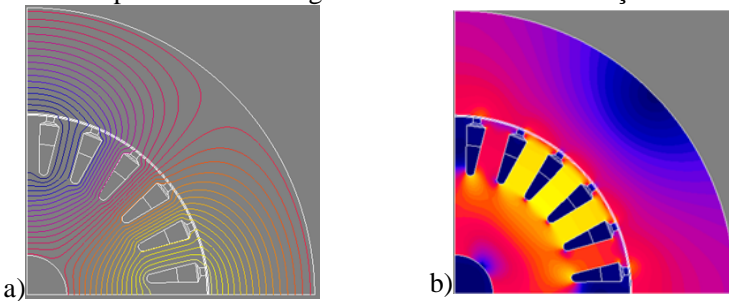
Para a realização do ensaio de calibração por esse método foi projetada uma bancada experimental, vide Figura 3.3, capaz de girar um anel laminado em torno do dispositivo eletromagnético, em sincronismo com o campo magnético gerado pelo dispositivo eletromagnético.

Figura 3.3 - Sistema de Calibração. a) Vista externa do dispositivo de calibração, b) Vista interna do dispositivo de calibração.



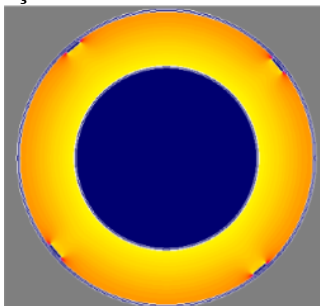
O dispositivo eletromagnético fica fixo no ensaio de calibração através de dois mancais, que permitem que o anel laminado gire em torno do dispositivo com auxílio de dois rolamentos. O anel laminado de chapas de aço para fins elétricos fica inserido em uma carcaça. A velocidade síncrona do anel de calibração é imposta por um motor síncrono acoplado diretamente ao eixo que se encontra fixo na carcaça. O enrolamento primário, quando energizado, gera um campo magnético girante no núcleo ferromagnético do dispositivo e no anel laminado, vide Figura 3.4. Como o anel laminado está girando em sincronismo com o campo magnético, as perdas magnéticas geradas no anel são nulas. As perdas magnéticas medidas pelo enrolamento primário são somente as geradas pelo núcleo ferromagnético do dispositivo eletromagnético.

Figura 3.4 - Simulação do ensaio de calibração do dispositivo. a) Distribuição do fluxo magnético no dispositivo eletromagnético e no anel de calibração, b) Mapeamento das induções magnéticas no dispositivo eletromagnético e no anel de calibração.



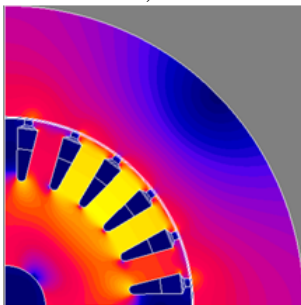
3.2 CALIBRAÇÃO – MÉTODO 2

O segundo método de calibração foi realizado para confrontar os resultados experimentais obtidos com os adquiridos no primeiro método de calibração. O método 2 de calibração é baseado no ensaio *Core Test*, sendo este realizado no mesmo anel laminado utilizado para calibrar o dispositivo no primeiro método de calibração, vide Figura 3.5.

Figura 3.5 – Simulação do ensaio *Core Test* com o anel laminado.

Após a obtenção da curva de perdas magnéticas por indução magnética do anel laminado é realizado o ensaio com anel junto ao dispositivo eletromagnético, porém desta vez tanto o anel laminado quanto o dispositivo eletromagnético estão estáticos.

Figura 3.6 – Simulação do ensaio de calibração do dispositivo junto com o anel laminado, ambos estáticos.



Neste segundo ensaio é instalada uma bobina exploratória em torno do anel laminado, permitindo relacionar as perdas magnéticas, obtidas através do enrolamento primário do dispositivo eletromagnético, com cada ponto de indução magnética do dispositivo (obtida através do enrolamento secundário) e com a indução magnética no anel laminado. Conhecendo-se a indução magnética no anel laminado para cada ponto de indução no dispositivo eletromagnético, é possível, através da curva obtida com o ensaio *Core Test*, subtrair as perdas magnéticas do anel laminado das perdas magnéticas totais obtidas no dispositivo eletromagnético junto com o anel laminado, resultando somente as perdas magnéticas do dispositivo eletromagnético.

3.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As perdas magnéticas obtidas nos ensaios são relacionadas à tensão eficaz de fase do secundário e à indução magnética máxima de um polo do dispositivo eletromagnético. A indução magnética máxima é calculada através da Equação 3.5.

$$B_{pk} = \frac{V_s}{4,44 \cdot N_e \cdot f \cdot K_b \cdot S} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (3.5)$$

onde,

B_{pk} : Indução magnética máxima, [T];

V_s : Tensão eficaz de fase do enrolamento secundário, [V];

N_e : Número de espiras por fase;

f : Frequência da fonte de alimentação, [Hz];

K_b : Fator de enrolamento (0,933), [adimensional];

S : Seção magnética dos dentes de um polo do dispositivo, [m²].

A Equação 3.5 é válida somente enquanto a tensão do secundário for puramente senoidal. A deformação da forma de onda da tensão do secundário é considerada através do fator de forma, o qual pode ser calculado pela Equação 3.6. Conforme [12], o valor do fator de forma não pode variar mais do que 1% de 1,11 (relação da tensão eficaz pela tensão retificada média, para uma onda puramente senoidal).

$$FF = \frac{V_s}{V_{s_med}} \quad (3.6)$$

onde,

FF : Fator de forma, [adimensional];

V_{s_med} : Tensão retificada média de fase do enrolamento secundário, [V].

CAPÍTULO 4

4 DETALHAMENTO DO PROJETO

O desenvolvimento do dispositivo eletromagnético trifásico foi segmentado em diversas etapas, buscando organizar de forma clara e objetiva as metas a serem alcançadas no decorrer do trabalho. Em resumo, o estudo foi dividido da seguinte forma: projeto elétrico e mecânico do dispositivo eletromagnético, desenvolvimento do sistema de calibração, método para validação dos resultados obtidos com o dispositivo eletromagnético e análise dos resultados experimentais propriamente ditos obtidos pelo método de ensaio proposto.

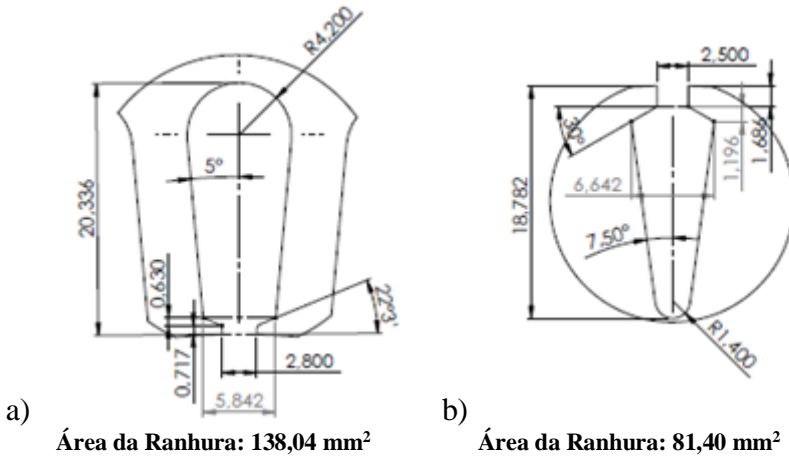
4.1 DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO

O dispositivo eletromagnético foi projetado com base nas dimensões do estator e do rotor de um motor elétrico industrial trifásico da carcaça IEC/ABNT 112, 4 polos e 7,5 cv. Dessa forma, o dispositivo de teste representa bem as máquinas tipicamente usadas em aplicações industriais, além de possuir dimensões e peso adequados para a realização dos ensaios.

O dispositivo eletromagnético foi projetado para ficar posicionado no local do rotor (no caso de um motor elétrico), pois o objetivo é avaliar as perdas magnéticas das chapas de aço do estator (pacote de chapas). As dimensões que foram mantidas do motor da carcaça IEC/ABNT 112, 4 polos e 7,5 cv, são os diâmetros interno e externo do estator e o diâmetro externo do rotor. Isso facilita o processo de fabricação das amostras que serão testadas (chapas estatóricas), pois pode-se usar as ferramentas de corte das chapas já existentes para isso. Para que se possam relacionar os valores de perdas magnéticas com os valores de indução magnética máxima, foi necessário projetar a coroa do estator e os dentes, tanto do dispositivo eletromagnético como os do estator, de forma que os valores máximos de indução fossem iguais nas 3 regiões.

Na Figura 4.1 são visualizadas as dimensões das ranhuras projetadas para o estator e para o dispositivo eletromagnético. Os desenhos com as dimensões das chapas de aço do dispositivo eletromagnético e do estator são encontrados nos anexos A e B, respectivamente.

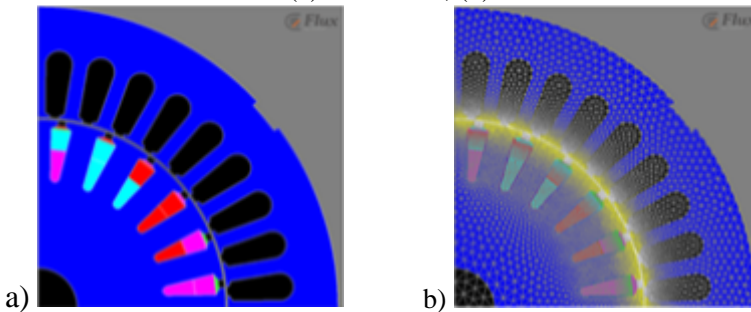
Figura 4.1 - Cotas das ranhuras projetadas. a) Estator, b) Dispositivo.



As chapas de aço do dispositivo eletromagnético e do estator foram projetadas usando-se métodos de elementos finitos (MEF) por meio do programa Flux2D, possibilitando a análise das induções magnéticas nas chapas de aço e o fluxo magnético no entreferro.

O estator possui 36 ranhuras e o dispositivo eletromagnético possui 24 ranhuras. Na Figura 4.2 é visualizada a geometria desenvolvida e a malha gerada para a realização das simulações em elementos finitos.

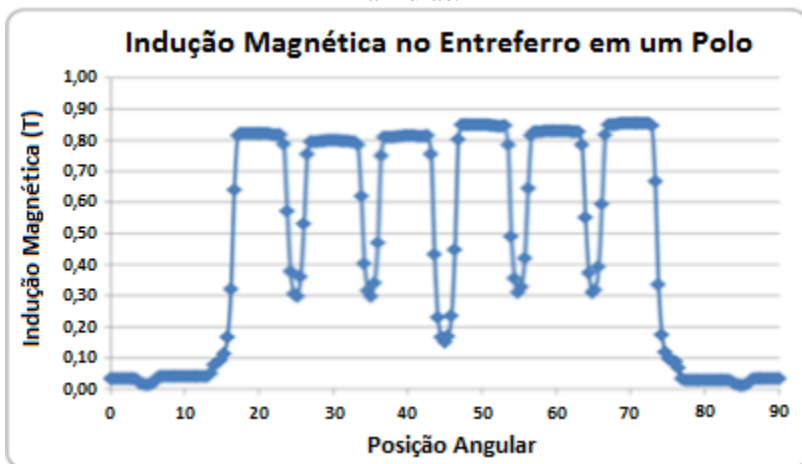
Figura 4.2 – Simulação em MEF do dispositivo eletromagnético com estator. (a) Geometria, (b) Malha.



A escolha do número de ranhuras do dispositivo eletromagnético foi realizada através da comparação do fluxo magnético gerado no entreferro do dispositivo com 12, 24 e 36 ranhuras. O dispositivo com

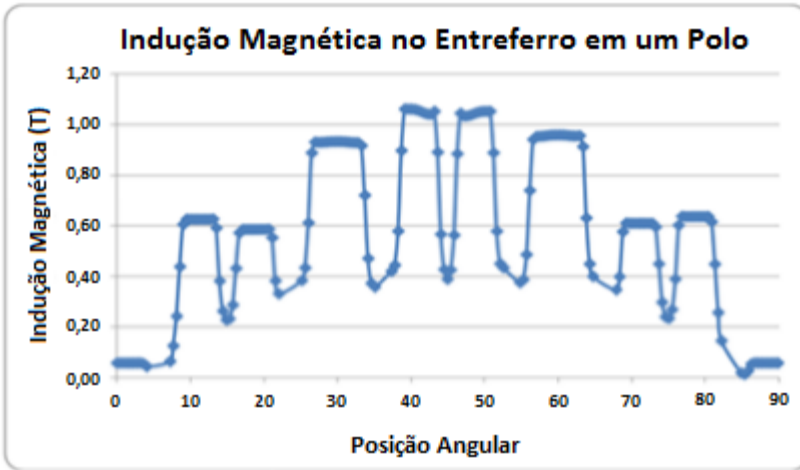
12 ranhuras não se tornou viável, pois a distribuição do fluxo magnético no entreferro não apresentou um comportamento senoidal, vide Figura 4.3.

Figura 4.3 - Fluxo magnético no entreferro do dispositivo com 12 ranhuras.



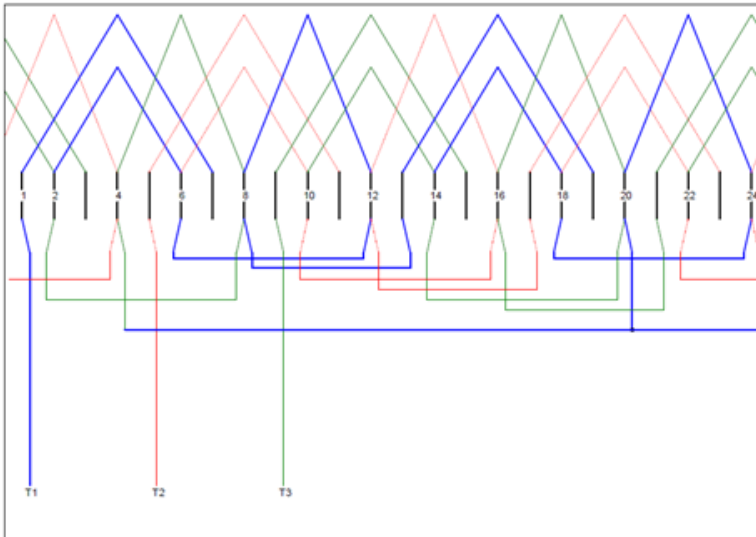
No caso de um dispositivo com 36 ranhuras o fluxo magnético seria mais senoidal em relação aos demais, pois o enrolamento seria melhor distribuído. Porém a área da ranhura do dispositivo com 36 ranhuras ficaria muito pequena, não permitindo a inserção das bobinas dos enrolamentos. Optou-se então pela configuração com 24 ranhuras, pois o fluxo magnético gerado no entreferro é mais senoidal, vide Figura 4.4, em relação ao apresentado com o dispositivo de 12 ranhuras. Além disso, a área da ranhura é maior comparado com a do dispositivo de 36 ranhuras, permitindo a inserção das bobinas dos enrolamentos.

Figura 4.4 - Fluxo magnético no entreferro do dispositivo com 24 ranhuras.



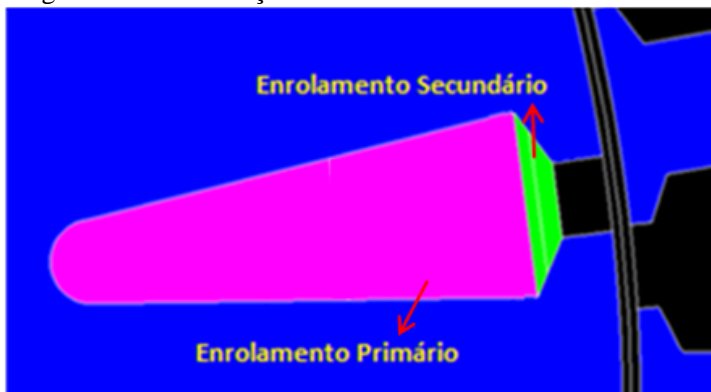
Os enrolamentos utilizados tanto no primário como no secundário possuem passo 1:5:7 – 1:5 em camada mista, ligação estrela - Y, vide Figura 4.5.

Figura 4.5 – Diagrama de bobinagem do dispositivo eletromagnético.



O enrolamento secundário é bobinado no topo da ranhura, vide Figura 4.6, de forma a enlaçar somente o fluxo magnético que passa para a amostra do ensaio e evitar o enlace do fluxo de dispersão da ranhura.

Figura 4.6 - Localização dos enrolamentos dentro da ranhura.



A intensidade do campo magnético gerado pelo dispositivo é controlada através da alimentação do enrolamento primário, por intermédio de um variador de tensão trifásico ligado a um gerador de tensão senoidal.

O dispositivo eletromagnético foi projetado para uma tensão eficaz de linha máxima de 380 V / 60 Hz e uma corrente eficaz de linha máxima de 10 A, podendo gerar induções no pacote de chapas de até aproximadamente 1,8 T. Na Tabela 4.1 é descrito alguns dados do estator, utilizado como amostra nos ensaios com o dispositivo eletromagnético trifásico.

Tabela 4.1 - Dados do Estator (amostra do ensaio).

Comprimento do estator	140 mm
Diâmetro interno do estator	115 mm
Diâmetro externo do estator	182 mm
Número de dentes do estator	36

Na Tabela 4.2 é descrito alguns dados do dispositivo eletromagnético trifásico.

Tabela 4.2 - Dados do Dispositivo Eletromagnético Trifásico.

Tensão de Linha Máxima	380 V
Corrente de Linha Máxima	10 A
Número de fases	3
Número de Polos	4
Comprimento do pacote de chapas	140 mm
Tamanho do Entreferro	0,6 mm
Número de dentes do dispositivo	24
Número de espiras por fase do primário	120
Número de espiras por fase do secundário	40
Resistência de linha do primário	2,007 Ω
Resistência de linha do secundário	6,565 Ω
Fio do primário	4 x 0,560 mm *
Fio do secundário	1 x 0,355 mm*
Isolante fundo de ranhura	0,18 mm *
Isolante fechamento de ranhura	0,33 mm *
Isolante entre Primário e Secundário	0,33 mm *
Isolante entre fases	0,33 mm *

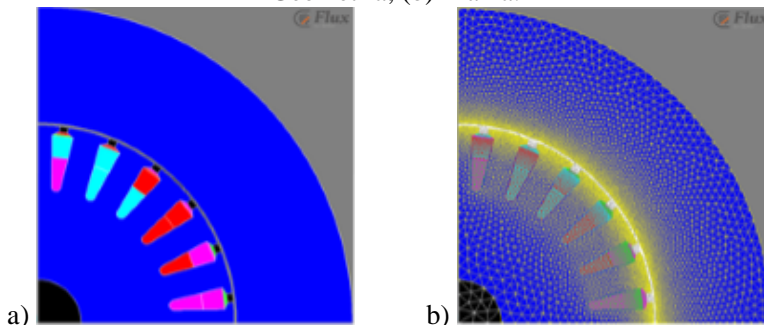
*Material de Classe Térmica F

4.2 SISTEMA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 1

A calibração do dispositivo eletromagnético consiste em medir as perdas magnéticas geradas somente no núcleo ferromagnético do dispositivo. Foi construída uma bancada experimental que permite um anel laminado girar em torno do dispositivo eletromagnético, em sincronismo com o campo magnético girante, gerado pelo enrolamento primário do dispositivo eletromagnético. As dimensões do anel laminado, tais como o comprimento do pacote de chapas, os diâmetros interno e externo do anel (desenho no Anexo C) são as mesmas do estator (amostra).

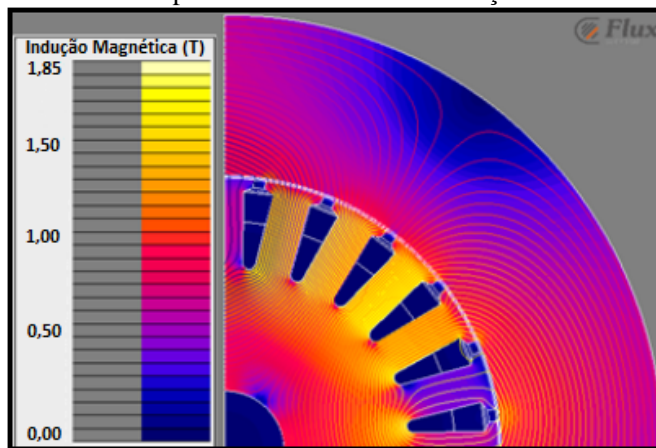
Na Figura 4.7 é visualizada a geometria desenvolvida e a malha gerada para a realização da simulação em elementos finitos (Flux2D) do sistema de calibração do dispositivo eletromagnético.

Figura 4.7 - Simulação do ensaio de calibração em elementos finitos. (a) Geometria, (b) Malha.



Simulando o sistema de calibração em elementos finitos foi possível verificar o comportamento do fluxo magnético no anel laminado quando o mesmo está em sincronismo com o campo magnético girante. Na Figura 4.8 é possível visualizar as linhas do fluxo magnético através do anel laminado se concentrando mais próximo do entreferro, gerando nesta região induções magnéticas mais altas do que nas regiões mais próximas ao diâmetro externo do anel.

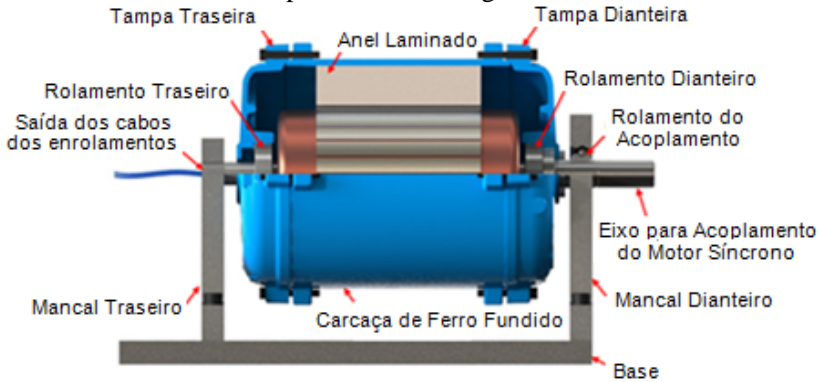
Figura 4.8 –Induções magnéticas e as linhas de fluxo magnético no dispositivo e no anel de calibração.



Durante a calibração do dispositivo eletromagnético, o anel laminado gira em sincronismo com o campo magnético por intermédio de um motor síncrono acoplado ao anel. Para uma frequência de

alimentação igual a 60 Hz, por exemplo, a velocidade mecânica do anel laminado será igual a 1800 rpm. Como a velocidade mecânica é muito alta, há necessidade de uma estrutura rígida e balanceada, evitando vibrações e possíveis danos ou acidentes. Para minimizar a vibração do sistema de calibração foi projetada uma carcaça de ferro fundido simétrica (onde o anel laminado é prensado) sem saída para caixa de ligação e sem aletas, vide Figura 4.9.

Figura 4.9 – Sistema projetado para permitir o giro do anel em torno do dispositivo eletromagnético.



Para garantir a concentricidade entre o dispositivo eletromagnético em relação ao anel laminado foram projetadas duas tampas especiais permitindo o encaixe e fixação na carcaça. Nas duas tampas há furos com rosca, previstos para a adição de massa de balanceamento, e rasgos permitindo a medição do entreferro. Na tampa dianteira do dispositivo eletromagnético é fixado um eixo para o acoplamento do motor síncrono, responsável por girar a carcaça.

Para fixar o dispositivo eletromagnético na base da bancada foram projetados dois suportes (mancais). O suporte traseiro é responsável por fixar o dispositivo, por intermédio do seu eixo. O mancal dianteiro possui um rolamento, utilizado para o encaixe do eixo da tampa dianteira, permitindo o giro da carcaça.

4.3 SISTEMA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 2

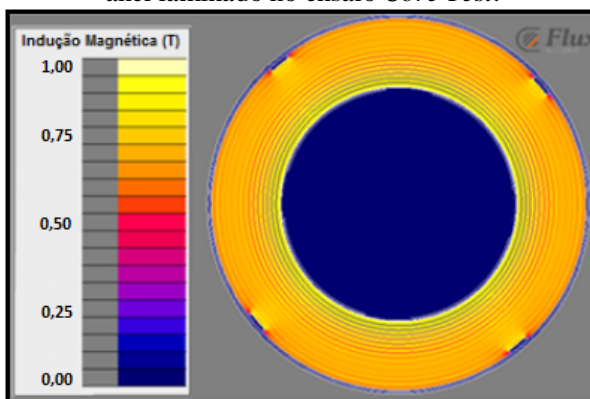
O segundo método de calibração do dispositivo eletromagnético consiste em subtrair as perdas magnéticas do anel laminado (obtidas através do ensaio *Core Test*) das perdas magnéticas totais obtidas no

ensaio junto com o dispositivo eletromagnético, ambos estando estáticos.

Este método de calibração não é tão preciso como o primeiro método de calibração, pois a distribuição do fluxo magnético no ensaio *Core Test* é diferente do encontrado no ensaio quando realizado junto com o dispositivo eletromagnético. Porém, o mesmo foi realizado para confrontar com os valores obtidos no primeiro método de calibração, indicando se não houve nenhum equívoco na realização da calibração do dispositivo eletromagnético através do primeiro método.

Utilizando métodos de elementos finitos (MEF - Flux2D) foi simulado o ensaio *Core Test* com o anel laminado, possibilitando avaliar o comportamento do fluxo magnético e as induções magnéticas geradas no anel, vide Figura 4.10.

Figura 4.10 - Induções magnéticas e as linhas de fluxo magnético no anel laminado no ensaio *Core Test*.



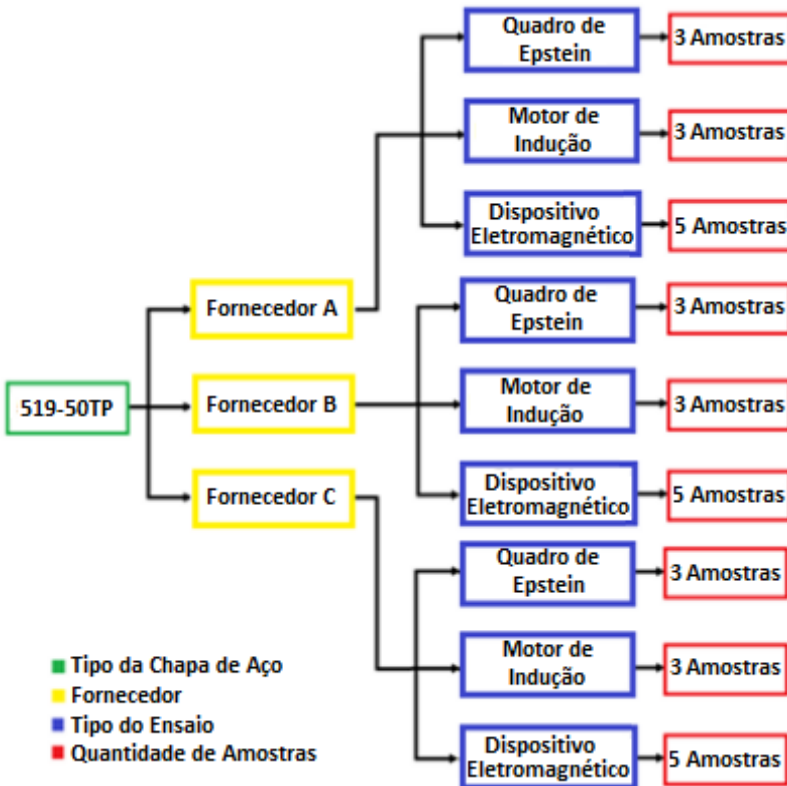
A distribuição do fluxo magnético no anel laminado, visualizada através da Figura 4.10, possui uma direção tangencial ao anel, confirmando a existência da indução magnética pulsante. No ensaio com o dispositivo eletromagnético, o fluxo tem direção tanto tangencial como radial ao anel laminado.

Para relacionar a indução magnética induzida no anel laminado durante o ensaio com o dispositivo eletromagnético, com a indução medida no ensaio *Core Test* foi instalada uma bobina exploratória em torno do anel. Com isto, é possível relacionar as perdas magnéticas totais medidas através do dispositivo eletromagnético com a indução magnética do dispositivo e do anel laminado.

4.4 MÉTODO PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para validar os resultados obtidos com o dispositivo eletromagnético foram comparadas qualitativamente as perdas magnéticas obtidas em diferentes tipos de ensaios para um mesmo tipo de chapa de aço de diferentes fornecedores. No diagrama da Figura 4.11 são apresentados os tipos de ensaios e quantidades de amostras para cada fornecedor.

Figura 4.11 - Diagrama das amostras fabricadas para validação dos resultados.



Inicialmente os fornecedores foram avaliados e classificados dentro de um mesmo grupo de ensaio, em relação aos valores das perdas magnéticas. Em seguida foi analisado se os 3 diferentes ensaios apresentaram a mesma classificação.

CAPÍTULO 5

5 FABRICAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

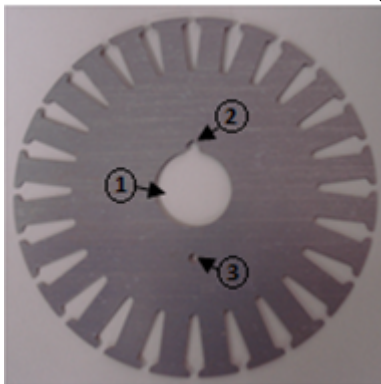
A fabricação da bancada experimental resume-se na construção do dispositivo eletromagnético, na confecção das bancadas de calibração do dispositivo eletromagnético, no desenvolvimento do programa de aquisição e processamento de dados e na fabricação das amostras para os ensaios.

5.1 DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO

O dispositivo eletromagnético foi construído com a chapa de aço siliciosa 433-50TP. Esta é uma chapa de melhor qualidade em relação às chapas de aço utilizadas para a fabricação das amostras, diminuindo a influência das perdas magnéticas do dispositivo eletromagnético em relação às perdas magnéticas totais. O processo de estampagem das chapas de aço do dispositivo eletromagnético foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa foi estampado (com a ferramenta de corte padrão da carcaça IEC/ABNT 112), o furo do eixo com a chaveta, o furo de balanceamento e o diâmetro externo do dispositivo.

Para as ranhuras do dispositivo eletromagnético, um punção foi especialmente construído com a geometria especificada para que as ranhuras pudessem ser estampadas em uma ranhuradeira. No final de todo o processo foram estampadas 280 chapas de 0,5mm de espessura, conforme a chapa visualizada na Figura 5.1.

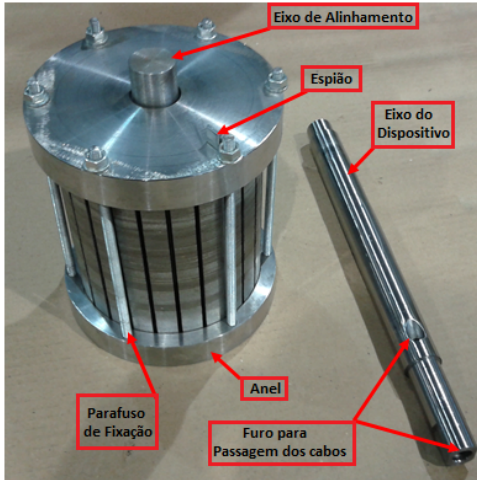
Figura 5.1 – Chapa de aço estampada para o dispositivo eletromagnético.



1. Furo do Eixo;
2. Furo da Chaveta;
3. Furo de balanceamento.

Para a fixação das chapas de aço e para a realização do ensaio de calibração, foi projetado e construído (desenho na Figura B.1 - Anexo B) um eixo a ser inserido no pacote de chapas do dispositivo eletromagnético, vide Figura 5.2. O pacote de chapas foi alinhado através de dois anéis, um espião e um eixo de alinhamento, possibilitando a inserção do eixo no pacote de chapas.

Figura 5.2 – Eixo e pacote de chapas para a fabricação do dispositivo.

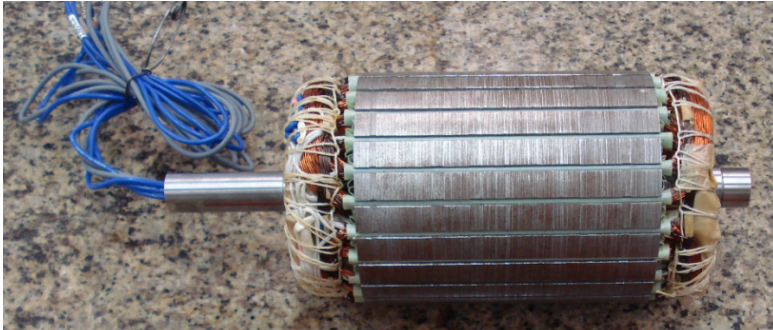


Para a construção do sistema de calibração do método 1, foi necessário passar os cabos dos enrolamentos por dentro do eixo do dispositivo eletromagnético, pois os rolamentos impedem a passagem dos cabos para fora da carcaça do dispositivo de calibração.

Como as chapas de aço de grão não orientado não são totalmente isotrópicas (resultado do processo de laminação) e como não foi possível eliminar os furos da chaveta e do balanceamento, as chapas foram rotacionadas em um ângulo de 15° (um passo de ranhura) em relação à anterior. Desta maneira, a anisotropia das chapas de aço fica distribuída em todas as direções do núcleo ferromagnético, conforme realizado no trabalho [13].

Com o eixo inserido no pacote de chapas do dispositivo foi realizada a bobinagem dos enrolamentos primário e secundário, vide Figura 5.3

Figura 5.3 – Dispositivo eletromagnético trifásico bobinado.



O enrolamento primário foi bobinado primeiro em relação ao enrolamento secundário, localizando o enrolamento secundário no topo da ranhura do dispositivo (próximo do entreferro) e evitando que o mesmo enlace o fluxo de dispersão da ranhura, conforme explicado no Capítulo 4.1. Para validar o método de cálculo da indução magnética, calculada através da Equação 3.5, foi inserida uma bobina exploratória em um dos dentes do dispositivo eletromagnético, permitindo a comparação da indução magnética máxima medida no dente do dispositivo com a indução medida em um polo magnético.

O dispositivo eletromagnético foi impregnado com resina para aumentar a rigidez da cabeça de bobina, proteger as chapas de aço contra o efeito de oxidação e para aumentar a rigidez dielétrica do sistema de isolamento do dispositivo eletromagnético.

Após o ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético, o mesmo foi fixado em uma base de nylon para dar sustentação ao sistema de ensaio, vide Figura 5.4. Duas tampas de aço foram especialmente projetadas e construídas para garantir o entreferro entre o dispositivo eletromagnético e o pacote de chapas (estatores).

Figura 5.4 – Dispositivo eletromagnético trifásico fixado na base de ensaio.

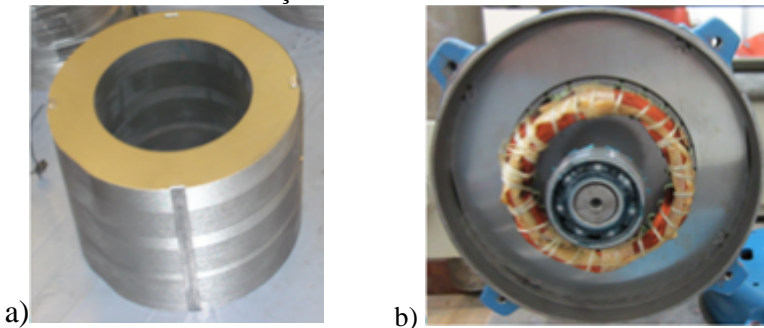


Na tampa superior foi fixado um ventilador para auxiliar na dissipação térmica das bobinas do enrolamento primário.

5.2 BANCADA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 1

A bancada para a calibração do dispositivo eletromagnético trifásico foi projetada e construída de forma a resultar em um sistema de simples balanceamento, seguro e que garantisse a qualidade do ensaio referente ao valor do entreferro e à velocidade do anel laminado. O anel laminado, vide Figura 5.5a, foi construído com o mesmo tipo de chapa do dispositivo eletromagnético.

Figura 5.5 – Bancada de calibração. a) Anel laminado, b) Dispositivo dentro da carcaça com o anel laminado inserido.



O anel laminado é grampeado e inserido em uma carcaça especialmente fundida para este trabalho, pois a mesma não possui saída para a caixa de ligação e não possui aletas, resultando em uma carcaça simétrica e leve. Na Figura 5.5b é possível visualizar o dispositivo dentro da carcaça já com o anel inserido. Na ponta do eixo do dispositivo, oposta à saída dos cabos, há um rolamento para a montagem com a tampa dianteira.

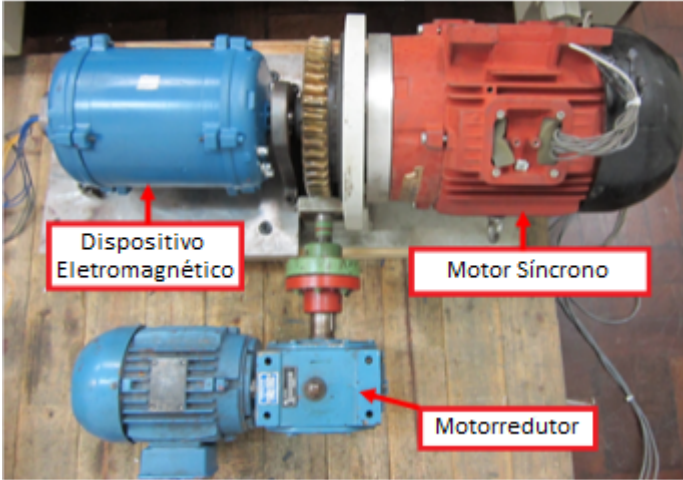
As tampas dianteira e traseira são geometricamente idênticas, sendo que a única diferença é que na tampa dianteira é fixado um eixo para o acoplamento do motor síncrono (vide Figura 5.6).

Figura 5.6 – Tampas dianteira e traseira para a bancada de ensaio.



Com as tampas encaixadas na carcaça o dispositivo eletromagnético é fixado e apoiado com o auxílio de dois mancais, na bancada de calibração, vide Figura 5.7. A bancada permite a eliminação da influência do conjugado de histerese, operando o motor síncrono, quando desejado, fora da condição da rotação síncrona, em aproximadamente 1 rpm. Isto é possível provocando um pequeno deslocamento relativo entre o estator e o rotor do motor síncrono, através do auxílio de um motorreductor acoplado a uma engrenagem fixada à carcaça do motor síncrono.

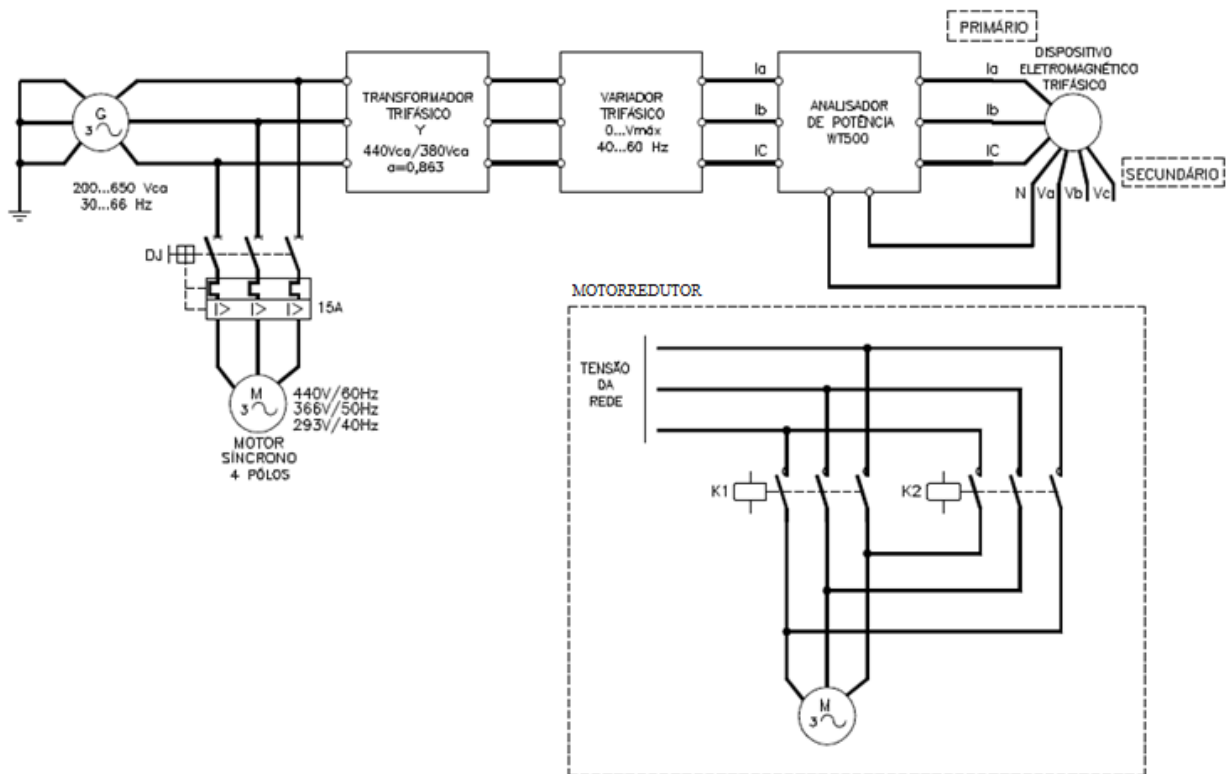
Figura 5.7 – Bancada desenvolvida para calibração do dispositivo eletromagnético.



Antes de iniciar os ensaios de calibração do dispositivo eletromagnético foi necessário balancear mecanicamente a bancada de calibração, evitando vibração mecânica excessiva e danos ao dispositivo eletromagnético com a possível quebra de uma das partes da bancada. Com o balanceamento, foi possível reduzir 48% da amplitude da vibração mecânica da bancada de ensaio. Foram adicionados 36,7 gramas de material na tampa dianteira e 12,6 gramas de material na tampa traseira.

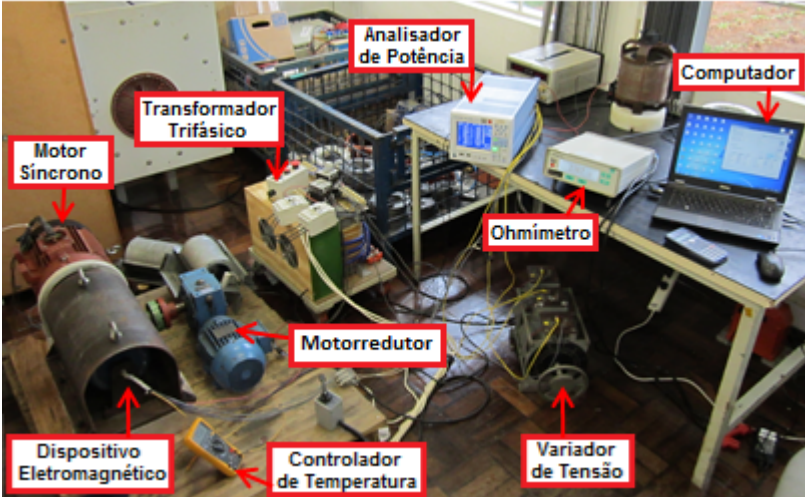
Para a realização dos ensaios de calibração do dispositivo eletromagnético foi projetado um esquema elétrico, vide Figura 5.8, que possibilitou a alimentação elétrica do motor síncrono e do dispositivo eletromagnético com uma mesma fonte de alimentação (gerador trifásico). Garantindo assim a mesma frequência de alimentação tanto no dispositivo eletromagnético como no motor síncrono.

Figura 5.8 – Esquema Elétrico da bancada de calibração do dispositivo – Método 1



Na Figura 5.9 são visualizados os equipamentos e dispositivos utilizados para a realização da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 1.

Figura 5.9 – Bancada de calibração do dispositivo eletromagnético – Método 1.



A aquisição das grandezas elétricas, como tensão elétrica (RMS, média e pico) dos enrolamentos primário e secundário, corrente elétrica (RMS e pico) do enrolamento primário, potência elétrica ativa e frequência, foi realizada diretamente através de um analisador de potência YOKOGAWA® WT500. Não houve a necessidade de sensores de corrente entre o dispositivo eletromagnético e o analisador de potência, aumentando a precisão da medição. Durante os ensaios, o analisador de potência é conectado a um computador que através de um programa desenvolvido especialmente para este trabalho, adquire os dados em tempo real. Um ohmímetro é utilizado durante os ensaios para medir as resistências de linha do dispositivo, utilizadas posteriormente para calcular as perdas Joule do enrolamento primário do dispositivo eletromagnético.

Como a alimentação do motor síncrono é igual a 440V/60Hz e a do dispositivo eletromagnético é igual a 380V/60Hz foi necessária a utilização de um transformador trifásico para ligá-los em uma mesma fonte de alimentação. Para regular a tensão de alimentação do dispositivo eletromagnético de 0V até a tensão máxima desejada

(limitada em 380V/60Hz – Tensão de linha), foi utilizado um variador de tensão de lamelas, permitindo obter a curva de perdas magnéticas para diferentes pontos de indução magnética. O controle da temperatura do enrolamento primário do dispositivo eletromagnético foi feito através de um sensor termopar, tipo K, ligado a um medidor de temperatura do multímetro FLUKE® 179 True RMS.

5.3 BANCADA DE CALIBRAÇÃO – MÉTODO 2

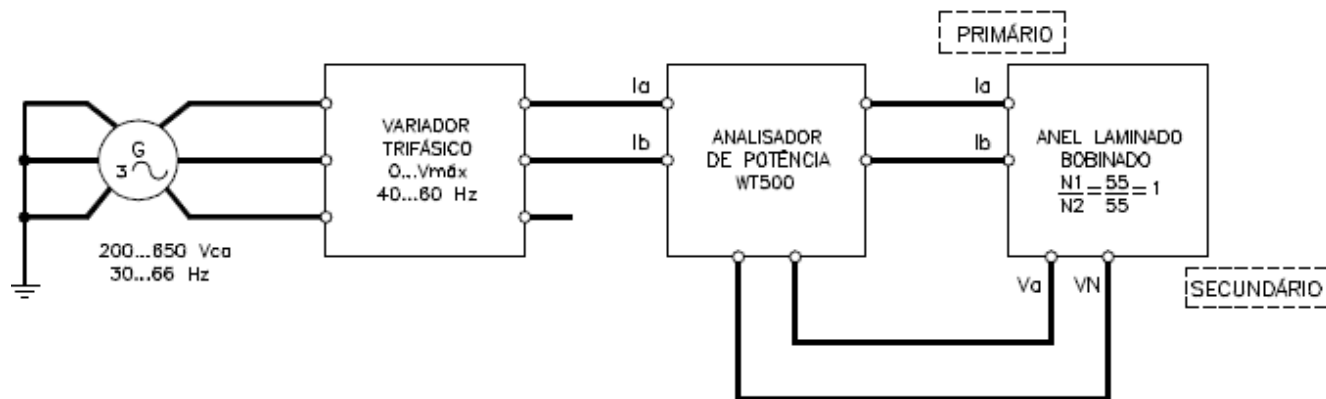
Para a realização da calibração do dispositivo eletromagnético, através do método 2, foram bobinados em torno do anel laminado, dois enrolamentos monofásicos (um primário e outro secundário) com o mesmo número de espiras (55 espiras), vide Figura 5.10. O anel laminado é o mesmo utilizado na calibração através do método 1.

Figura 5.10 – Anel laminado bobinado, utilizado no ensaio de Core Test.



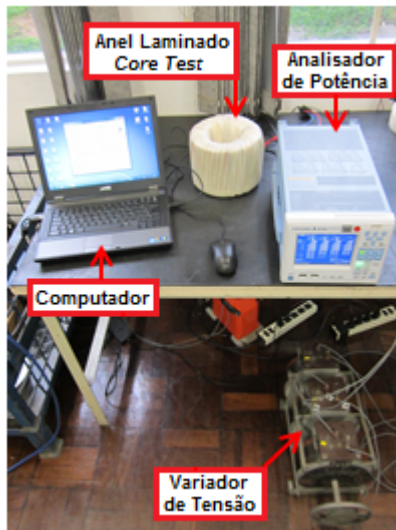
Com o anel laminado bobinado foi realizado o ensaio de *Core Test*, levantando-se a curva de perdas magnéticas por indução magnética.

Para a realização dos ensaios de *Core Test* foi projetado um esquema elétrico, vide Figura 5.11, utilizando duas fases do gerador trifásico de tensão como fonte de alimentação.

Figura 5.11 - Esquema Elétrico da bancada de ensaio *Core Test* – Método 2

Na Figura 5.12 são visualizados os equipamentos e dispositivos utilizados para a realização do ensaio de *Core Test* no anel laminado.

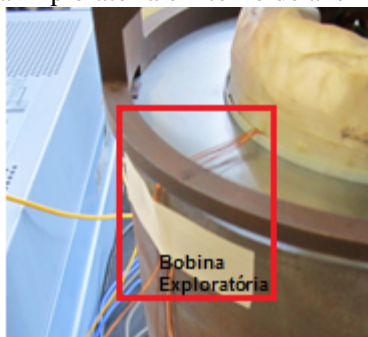
Figura 5.12 - Bancada de ensaio Core Test – Método 2.



Assim como no ensaio de calibração do método 1, a aquisição das grandezas elétricas no ensaio de *Core Test* foi realizada através do analisador de potência YOKOGAWA® WT500, conectado ao computador responsável por adquirir e salvar em tempo real os dados desejáveis. O gerador de tensão trifásico foi ligado diretamente ao variador de tensão, que, por sua vez, regulava a tensão de alimentação do enrolamento primário bobinado sobre o anel laminado.

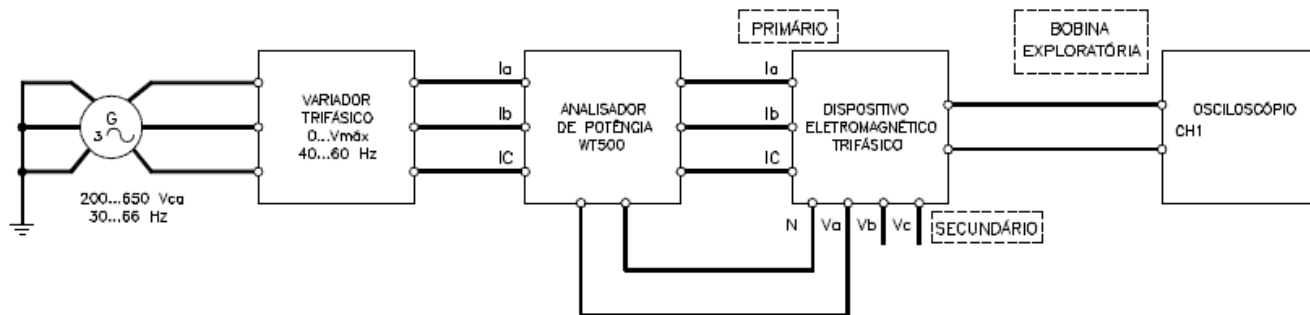
Após a realização do ensaio *Core Test*, o anel laminado foi desbobinado e colocado junto ao dispositivo eletromagnético, mostrado na Figura 5.4, sendo posicionado no local do estator (amostra). Para relacionar as perdas magnéticas medidas através do dispositivo eletromagnético com as induções magnéticas geradas no anel, foi utilizada uma bobina exploratória no entorno do anel laminado, conforme Figura 5.13.

Figura 5.13 – Bobina Exploratória em torno do anel laminado – Método 2



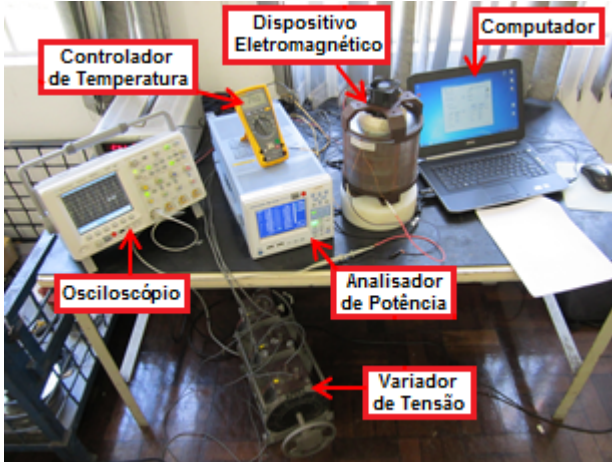
Para realização dos ensaios com o dispositivo eletromagnético junto com o anel laminado, foi projetado um esquema elétrico, vide Figura 5.14.

Figura 5.14 - Esquema Elétrico da bancada de calibração do dispositivo – Método 2



Na Figura 5.15 são visualizados os equipamentos e os dispositivos utilizados para a realização dos ensaios de calibração do dispositivo eletromagnético com o anel laminado.

Figura 5.15 - Bancada de calibração do dispositivo eletromagnético – Método 2.

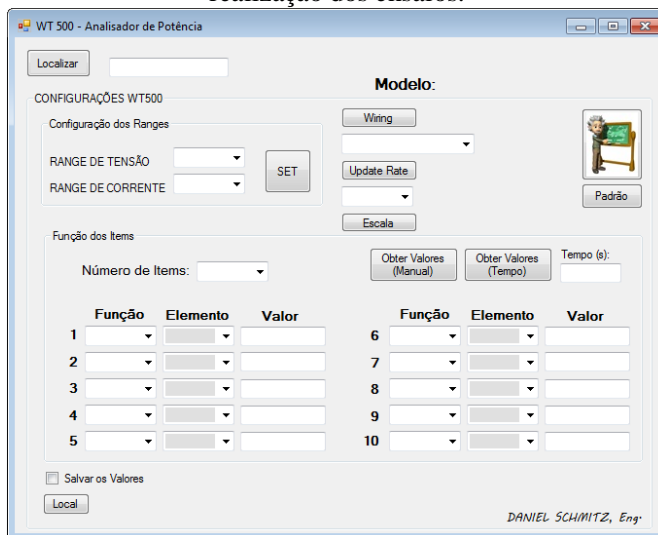


Assim como nos ensaios realizados anteriormente, as grandezas foram adquiridas através do analisador de potência YOKOGAWA® WT500, conectado ao computador. A grandeza de tensão elétrica induzida na bobina exploratória foi medida através do osciloscópio Agilent Technologies® DSO5014A. O gerador de tensão trifásico foi ligado diretamente ao variador de tensão que por sua vez regula a tensão de alimentação do enrolamento primário do dispositivo eletromagnético. A temperatura do enrolamento primário foi controlada durante todo o ensaio.

5.4 PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Para aquisição das grandezas elétricas (tensão, corrente e potência), através do analisador de potência YOKOGAWA® WT500 (modelo do analisador de potência utilizado neste projeto), foi desenvolvido um programa, em Visual Basic 2010®, com as funções para configurar o analisador e adquirir os valores desejados, vide Figura 5.16.

Figura 5.16 – Programa desenvolvido para aquisição dos dados na realização dos ensaios.

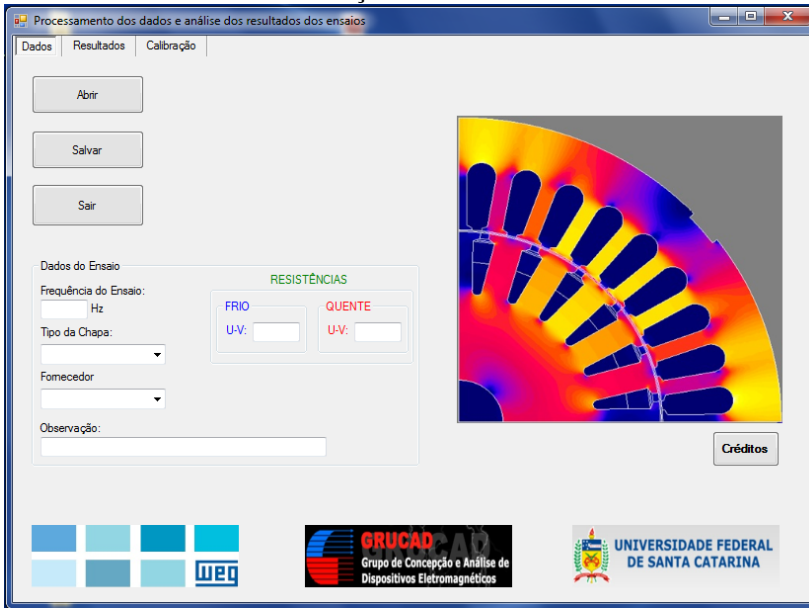


No programa de aquisição de dados é possível configurar os limites (*Range*) dos canais do analisador de potência, o tempo de atualização dos dados (*Update Rate*), as funções e os elementos (Canais) de cada item selecionado, permitindo a obtenção dos dados manualmente ou de modo automático e salvando os valores adquiridos em um intervalo de tempo pré-definido pelo usuário.

Foi desenvolvido um programa, em Visual Basic 2010®, para o processamento dos dados e visualização dos resultados, vide Figura 5.17, tendo 3 telas principais:

- ✓ Dados;
- ✓ Resultados;
- ✓ Calibração.

Figura 5.17 – Programa desenvolvido para o processamento dos dados e visualização dos resultados.



Na tela de “Dados” são preenchidas informações do ensaio, como:

- ✓ Resistência a frio e a quente do enrolamento primário do dispositivo eletromagnético;
- ✓ Frequência do ensaio;
- ✓ Tipo da chapa de aço;
- ✓ Fornecedor;
- ✓ Observações.

Ainda na tela de “Dados” existem 3 botões: Abrir, Salvar e Sair. No botão “Abrir” é selecionado o arquivo com os valores obtidos de tensão, corrente e potência elétrica. O botão “Salvar” é utilizado após o processamento dos dados, a fim de salvar os resultados obtidos com o processamento dos dados do ensaio. O botão “Sair” encerra o programa.

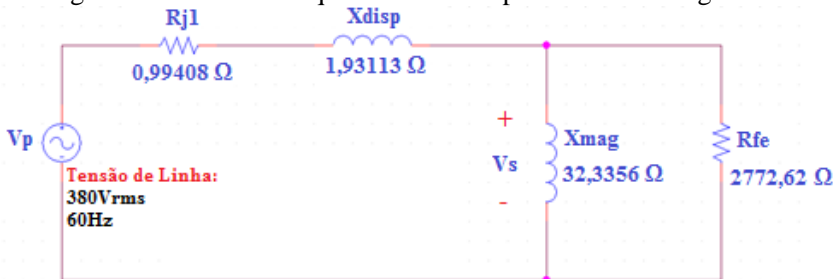
Na tela de “Calibração” são visualizados os resultados das perdas magnéticas do dispositivo eletromagnético (resultados obtidos pelo ensaio de calibração através do método 1). Os resultados podem ser visualizados tanto na forma de gráficos ou em tabelas. Na tela de “Resultados” são visualizados os resultados obtidos com o processamento dos dados. Os

resultados são visualizados em forma de tabelas ou gráficos que mostram as perdas magnéticas em função da indução magnética máxima de um polo do dispositivo ou da tensão eficaz de fase do enrolamento secundário.

5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO

No início deste trabalho, o objetivo era calcular as perdas magnéticas através do produto da corrente do primário com a tensão do secundário, resultando diretamente nas perdas magnéticas. Porém, no decorrer do trabalho foi verificado que, devido ao entreferro, a corrente magnetizante é muito alta, aumentando a influência da resistência do enrolamento e da reatância de dispersão em relação à impedância do secundário, vide Figura 5.18, defasando a tensão do secundário em relação à tensão do primário em 1,67 graus elétricos (conforme valores de cálculo).

Figura 5.18 - Circuito equivalente do dispositivo eletromagnético.



V_p : Tensão eficaz de fase do enrolamento primário, [V];

V_s : Tensão eficaz de fase do enrolamento secundário, [V];

R_{j1} : Resistência do enrolamento primário, [Ω];

R_{fe} : Resistência no ferro, [Ω];

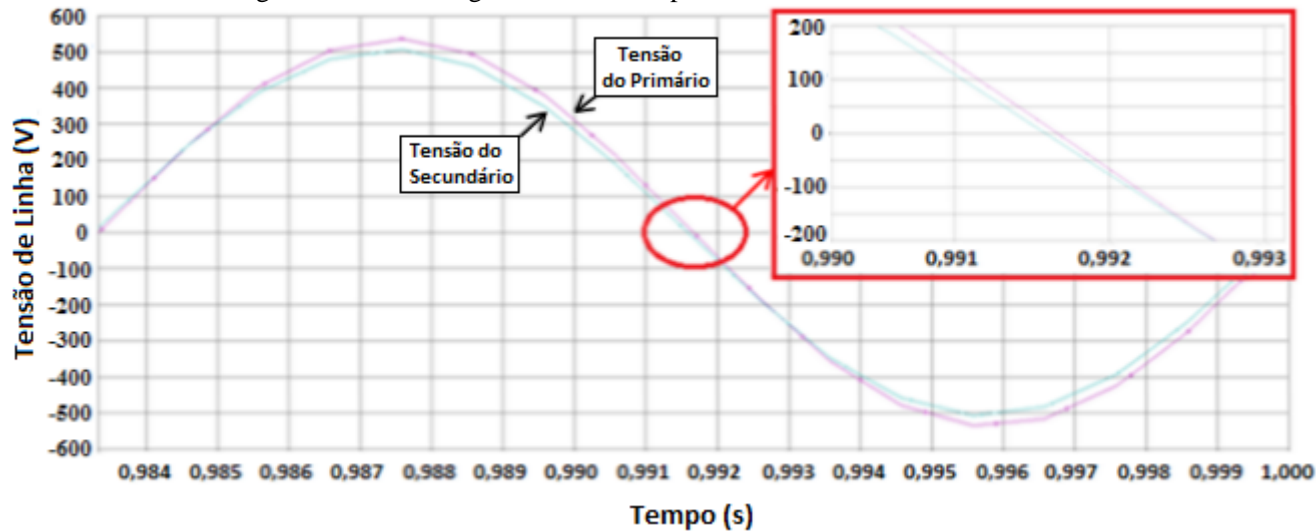
X_{disp} : Reatância de dispersão, [Ω];

X_{mag} : Reatância de magnetização, [Ω];

Em ensaios para a determinação das perdas magnéticas em chapas de aço para fins elétricos, o cosseno ϕ normalmente é muito baixo (o ângulo entre a tensão e a corrente do primário é próximo de 90° - carga predominantemente reativa). A defasagem entre a tensão do primário e a tensão do secundário encontrada no dispositivo eletromagnético, vide Figura 5.19, gera um erro nos resultados das perdas magnéticas de aproximadamente 225%, quando calculada através da tensão do secundário.

A solução encontrada para contornar o problema da defasagem entre as tensões foi calcular as perdas magnéticas somente com grandezas do enrolamento primário, sendo necessário subtrair as perdas Joule do enrolamento primário das perdas totais medidas, conforme a Equação 3.1. A indução magnética máxima continua sendo obtida através da tensão elétrica induzida no enrolamento secundário, medindo assim somente o fluxo magnético que contribui para a geração das perdas magnéticas nas chapas de aço das amostras.

Figura 5.19 – Defasagem da tensão do primário com a tensão do secundário.



Os resultados das perdas magnéticas tanto do dispositivo eletromagnético como os das amostras do ensaio são relacionados com a tensão eficaz de fase do secundário e a indução magnética máxima do dispositivo eletromagnético, calculada através da Equação 3.5.

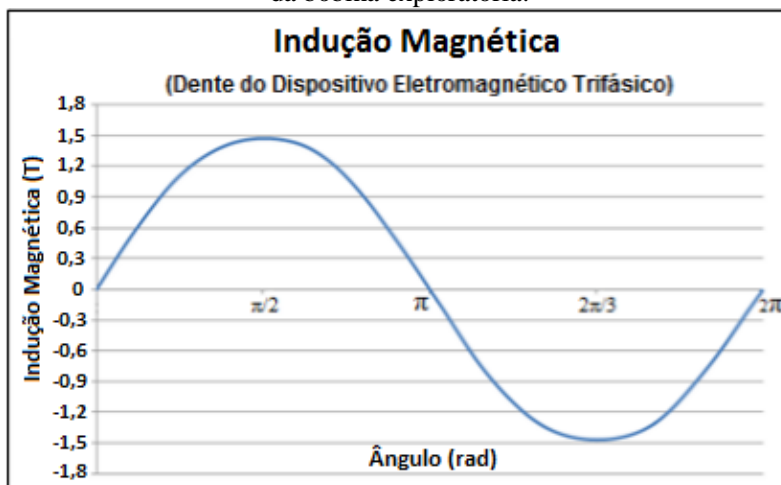
Para validar o método de cálculo da indução magnética máxima, obtida através da tensão eficaz de fase do enrolamento secundário, foi construída uma bobina exploratória em um dos dentes do dispositivo eletromagnético, medindo a indução magnética máxima do dente. A Tabela 5.1 apresenta as induções magnéticas máximas medidas no dispositivo eletromagnético tanto pelo enrolamento secundário como pela bobina exploratória. Nota-se uma diferença máxima de 2,45%, validando o método de medição da indução magnética.

Tabela 5.1 – Validação da medição da indução magnética no dispositivo eletromagnético.

Frequência (Hz)	Indução Magnética (T)		Diferença (%)
	Secundário do Dispositivo	Bobina Exploratória	
60	0,500	0,490	-2,13%
	0,804	0,784	-2,45%
	0,997	0,978	-1,87%
	1,506	1,527	1,43%
	1,703	1,719	0,91%
50	0,998	1,016	1,80%
40	1,000	1,003	0,26%

Na Figura 5.20, é visualizada a indução magnética no dente do dispositivo medida através da bobina exploratória, para uma indução máxima igual a 1,5T/60Hz.

Figura 5.20 – Indução magnética no dente do dispositivo medida através da bobina exploratória.



O analisador de potência YOKOGAWA® WT500 possui apenas 3 canais de leitura, impossibilitando a medição das 6 grandezas elétricas do enrolamento primário (tensão e corrente das 3 fases) e a tensão elétrica do enrolamento secundário.

Para tornar possível a realização dos ensaios com o analisador de potência YOKOGAWA® WT500 (já que seria inviável para este projeto a utilização de dois analisadores de potência ou de um analisador de 6 canais) foi utilizado o método dos dois wattímetros. Através deste método é necessário somente a leitura de duas grandezas de tensão elétrica e duas grandezas de corrente elétrica do enrolamento primário (utilizando assim somente 2 canais para a medição das perdas de entrada do dispositivo), possibilitando a leitura da tensão elétrica do enrolamento secundário através do terceiro canal.

O método dos dois wattímetros é um método de medição conhecido e validado, porém houve a preocupação em analisar o quanto este método de medição poderia afetar na medição da potência de entrada do dispositivo. A análise foi realizada comparando-o com o ensaio onde foram utilizados dois analisadores de potência, sendo um para medir a potência de entrada e o segundo para medir a tensão do enrolamento secundário. Na Tabela 5.2 é possível visualizar os resultados obtidos com os dois métodos de medição, sendo que a diferença percentual não ultrapassou 2%, ficando em média 0,83%.

Tabela 5.2 – Validação do método de medição dos dois wattímetros.

Tensão*	Perdas Magnéticas (W)		Diferença (%)
	3 Wattímetros	2 Wattímetros	
220	59,24	59,27	0,04%
210	52,82	53,14	0,62%
200	47,15	47,65	1,07%
190	42,13	42,70	1,37%
180	37,66	38,24	1,52%
170	33,67	34,19	1,53%
160	30,07	30,50	1,41%
150	26,80	27,11	1,17%
140	23,80	24,00	0,85%
130	21,01	21,11	0,47%
120	18,41	18,43	0,08%
110	15,96	15,92	-0,29%
100	13,64	13,56	-0,58%
80	9,37	9,31	-0,64%
60	5,61	5,66	0,84%

*Tensão eficaz de fase do enrolamento secundário

5.6 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

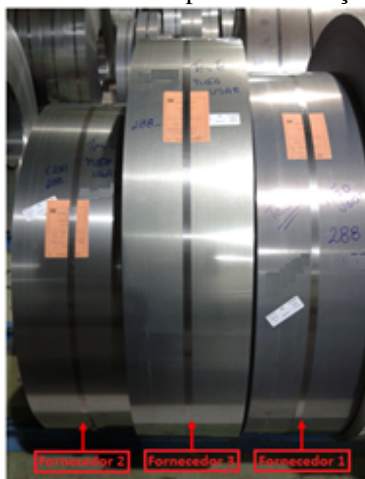
As chapas de aço para fins elétricos são fornecidas para as empresas em forma de bobinas, com uma largura pré-definida pelas aciarias, vide Figura 5.21.

Figura 5.21 - Bobina embalada fornecida para empresa, [14].



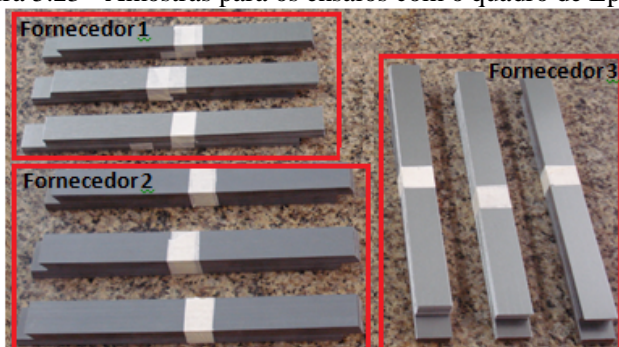
Para tornar possível a passagem das chapas de aço através das prensas rápidas (máquinas utilizadas para estampar as chapas de aço) é necessário recortar a bobina principal em tiras com uma largura ideal para cada tipo de ferramenta (estampo), vide Figura 5.22. Como as propriedades magnéticas e físicas (espessura) das chapas de aço podem variar em relação à posição da tira na bobina principal, devido ao processo de laminação das chapas, foi tomado o cuidado de fabricar todas as amostras de um mesmo fornecedor a partir de uma única tira.

Figura 5.22 – Tiras recortadas para a fabricação das amostras.



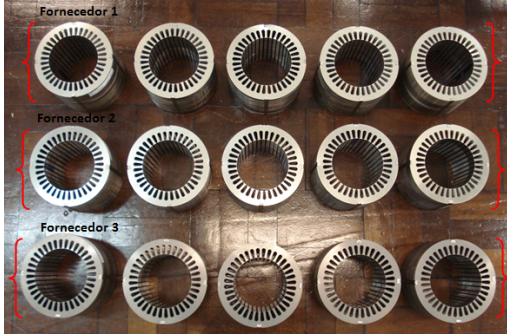
Foram fabricadas 3 amostras para os ensaios com o quadro de Epstein para cada fornecedor, com as dimensões de 280 x 30 x 0,5 mm.

Figura 5.23 - Amostras para os ensaios com o quadro de Epstein.



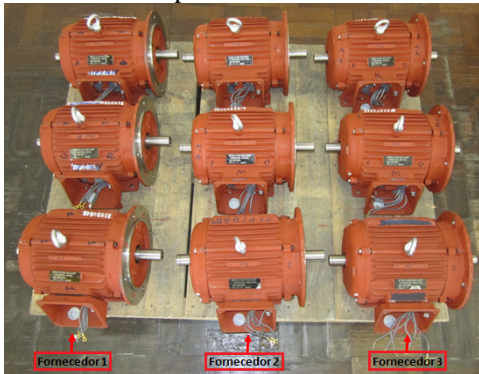
Para o ensaio com o dispositivo eletromagnético, foram fabricadas 5 amostras (estatores) com as chapas de aço de cada fornecedor, vide a Figura 5.24.

Figura 5.24 - Amostras para os ensaios com o dispositivo eletromagnético.



Foram fabricados 3 motores de indução da carcaça IEC/ABNT 112, 4 polos, 7,5 cv com chapas de aço de cada fornecedor, sendo que o processo de fabricação dos motores para os testes foi o mesmo adotado para os motores padrão de fábrica, utilizando as mesmas máquinas e ferramentas.

Figura 5.25 - Amostras para os ensaios com o dinamômetro.



As amostras fabricadas para a validação do ensaio com o dispositivo eletromagnético não sofreram tratamento térmico, pois as chapas de aço utilizadas na fabricação das mesmas são totalmente processadas.

CAPÍTULO 6

6 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os experimentos realizados têm como objetivo validar o novo método de ensaio proposto neste trabalho. No departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica da WEG Motores foram realizados os ensaios com as amostras de quadro de Epstein, na bancada de ensaios MPG 200D (*Brockhaus Measurements*), os ensaios de calibração do dispositivo eletromagnético e os ensaios com os estatores (amostras do dispositivo). Os motores de indução padrão da carcaça IEC/ABNT 112, 4 polos, 7,5 cv foram ensaiados no laboratório elétrico I da WEG Motores.

6.1 DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO

No ensaio com o quadro de Epstein foram analisados os valores de perdas magnéticas para 6 pontos de indução magnética máxima, sendo estes: 0,5T/0,8T/1,0T/1,2T/1,5T/1,8T. Os ensaios com os motores elétricos foram analisados na tensão nominal do motor 380V/60Hz, sendo realizado o ensaio em vazio (sem carga), seguindo a metodologia de ensaio da norma IEEE 112 Método B [15]. Cada motor foi ensaiado 3 vezes em dias diferentes, diminuindo assim a possibilidade de um erro operacional, totalizando 9 ensaios para cada fornecedor.

Para os ensaios de calibração do dispositivo eletromagnético, foram analisadas as curvas das perdas magnéticas em relação à indução magnética máxima (de 0,5T a 2,0T) e em relação à tensão eficaz de fase do secundário. Os ensaios de calibração pelos dois métodos foram realizados 3 vezes.

Os ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético foram analisados nos valores de perdas magnéticas em relação a 6 pontos de indução magnética máxima (0,5T/0,8T/1,0T/1,2T/1,5T/1,7T) e também em relação à tensão eficaz de fase do secundário.

Os ensaios foram realizados nas frequências de alimentação de 60Hz, 50Hz e 40Hz. Os resultados apresentados são os valores médios dos ensaios para cada fornecedor, apresentando os limites máximos e mínimos, para uma distribuição *t* de *Student*, considerando um intervalo de confiança de 95%, uma distribuição da população para 3σ (97,5%), com o mesmo desvio padrão das amostras.

6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O QUADRO DE EPSTEIN

Os resultados obtidos nos ensaios com o quadro de Epstein nas frequências de 60Hz, 50Hz e 40Hz são apresentados nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 (valores estão nas Tabelas C.1, C.2 e C.3 - Apêndice C), respectivamente.

Observa-se o acréscimo das perdas magnéticas para os 3 fornecedores em relação ao aumento da indução magnética induzida nas amostras. Avaliando os valores médios e os limites máximos e mínimos obtidos para cada ponto de indução magnética, o fornecedor “A”, comparando com os demais fornecedores, apresenta os melhores resultados (menor valor) em relação às perdas magnéticas. Os limites mínimos apresentados pelo fornecedor “A” são menores em comparação com os limites apresentados pelos fornecedores “B” e “C”.

O fornecedor “B” apresenta valores maiores de perdas magnéticas em relação aos fornecedores “A” e “C”. Os valores dos limites mínimos obtidos com o fornecedor “B”, principalmente nas induções mais altas, são maiores do que os limites máximos dos demais fornecedores, indicando que este fornecedor apresenta um material de pior qualidade entre as amostras avaliadas.

Figura 6.1 – Resultados dos ensaios com o quadro de Epstein em 60Hz.

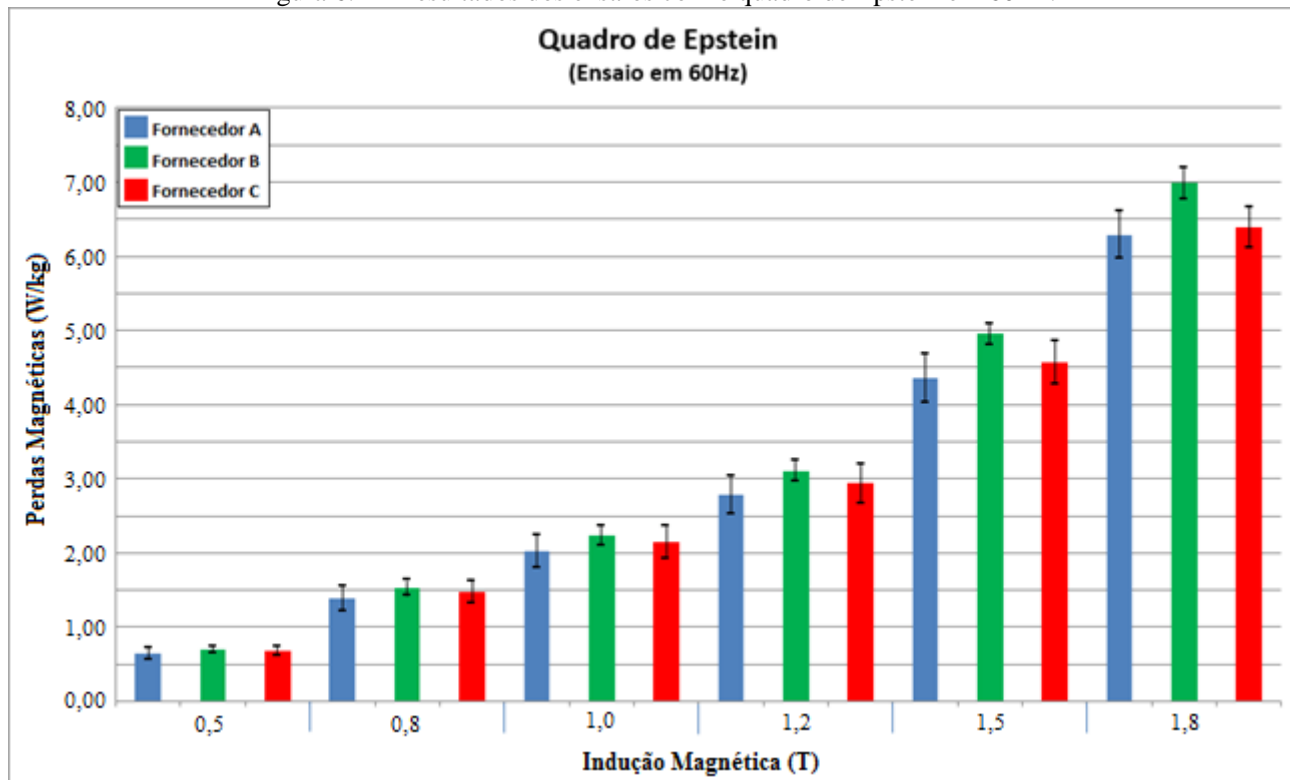


Figura 6.2– Resultados dos ensaios com o quadro de Epstein em 50Hz.

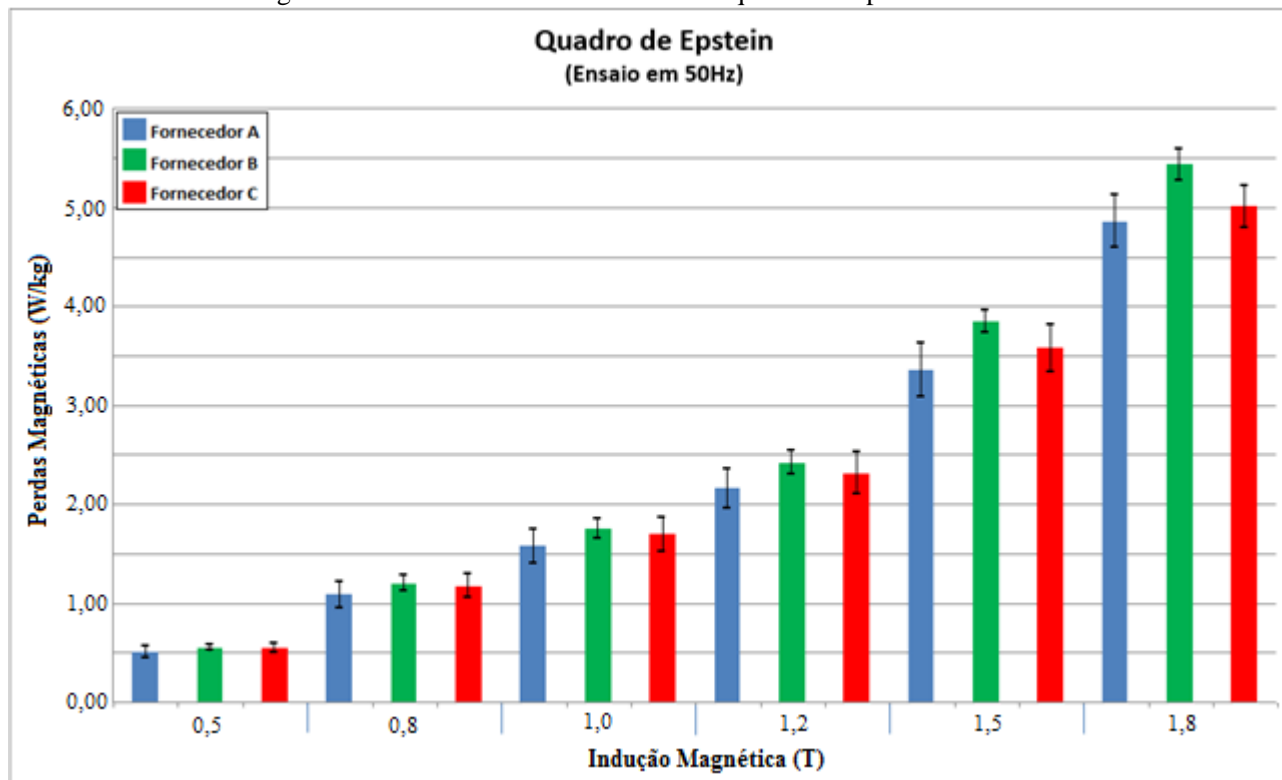
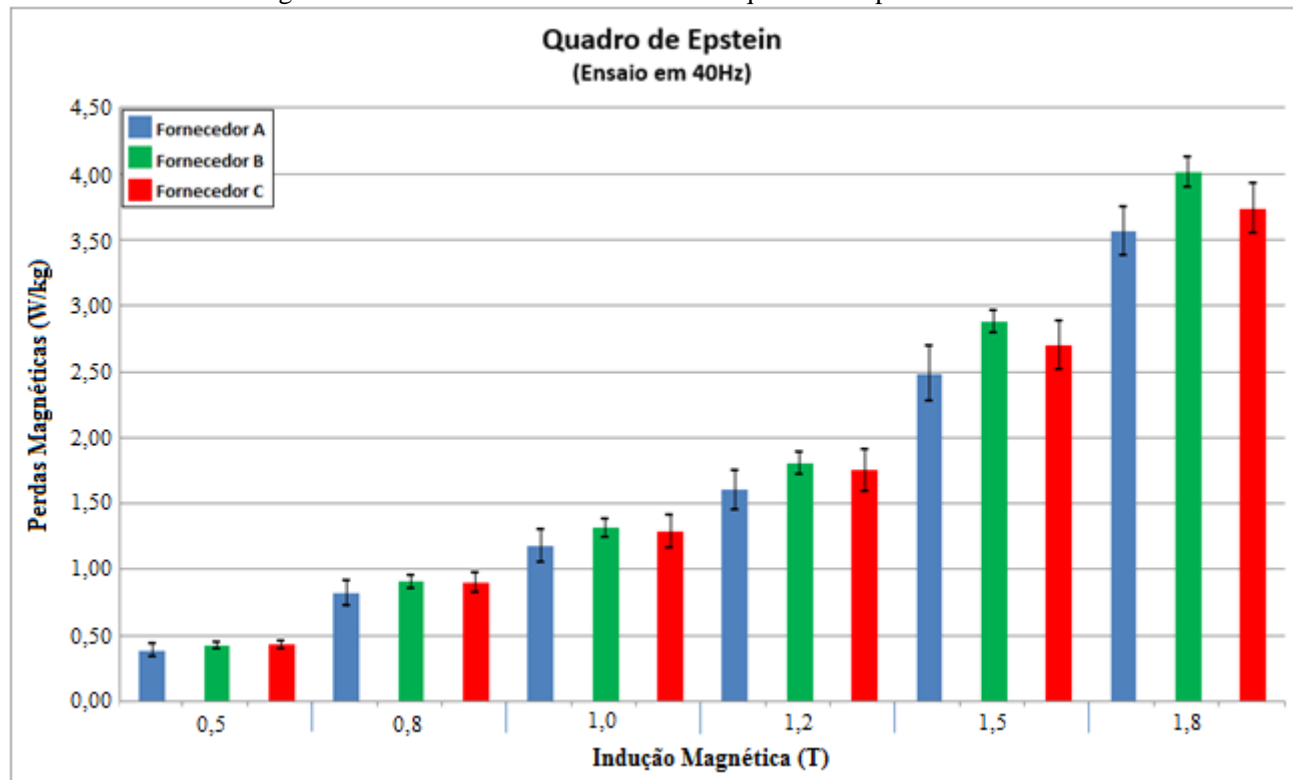


Figura 6.3 – Resultados dos ensaios com o quadro de Epstein em 40Hz.



6.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS MOTORES DE INDUÇÃO

A média dos resultados obtidos nos ensaios realizados com os motores de indução padrão da carcaça IEC/ABNT 112, 4 polos e 7,5 cv são apresentados na Tabela 6.1 e na Figura 6.4.

Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios com os motores de indução.

Fornecedor	Perda Magnética		Desvio Padrão (W)	Limite Max. (W)*	Limite Min. (W)*
	(W)	(W/kg) ^Δ			
A	127,80	10,33	3,27	140,10	115,50
B	134,80	10,89	4,67	152,40	117,20
C	123,60	9,99	2,39	132,60	114,60

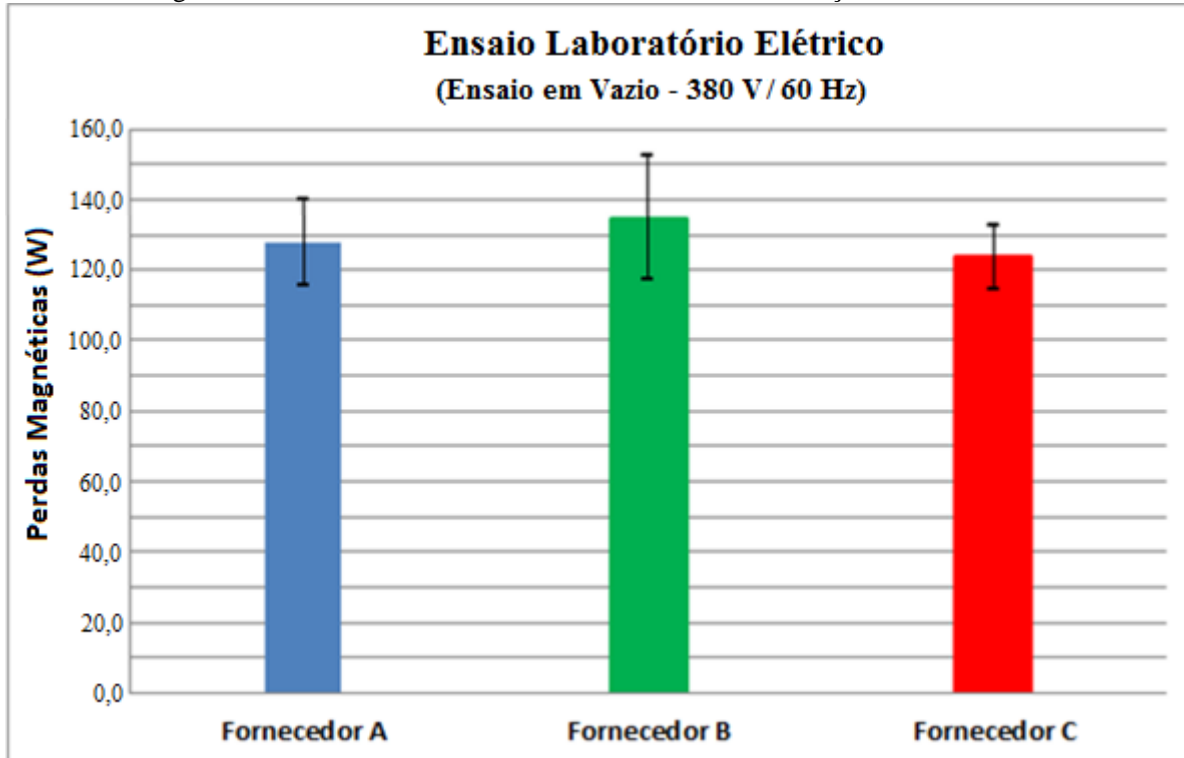
* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

^Δ Massa do estator: 12,38 kg

Avaliando os valores médios dos ensaios dos motores de indução, o Fornecedor “C” apresenta o menor valor de perdas magnéticas comparando com os demais fornecedores. Analisando os limites máximos do intervalo de confiança, o fornecedor “C” apresenta um valor aproximadamente igual aos resultados médios dos fornecedores “A” e “B”, indicando que este fornecedor apresenta um material de melhor qualidade entre as amostras analisadas, contrariando os resultados obtidos como o quadro de Epstein, havendo uma inversão entre os fornecedores “A” e “C”.

Semelhante ao ensaio com o quadro de Epstein, o fornecedor “B” apresenta valores maiores de perdas magnética em relação aos demais fornecedores.

Figura 6.4 - Resultados dos ensaios com os motores da carcaça IEC/ABNT 112.



6.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO

O dispositivo eletromagnético foi calibrado através de dois métodos diferentes. Os resultados do primeiro método são apresentados no Capítulo 6.4.1 e os resultados do segundo método são apresentados no Capítulo 6.4.2. No Capítulo 6.4.3 é realizada uma comparação entre os resultados obtidos com os dois métodos de calibração, tendo o objetivo de validar os ensaios.

6.4.1 Calibração – Método 1

Na calibração do dispositivo eletromagnético, através do método 1, foram obtidas duas curvas de perdas magnéticas, para cada frequência. A primeira curva, apresentada na Figura 6.5, relaciona as perdas magnéticas em função da indução magnética máxima induzida nos dentes do dispositivo eletromagnético. A segunda curva, apresentada na Figura 6.6, relaciona as perdas magnéticas em função da tensão eficaz de fase do enrolamento secundário. Os valores são apresentados nas Tabelas D1 e D2 (Apêndice D).

Avaliando as curvas apresentadas na Figura 6.5 é possível perceber o acréscimo das perdas magnéticas em função do aumento da indução magnética máxima e com o aumento da frequência de alimentação.

Nas curvas da Figura 6.6 é possível perceber que, para um mesmo valor de tensão eficaz de fase do secundário as perdas magnéticas são maiores com a diminuição da frequência de alimentação. Este comportamento se justifica, pois com a diminuição da frequência de alimentação, para um mesmo valor de tensão elétrica, a indução magnética induzida no núcleo ferromagnético aumenta, consequentemente aumentando as perdas magnéticas.

Figura 6.5 - Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 1.

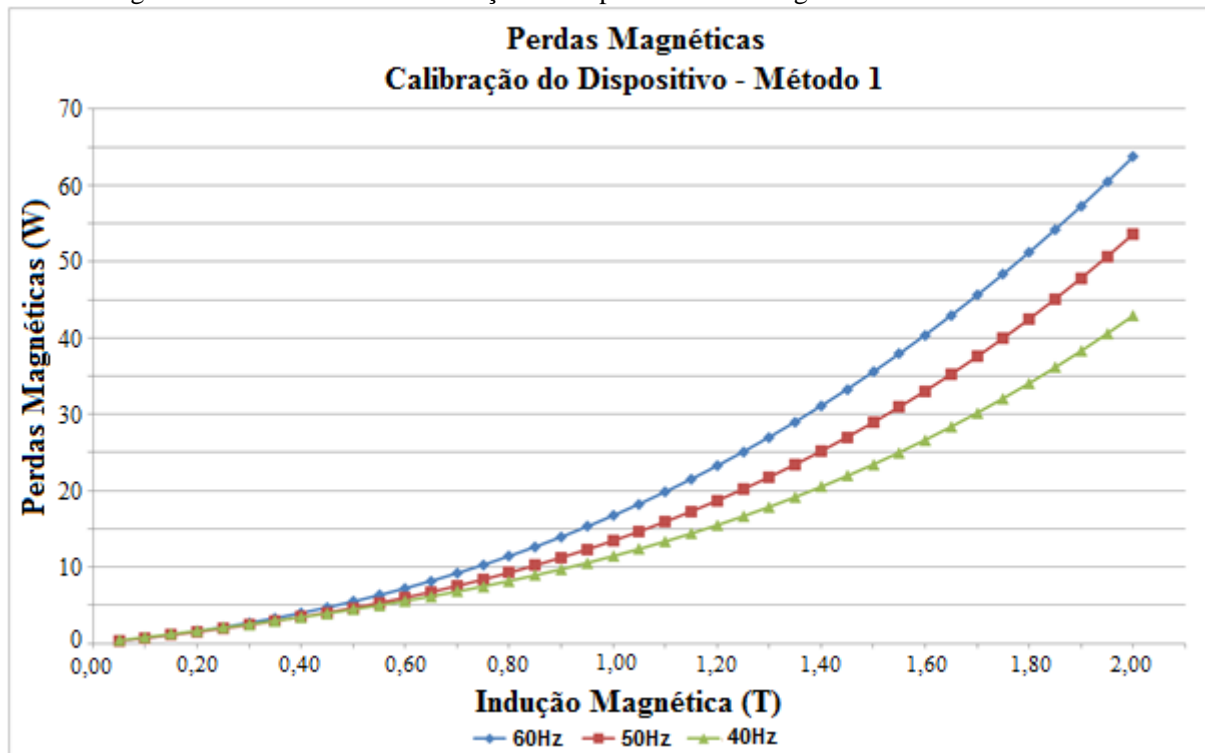
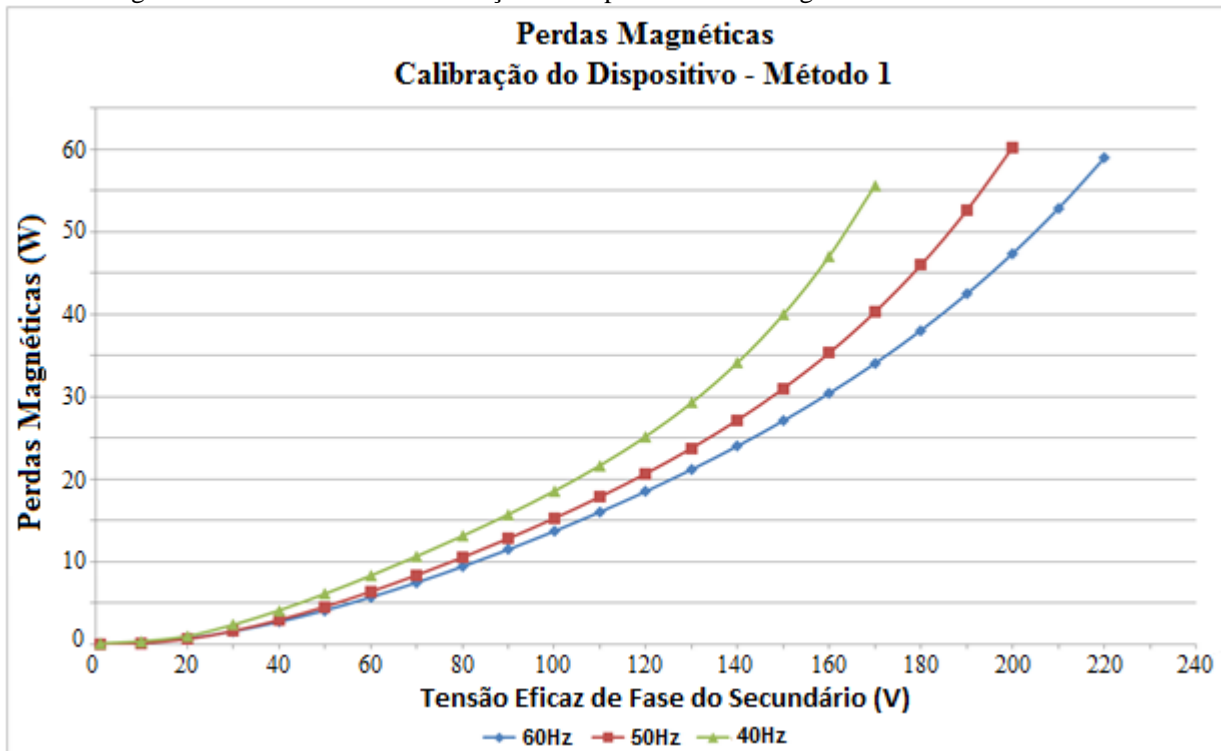


Figura 6.6 – Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 1.



6.4.2 Calibração – Método 2

Na calibração do dispositivo eletromagnético, através do método 2, primeiramente foram obtidos os valores de perdas magnéticas do anel laminado através do ensaio de *Core Test* (valores apresentados na Tabela D.3 - Apêndice D).

Realizando-se os ensaios com o anel laminado junto ao dispositivo eletromagnético, é necessário subtrair, das perdas magnéticas totais, as perdas magnéticas do anel laminado medidas no ensaio *Core Test*. O resultado é a determinação das perdas magnéticas do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética máxima (induzida no dente do dispositivo), vide Figura 6.7, e em função da tensão eficaz de fase do secundário, vide Figura 6.8. Os valores são apresentados nas Tabelas D4 e D5 (Apêndice D).

Os resultados obtidos através do segundo método de calibração apresentaram os mesmos comportamentos dos resultados obtidos através do primeiro método de calibração, acrescido das perdas magnéticas em função do aumento da indução magnética e da frequência da fonte de alimentação. Sendo que para um mesmo valor de tensão induzida no enrolamento secundário as perdas magnéticas aumentam com a diminuição da frequência de alimentação.

Figura 6.7 - Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 2.

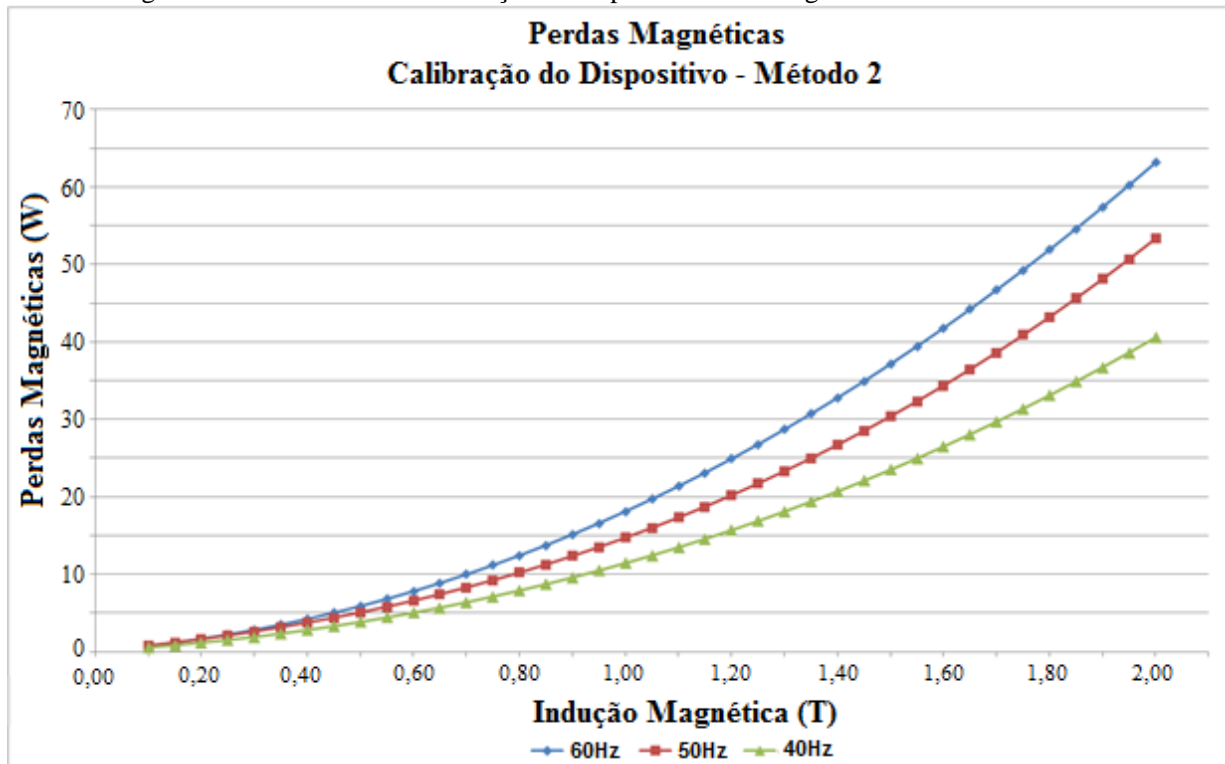
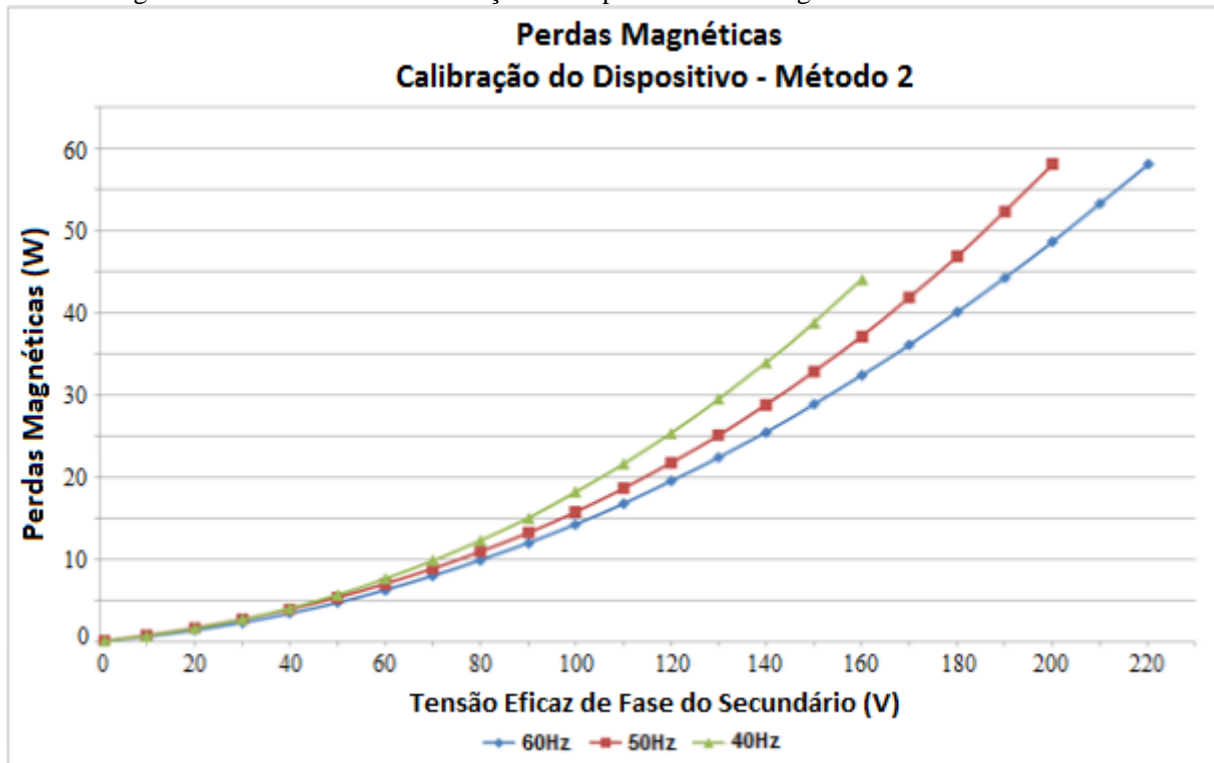


Figura 6.8 - Resultados da calibração do dispositivo eletromagnético através do método 2.



6.4.3 Comparação entre os métodos de calibração

A realização de dois métodos de calibração do dispositivo eletromagnético se faz necessária para verificar se os resultados obtidos apresentariam valores aproximados ou uma mesma tendência, validando a calibração através do método 1 (método utilizado para obter os valores de perdas magnéticas do dispositivo eletromagnético, que serão utilizados nos ensaios com as amostras).

Com a realização da calibração do dispositivo, esperava-se uma variação máxima entre os resultados obtidos nos diferentes métodos de calibração de aproximadamente 15%. Esta variação é esperada pela diferença entre as metodologias dos ensaios, sendo que o método 2 utiliza um ensaio (*Core Test*) que apresenta um caminho magnético somente tangencial ao diâmetro do anel laminado, comportamento diferente do encontrado no primeiro método de calibração.

Na Tabela 6.2 são apresentadas as variações em percentual entre os resultados obtidos nos dois métodos de calibração.

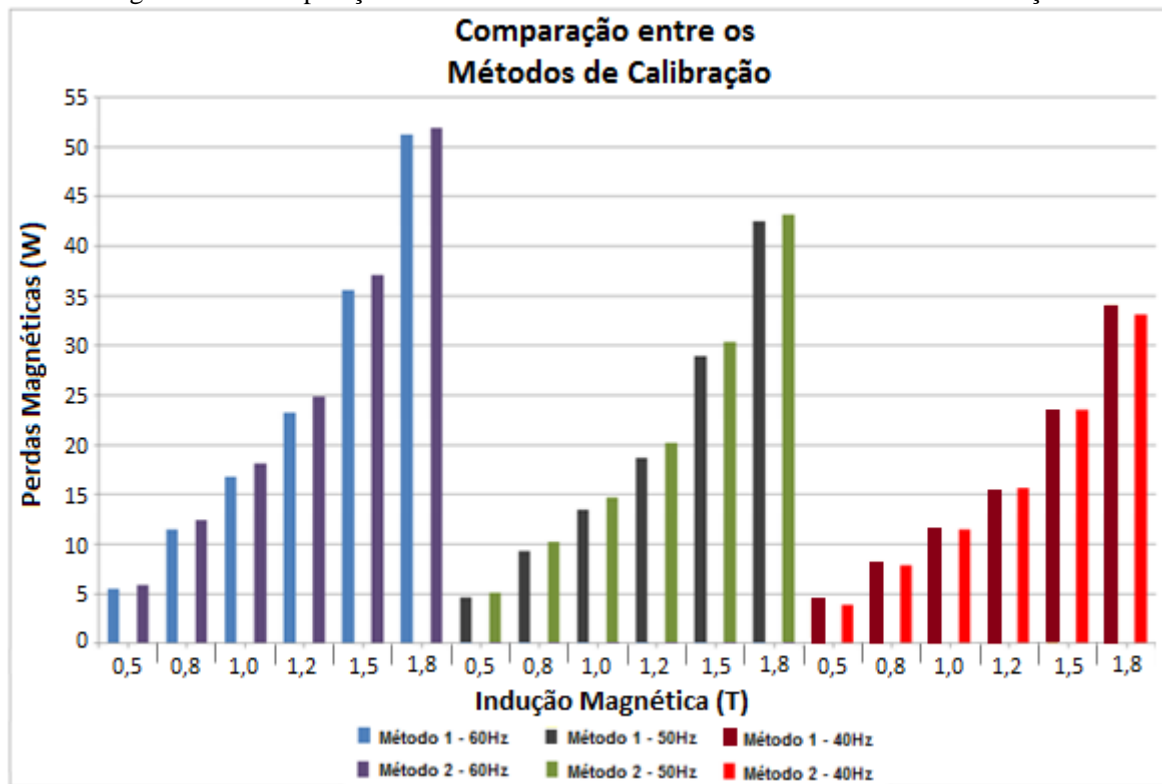
Tabela 6.2 – Variação entre os resultados de perdas magnéticas obtidos pelos diferentes métodos de calibração.

Indução Magnética (T)	Variação (%)*		
	60Hz	50Hz	40Hz
0,5	7,40	9,52	-10,29
0,8	8,73	9,05	-3,34
1,0	8,23	9,48	0,08
1,2	7,03	7,98	1,30
1,5	4,42	5,01	0,25
1,8	1,29	1,69	-2,86

* Utilizando os resultados do método 1 como base.

Na Figura 6.9 são comparados os valores de perdas magnéticas obtidos nos dois métodos de calibração em função da indução magnética e da frequência do ensaio. Como a diferença entre os valores obtidos nos dois métodos de calibração ficaram abaixo do valor máximo esperado, pode-se concluir que os resultados condizem com as perdas magnéticas do núcleo ferromagnético do dispositivo eletromagnético trifásico, já que dois ensaios com metodologias diferentes apresentaram uma mesma tendência.

Figura 6.9 – Comparação dos resultados obtidos nos diferentes métodos de calibração.



6.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO

As amostras do dispositivo eletromagnético foram ensaiadas nas 3 frequências nas quais o dispositivo eletromagnético foi calibrado. Os resultados obtidos dos ensaios são apresentados em função da indução magnética nas Figuras 6.10, 6.12 e 6.14 (os valores são apresentados nas Tabelas E1, E3 e E5 - Apêndice D), e os resultados em função da tensão eficaz de fase do secundário são apresentados nas Figuras 6.11, 6.13 e 6.15 (os valores são apresentados nas Tabelas E2, E4 e E6 - Apêndice D), respectivamente para as frequências de 60Hz, 50Hz e 40Hz.

Conforme o comportamento nos demais métodos de ensaios, foi possível observar o acréscimo das perdas magnéticas para os 3 fornecedores em relação ao aumento da indução magnética nas amostras e com o aumento da frequência de alimentação. Este comportamento pode ser melhor observado na Figura 6.16 onde são apresentados os resultados dos ensaios com as amostras do Fornecedor A.

Avaliando os valores médios dos ensaios com as amostras (estatores) do dispositivo eletromagnético, o fornecedor “C” apresenta o menor valor de perdas magnéticas comparado aos demais fornecedores. Analisando os limites máximos do intervalo de confiança, o fornecedor “C” apresenta um valor aproximadamente igual ou menor aos resultados médios dos fornecedores “A” e “B”, indicando que este fornecedor apresenta um material de melhor qualidade entre as amostras analisadas, contrariando os resultados obtidos com o quadro de Epstein.

Semelhantemente aos demais ensaios, o fornecedor “B” apresenta valores maiores de perdas magnéticas em relação aos demais fornecedores.

Figura 6.10 – Resultados das amostras do dispositivo em função da indução magnética máxima em 60Hz.

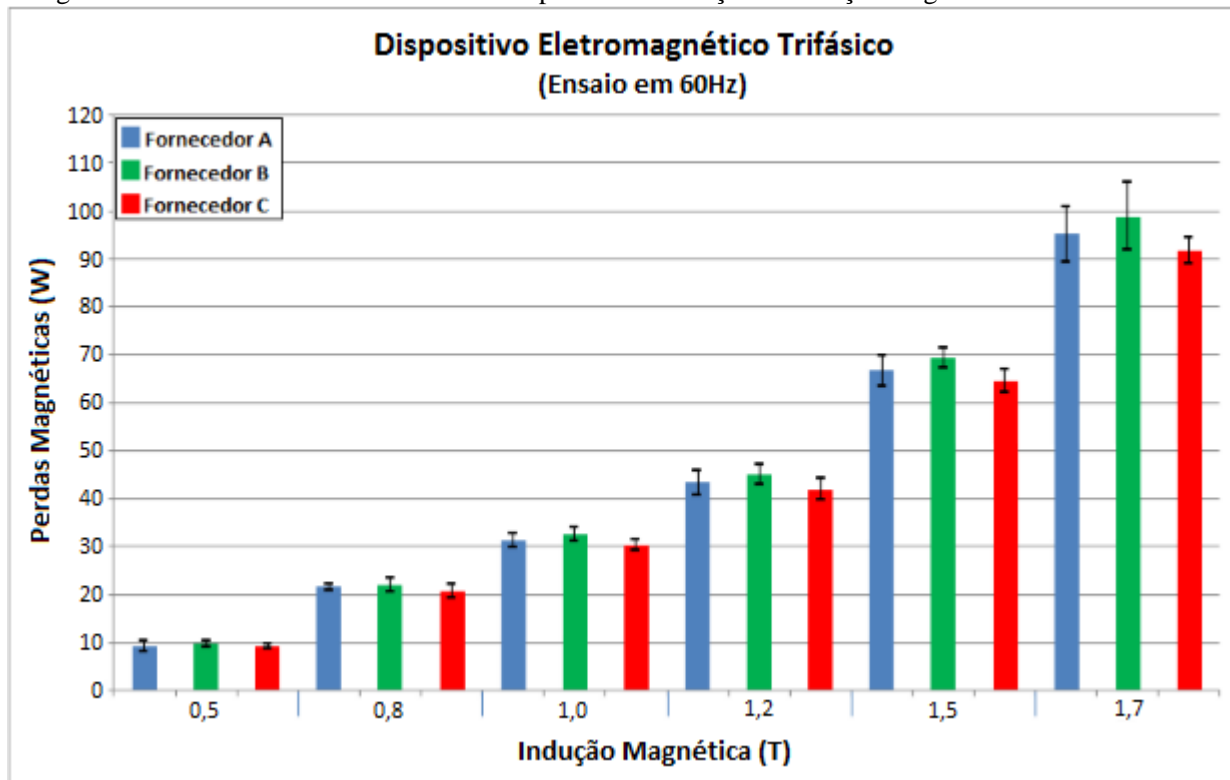


Figura 6.11 – Resultados das amostras do dispositivo em função da tensão eficaz de fase do secundário em 60Hz.

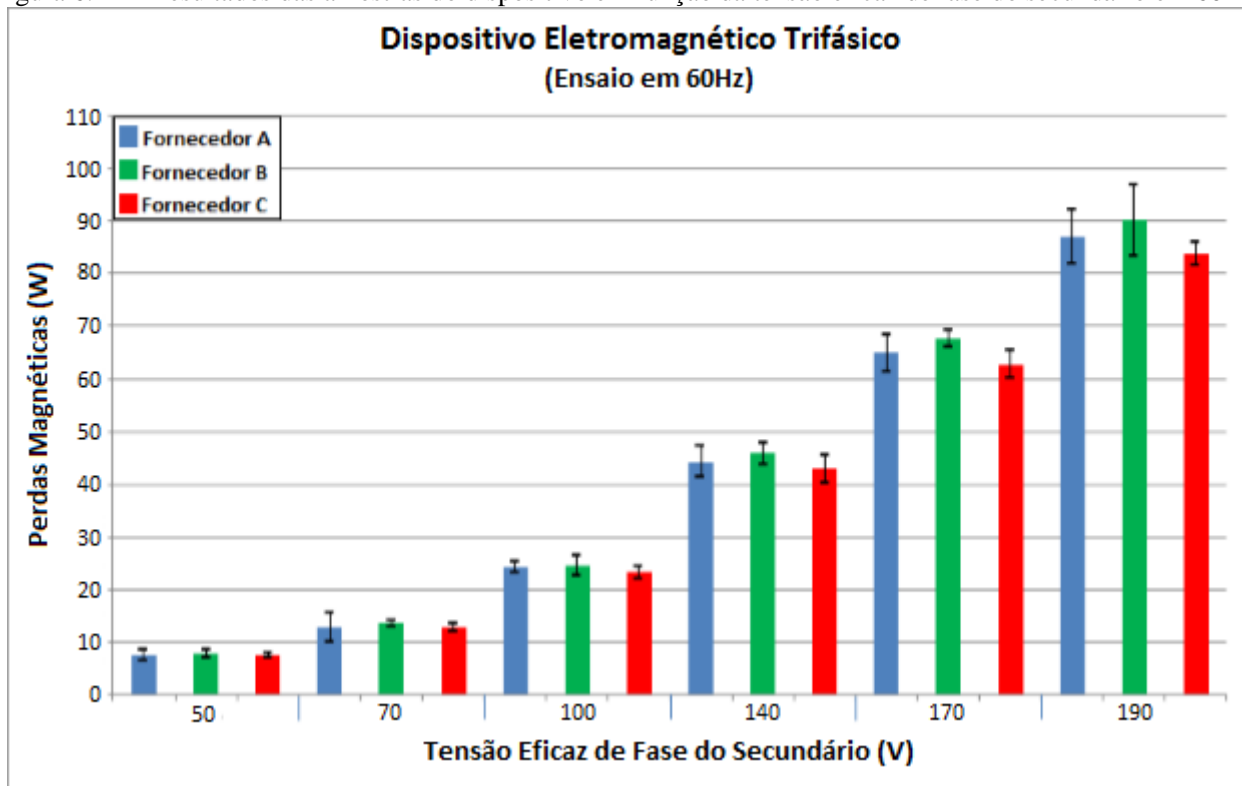


Figura 6.12 – Resultados das amostras do dispositivo em função da indução magnética máxima em 50Hz.

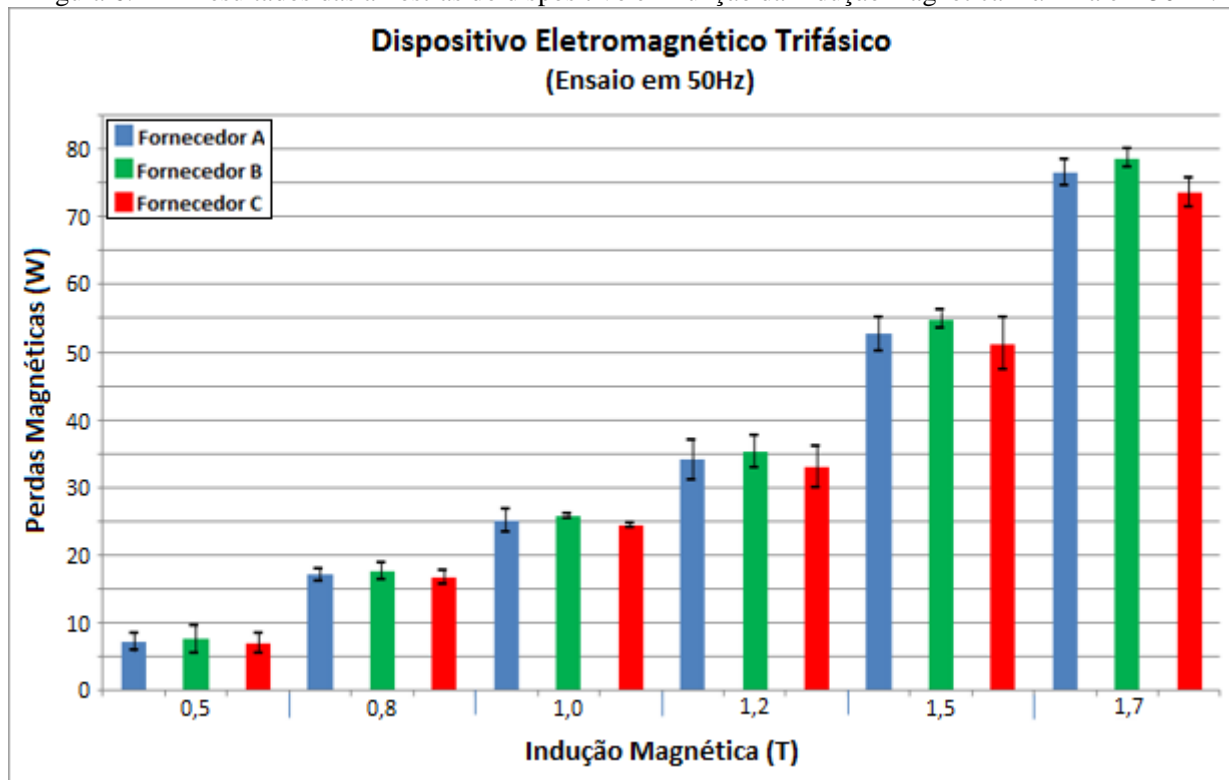


Figura 6.13 – Resultados das amostras do dispositivo em função da tensão eficaz de fase do secundário em 50Hz.

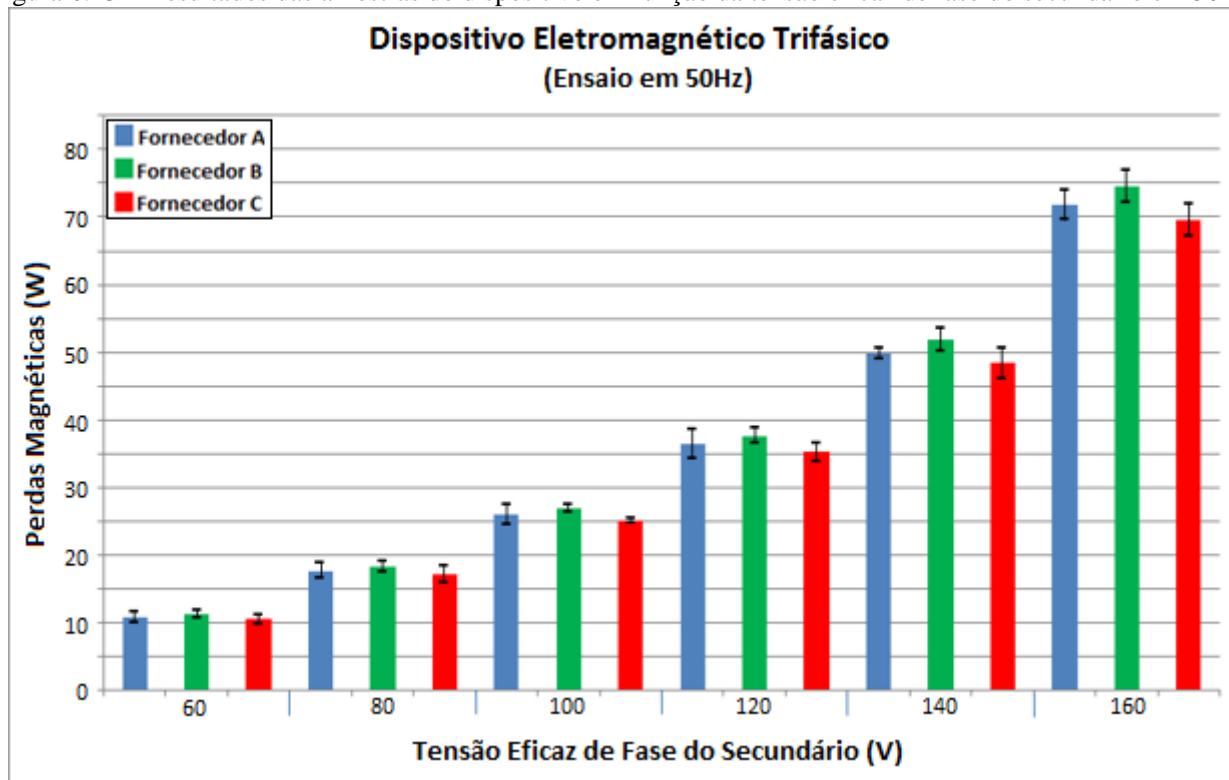


Figura 6.14 – Resultados das amostras do dispositivo em função da indução magnética máxima em 40Hz.

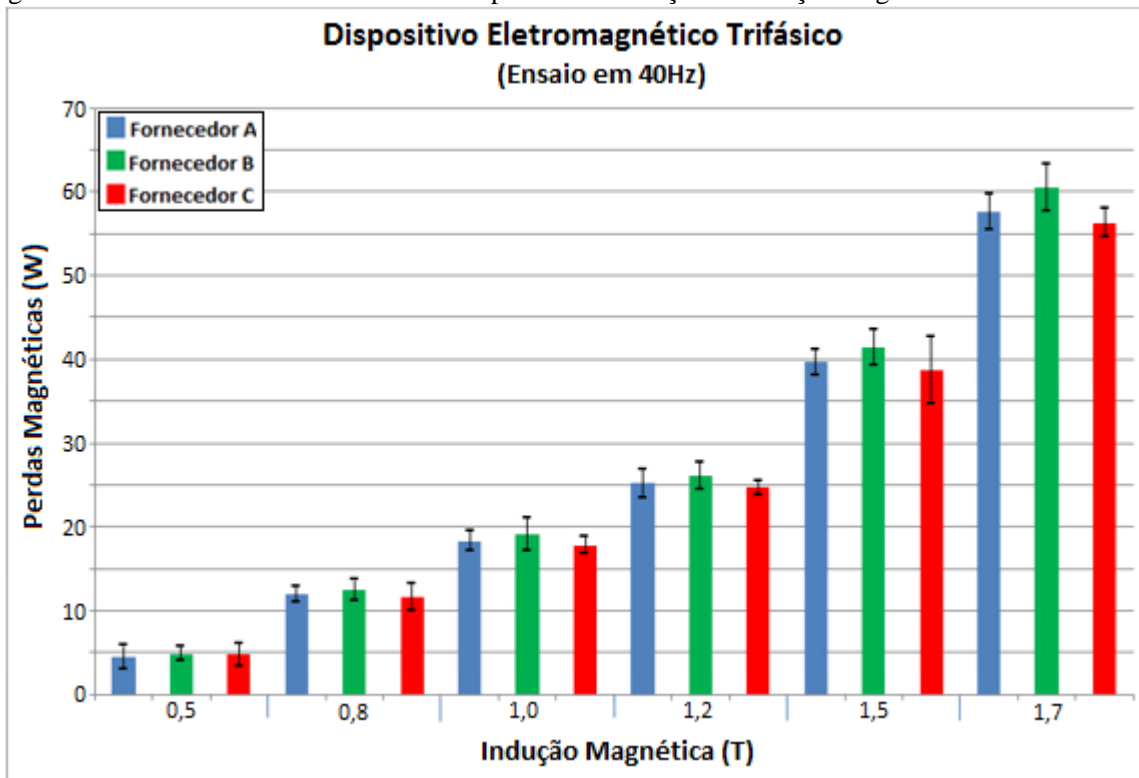


Figura 6.15 – Resultados das amostras do dispositivo em função da tensão eficaz de fase do secundário em 40Hz.

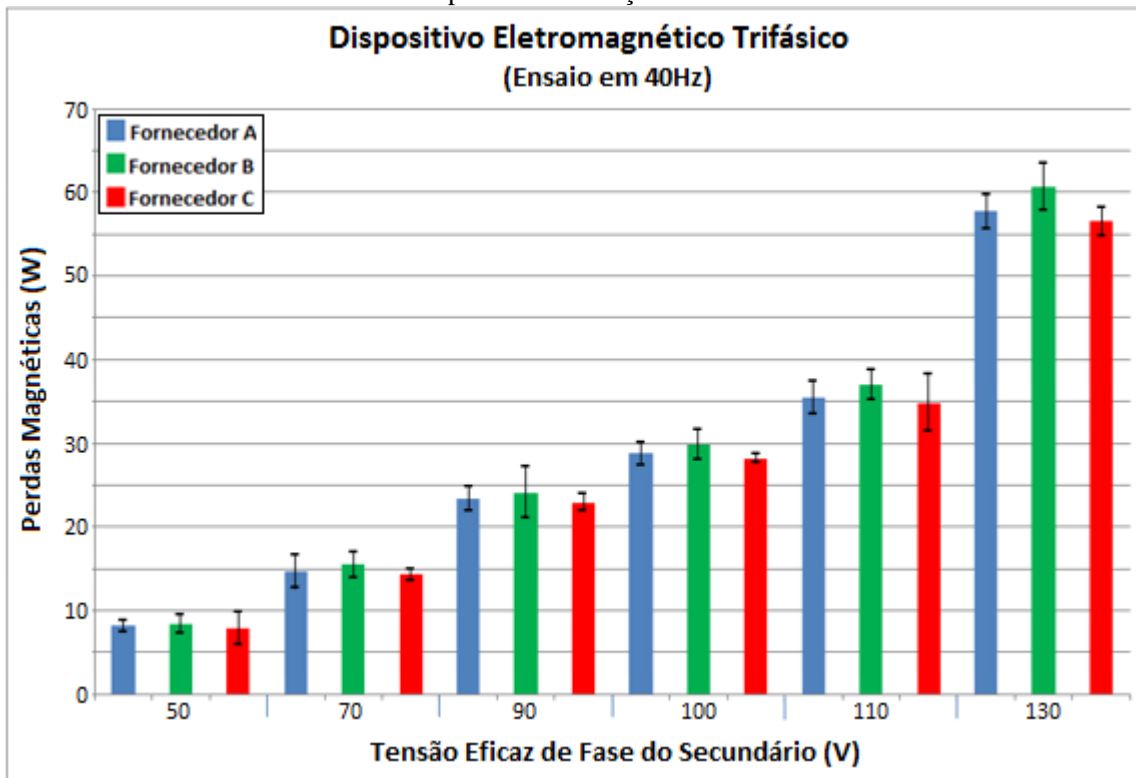
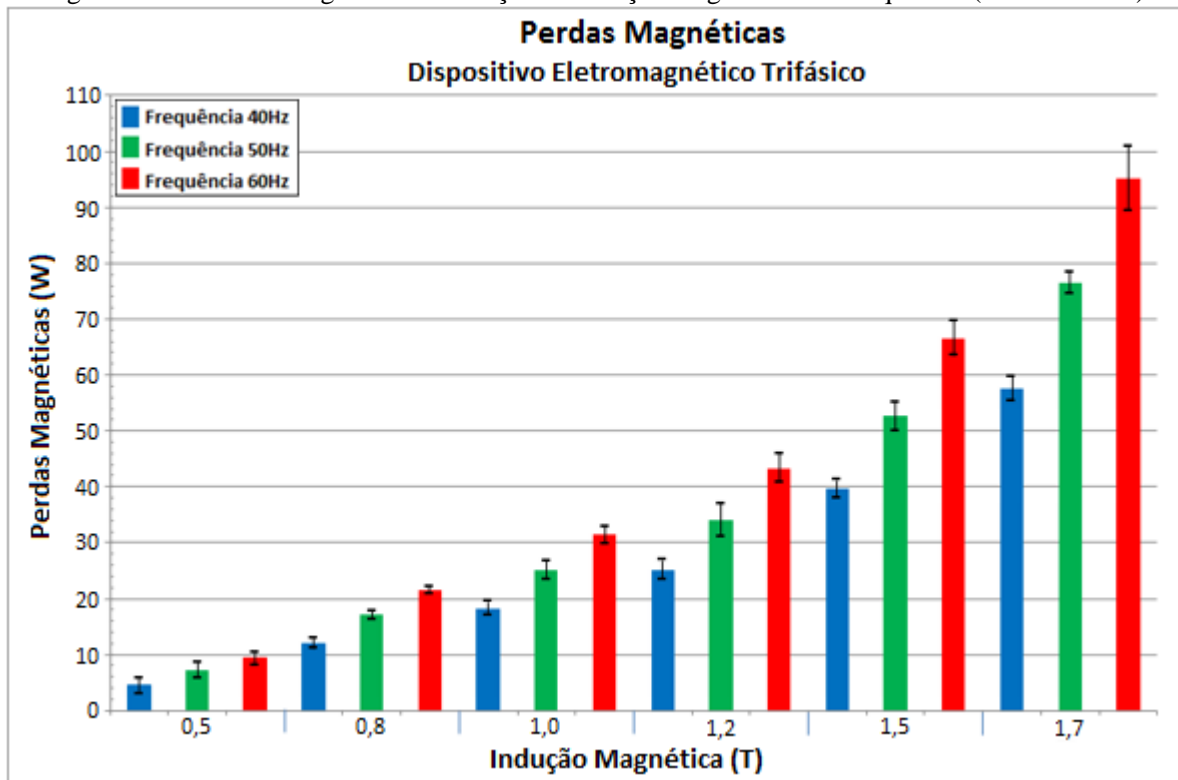


Figura 6.16 – Perdas Magnéticas em função da indução magnética e da frequência (Fornecedor A).



6.6 REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

O teste de repetibilidade dos resultados obtidos com a bancada de ensaios com o dispositivo eletromagnético foi realizado a fim de avaliar o desempenho e a confiabilidade dos mesmos. Foi escolhido de forma aleatória uma amostra (estator) das 15 amostras existentes dos 3 fornecedores e esta amostra foi ensaiada 10 vezes consecutivas (ensaios denominados de Ens. 1 a Ens.10). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de repetibilidade de 1 ao 5.

B (T)	Ens. 1 (W)	Ens. 2 (W)	Ens. 3 (W)	Ens. 4 (W)	Ens. 5 (W)
0,5	9,09	9,05	8,95	9,06	9,06
0,8	21,11	20,29	21,11	20,94	21,04
1,0	31,14	30,27	30,77	30,92	30,76
1,2	42,37	42,51	42,25	42,76	42,82
1,5	65,06	64,96	65,49	64,71	64,78
1,7	92,06	91,83	91,60	93,80	91,09

Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios de repetibilidade de 6 ao 10.

B (T)	Ens. 6 (W)	Ens. 7 (W)	Ens. 8 (W)	Ens. 9 (W)	Ens. 10 (W)
0,5	9,10	9,10	9,04	9,06	9,15
0,8	21,30	21,06	21,02	21,30	21,17
1,0	30,00	30,99	30,68	30,81	30,64
1,2	42,78	42,39	42,60	42,49	42,47
1,5	65,61	64,71	64,81	64,73	64,81
1,7	89,90	92,94	90,90	92,41	92,18

Na Tabela 6.5 são demonstrados os valores obtidos através do tratamento estatístico dos resultados dos ensaios, apresentando os valores médios, desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados, calculado pela Equação 6.1.

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

onde,

C_v : Coeficiente de variação, [%];

σ : Desvio padrão, [W];

\bar{x} : Média aritmética, [W].

Tabela 6.5 – Resultados estatísticos dos ensaios de repetibilidade.

B (T)	Média (W)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
0,5	9,07	0,05	0,57%
0,8	21,03	0,29	1,36%
1,0	30,70	0,34	1,10%
1,2	42,54	0,19	0,45%
1,5	64,97	0,33	0,51%
1,7	91,87	1,10	1,19%

Os resultados obtidos com os 10 ensaios apresentaram coeficientes de variação abaixo de 1,5 %, comprovando a baixa dispersão dos resultados obtidos e confirmando que a bancada de ensaios possui uma boa repetibilidade dos resultados, chegando a valores próximos aos encontrados em bancadas comerciais [10].

6.7 INCERTEZA DE MEDIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Todos os equipamentos de medição da empresa WEG Equipamentos Elétricos são calibrados regularmente por métodos normatizados e seus certificados são rastreáveis pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia). A última calibração do analisador de potência YOKOGAWA® WT500, utilizado nesse trabalho, apresentou uma incerteza de medição máxima de 5,4mA na faixa de medição de 10A e uma incerteza de medição máxima de 61mV na faixa de medição de 300Vca, considerando todos os canais de medição. O osciloscópio Agilent DSO5014A, utilizado na calibração do dispositivo eletromagnético através do método 2, apresentou na última calibração uma incerteza máxima de 1,9mV na faixa de medição de mV/div e uma incerteza máxima de 100mV na faixa de medição de V/div, considerando todos os canais de medição.

6.8 CONCLUSÕES DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

A análise experimental neste trabalho foi realizada observando principalmente os valores médios, máximos e mínimos do intervalo de confiança dos resultados obtidos para cada fornecedor nos diferentes ensaios. Desta forma, o quadro de Epstein apresentou uma inversão entre o primeiro e o segundo colocado, vide Tabela 6.6, em relação aos ensaios com os motores de indução e com o dispositivo eletromagnético.

Tabela 6.6 – Classificação dos fornecedores através dos valores médios.

Colocação	Quadro de Epstein	Motores de Indução	Dispositivo Eletromagnético
1º	Fornecedor A	Fornecedor C	Fornecedor C
2º	Fornecedor C	Fornecedor A	Fornecedor A
3º	Fornecedor B	Fornecedor B	Fornecedor B

Este mesmo comportamento foi observado no trabalho publicado em [10] e [16], quando foram avaliados três fornecedores de chapas de aço com o do dispositivo desenvolvido no trabalho [13].

Os ensaios de repetibilidade indicaram que a bancada experimental possui um bom índice de repetibilidade dos resultados obtidos, apresentando um coeficiente de variação menor do que 1,5%.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento, o projeto e a construção de um dispositivo eletromagnético capaz de analisar as perdas magnéticas que ocorrem nas chapas de aço dos estatores de motores elétricos trifásicos. A análise dos resultados mostrou que os objetivos propostos no início do trabalho foram alcançados, ou seja, o dispositivo eletromagnético desempenhou corretamente a sua função.

Avaliando os resultados dos ensaios realizados neste trabalho, conclui-se que o ensaio com o quadro de Epstein não representa as perdas magnéticas encontradas em um motor elétrico, já que a classificação dos fornecedores divergiu das classificações encontradas nos ensaios com o dispositivo eletromagnético e com os motores de indução trifásicos.

Uma das vantagens do dispositivo eletromagnético construído para este trabalho é a capacidade de medir as perdas magnéticas geradas em um estator de motor elétrico (pacote de chapas) contemplando todas as partes da amostra, diferentemente do ensaio com o quadro de Epstein e o *Core Test*. As condições do ensaio com o dispositivo eletromagnético são mais fiéis às características de uma máquina elétrica girante, permitindo uma melhor avaliação das perdas magnéticas nas chapas de aço, pois o fluxo magnético gerado no corpo de prova possui as mesmas características do fluxo gerado nos motores de indução trifásicos.

Este equipamento pode ser utilizado para avaliar com maior qualidade o comportamento das chapas de aço utilizadas em motores elétricos. Espera-se que este trabalho sirva de base para o desenvolvimento de outros trabalhos.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas possibilidades de melhoria da bancada experimental e de análise de resultados aparecem como proposta para trabalhos futuros:

1. Automatizar a bancada experimental, visando simplificar e agilizar os ensaios, isentando a necessidade da presença de operadores experientes durante os testes.

2. Realizar ensaios com outros tipos de chapas de aço para fins elétricos, avaliando se o comportamento encontrado neste trabalho se repete para os demais tipos de chapas.
3. Estudar o comportamento das perdas magnéticas no estator quando o enrolamento primário for alimentado com uma fonte de alimentação PWM.
4. Construir uma bancada de ensaio semelhante à construída neste trabalho, porém para carcaça maiores, observando se o comportamento das perdas magnéticas se mantém constante para carcaças com tamanhos diferentes.

REFERÊNCIAS

- [1] LANDGRAF, F.J.G. **Nonoriented Electrical Steels**. JOM Vol. 64, No. 7, 2012.
- [2] BATISTELA, N. J. **Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica).
- [3] NEGRI, G. M. R. **Estudo de Caso de Envelhecimento Magnético em Aços Elétricos de Grão Não Orientado de Baixa Eficiência**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [4] G. Bertotti. **General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials**. IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, no. I, p. 10, 1988.
- [5] SADOWSKI, N; MAZENC, M. L. **Relatório Interno**. Florianópolis: UFSC, 2003.
- [6] PFÜTZNER, H. **Present Status of Research on Two-Dimensional Magnetization**. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON 1&2 DIMENSIONAL MAGNETIC MEASUREMENT AND TESTING. Lüdenscheid: Alemanha, 2002. 81-87 p.
- [7] CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- [8] BROCKHAUS MEASUREMENTS. **Advanced Measuring Technologies**, 2010. Disponível em: <<http://www.brockhaus.net/e-index.html>>.
- [9] N.J. BATISTELA, M.V. FERREIRA DA LUZ, N. SADOWSKI, R. CARLSON, J.P.A. BASTOS, P. KUO-PENG e M.A. OLIVEIRA. **Uma Metodologia de Caracterização Magnética de Aço Silício e Aplicações na Predição das Perdas Magnéticas sob Regimes de Indução Senoidal e Distorcido**. Universidade Federal de Santa

Catarina. In: Congresso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales - Outubro, 2000.

[10] SCHLEGEL, J. P. **Desenvolvimento de um Sistema de Avaliação de Estatores sob Campos Rotacionais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).

[11] SILVA JÚNIOR, Pedro Armando da. **Bancada para Ensaios de Materiais Ferromagnéticos em Chapa Única Sob Campos Rotacionais**. Florianópolis, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.

[12] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -. **“NBR 5161 – Produtos laminados de aço para fins elétricos – Verificação das propriedades.”** 1977.

[13] IAMAMURA, B. A. **Desenvolvimento de um Dispositivo Magnético para Teste de Estatores**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).

[14] Catálogo ACESITA. **Aços Elétricos: Siliciosos de Grão Orientado e Siliciosos de Grão Não-Orientado**. Grupo Arcelor. Maio, 2007.

[15] IEEE Power Engineering Society -. **“IEE Std 112TM – Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.”** 2004.

[16] BASTOS. J.P.A, BATISTELA. N. J, DOKONAL. L.V, ESPÍNDOLA. A. A, KUO-PENG. P, RIGONI. M, SADOWSKI. N, SCHLEGEL. J. P. **Testing Strategies to Evaluate Non-Oriented Electrical Steels Losses**. Universidade Federal de Santa Catarina, *EMBRACO, Whirlpool*. 2011.

APÊNDICE A – DESENHO DAS CHAPAS DESENVOLVIDAS NESTE TRABALHO

Figura A.1 – Desenho da Chapa do Dispositivo Eletromagnético.

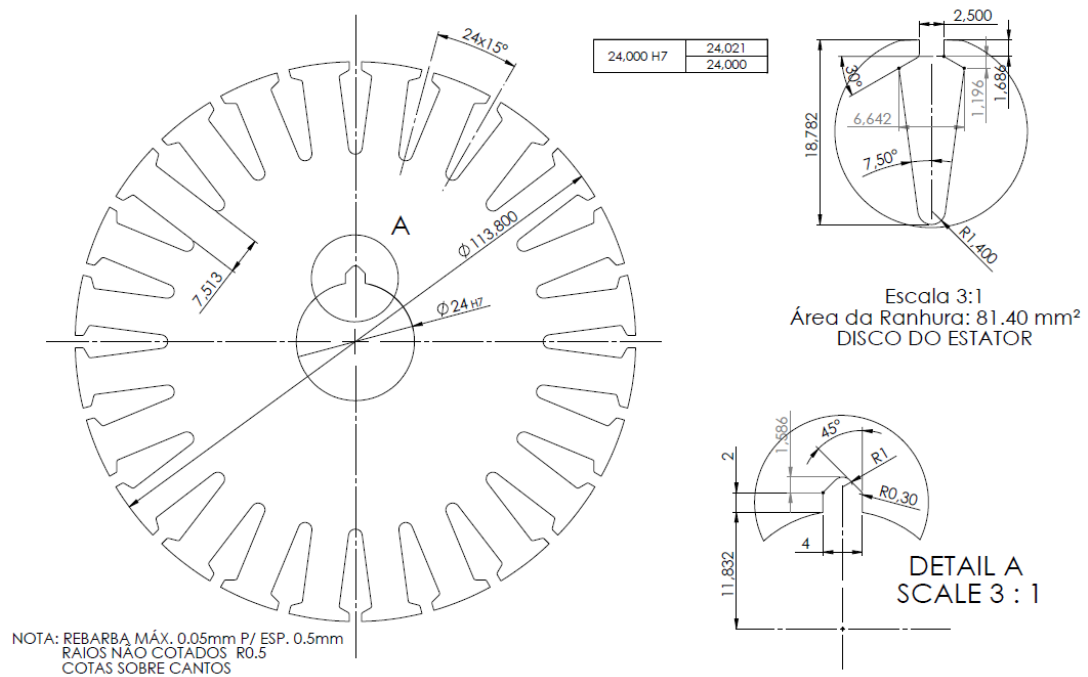
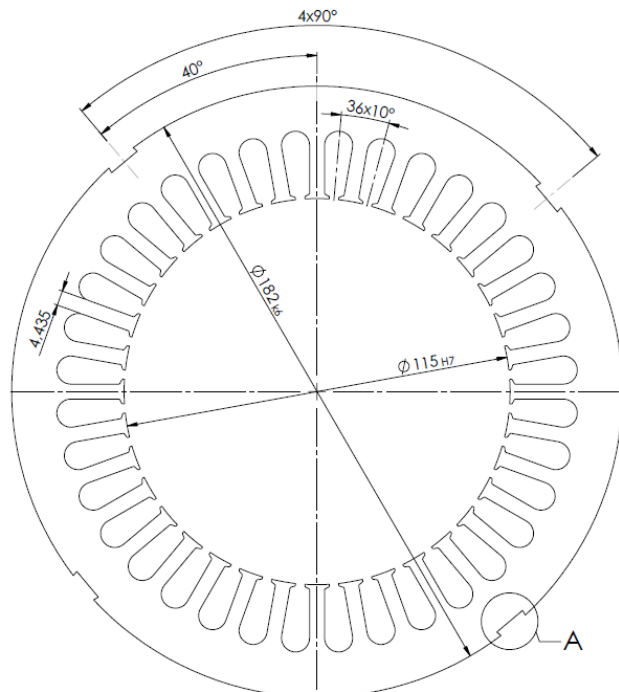
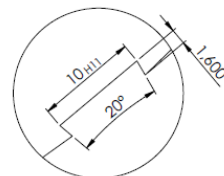


Figura A.2 – Desenho da Chapa do Estator (Amostra).

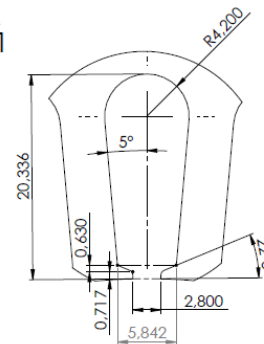


NOTA: REBARBA MÁX. 0.05mm P/ ESP. 0.5mm
 RAIOS NÃO COTADOS R0.5
 COTAS SOBRE CANTOS



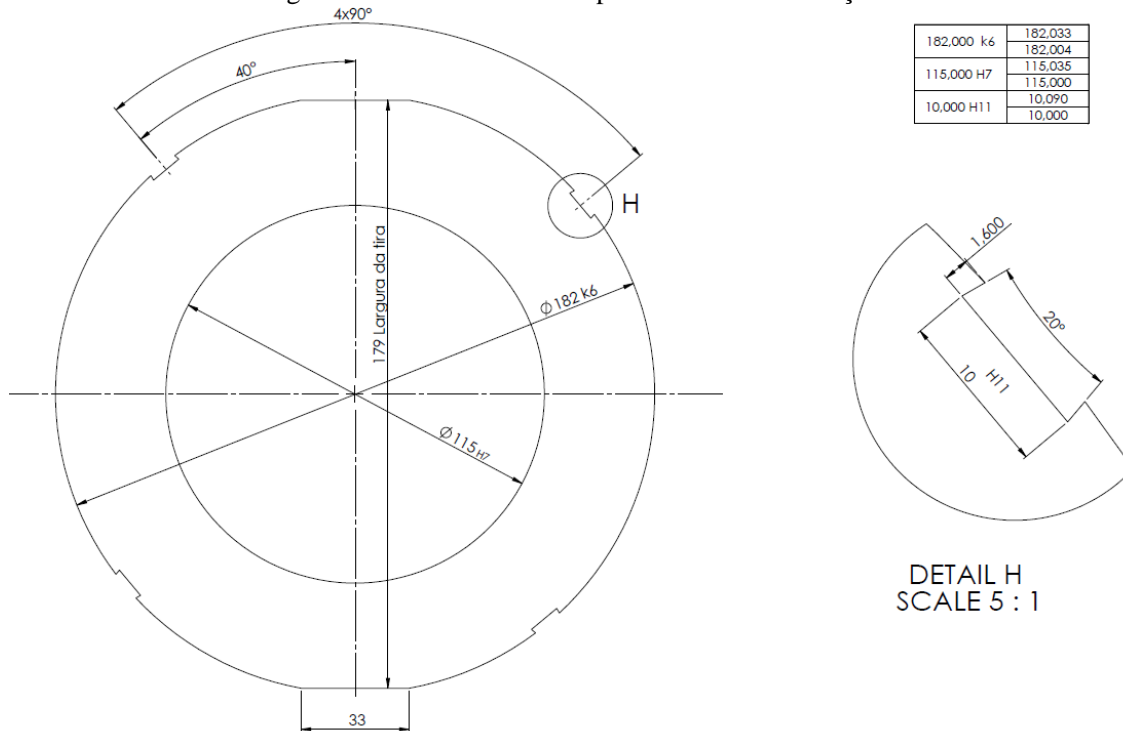
DETALHE A
 ESCALA 3:1

182,000 k6	182,033
	182,004
115,000 H7	115,035
	115,000
10,000 H11	10,090
	10,000



Escala 3:1
 Área da Ranhura: 138.04 mm²
 DISCO DO ESTATOR

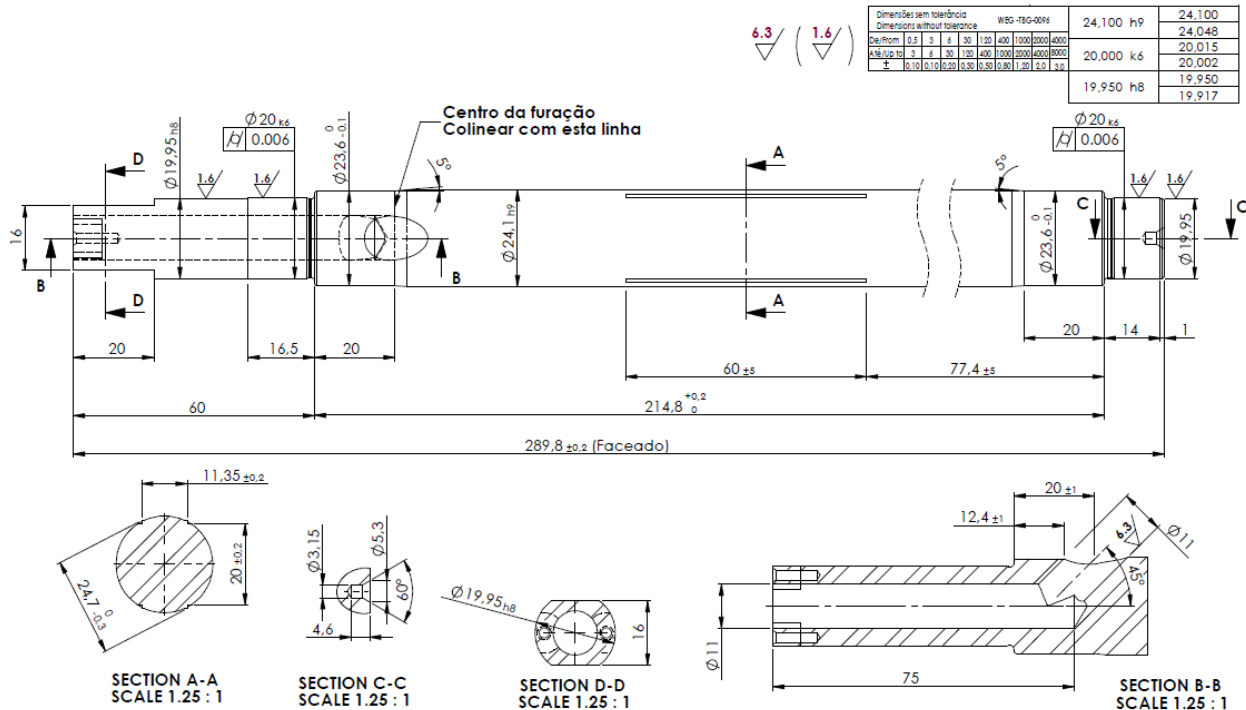
Figura A.3 – Desenho da Chapa do Anel de Calibração.



NOTA: REBARBA MÁX. 0.05mm P/ ESP. 0.5mm

APÊNDICE B – DESENHO DO EIXO DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO

Figura B.1 – Desenho do Eixo do Dispositivo Eletromagnético.



APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O QUADRO DE EPSTEIN

Tabela C.1 - Resultados do ensaio com o quadro de Epstein em 60Hz.

Fornecedor	Indução (T)	Perda Magnética (W/kg)	Desvio Padrão	Max. (W/kg)*	Min. (W/kg)*
A	0,5	0,64	0,01	0,72	0,56
B		0,70	0,01	0,74	0,65
C		0,69	0,01	0,75	0,62
A	0,8	1,39	0,03	1,56	1,22
B		1,53	0,02	1,63	1,42
C		1,48	0,03	1,63	1,33
A	1,0	2,03	0,04	2,25	1,80
B		2,24	0,02	2,37	2,11
C		2,14	0,04	2,37	1,92
A	1,2	2,79	0,05	3,04	2,53
B		3,11	0,03	3,25	2,96
C		2,94	0,05	3,20	2,67
A	1,5	4,36	0,06	4,69	4,03
B		4,96	0,03	5,10	4,81
C		4,56	0,05	4,86	4,27
A	1,8	6,29	0,06	6,61	5,97
B		6,99	0,04	7,20	6,78
C		6,39	0,05	6,66	6,12

* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

Tabela C.2 - Resultados do ensaio com o quadro de Epstein em 50Hz.

Fornecedor	Indução (T)	Perda Magnética (W/kg)	Desvio Padrão	Max. (W/kg)*	Min. (W/kg)*
A	0,5	0,51	0,01	0,57	0,44
B		0,55	0,01	0,59	0,52
C		0,55	0,01	0,60	0,50
A	0,8	1,09	0,02	1,22	0,96
B		1,20	0,01	1,28	1,13
C		1,18	0,02	1,29	1,06
A	1,0	1,58	0,03	1,75	1,41
B		1,76	0,02	1,85	1,66
C		1,70	0,03	1,87	1,52
A	1,2	2,17	0,04	2,36	1,97
B		2,42	0,02	2,54	2,31
C		2,32	0,04	2,53	2,11
A	1,5	3,36	0,05	3,63	3,09
B		3,85	0,02	3,97	3,74
C		3,58	0,04	3,82	3,34
A	1,8	4,86	0,05	5,13	4,59
B		5,44	0,03	5,60	5,27
C		5,01	0,04	5,22	4,80

* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

Tabela C.3 - Resultados do ensaio com o quadro de Epstein em 40Hz.

Fornecedor	Indução (T)	Perda Magnética (W/kg)	Desvio Padrão	Max. (W/kg)*	Min. (W/kg)*
A	0,5	0,38	0,01	0,43	0,34
B		0,42	0,00	0,44	0,40
C		0,43	0,01	0,46	0,40
A	0,8	0,82	0,02	0,91	0,72
B		0,91	0,01	0,96	0,85
C		0,90	0,01	0,97	0,82
A	1,0	1,18	0,02	1,30	1,05
B		1,31	0,01	1,38	1,25
C		1,29	0,02	1,41	1,17
A	1,2	1,60	0,03	1,75	1,46
B		1,81	0,02	1,89	1,72
C		1,75	0,03	1,91	1,59
A	1,5	2,48	0,04	2,69	2,28
B		2,88	0,02	2,96	2,79
C		2,70	0,03	2,88	2,51
A	1,8	3,57	0,03	3,75	3,38
B		4,01	0,02	4,12	3,90
C		3,74	0,03	3,92	3,55

* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO

Tabela D.1 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase - método 1.

Tensão [V]*	Perda Magnética (W)		
	40Hz	50Hz	60Hz
1,0	0,064	0,005	0,088
10,0	0,198	0,110	0,355
20,0	0,675	0,596	0,970
30,0	1,543	1,589	2,337
40,0	2,694	2,924	4,085
50,0	4,087	4,531	6,099
60,0	5,684	6,355	8,299
70,0	7,458	8,355	10,640
80,0	9,387	10,507	13,108
90,0	11,459	12,801	15,725
100,0	13,668	15,244	18,545
110,0	16,016	17,858	21,657
120,0	18,511	20,679	25,181
130,0	21,170	23,760	29,275
140,0	24,018	27,169	34,128
150,0	27,086	30,988	39,961
160,0	30,413	35,317	47,033
170,0	34,047	40,269	55,634
180,0	38,040	45,975	
190,0	42,455	52,578	
200,0	47,361	60,239	
210,0	52,834		
220,0	58,959		

* Tensão eficaz de fase do secundário (V)

Tabela D.2 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética - método 1.

Indução Máxima [T]	Perda Magnética (W)		
	60Hz	50Hz	40Hz
0,10	0,720	0,717	0,805
0,20	1,614	1,519	1,632
0,30	2,696	2,428	2,501
0,40	3,980	3,462	3,432
0,50	5,481	4,643	4,444
0,60	7,214	5,990	5,559
0,70	9,192	7,523	6,794
0,80	11,429	9,264	8,171
0,90	13,940	11,231	9,709
1,00	16,740	13,445	11,427
1,10	19,842	15,927	13,347
1,20	23,261	18,696	15,486
1,30	27,011	21,773	17,867
1,40	31,106	25,178	20,507
1,50	35,561	28,931	23,427
1,60	40,390	33,052	26,647
1,70	45,607	37,561	30,187
1,80	51,227	42,479	34,066
1,90	57,263	47,826	38,305
2,00	63,731	53,621	42,923

Tabela D.3 - Resultados do ensaio de *Core Test* com anel laminado.

Indução Magnética (T)	Perdas Magnéticas (W)*		
	60Hz	50Hz	40Hz
0,10	0,760	0,607	0,466
0,20	2,011	1,597	1,214
0,30	3,752	2,969	2,245
0,40	5,983	4,723	3,559
0,50	8,705	6,861	5,156
0,60	11,917	9,380	7,036
0,70	15,619	12,282	9,199
0,80	19,811	15,567	11,644
0,90	24,494	19,234	14,373
1,00	29,667	23,283	17,384
1,10	35,330	27,715	20,678
1,20	41,484	32,530	24,255
1,30	48,128	37,726	28,115
1,40	55,262	43,306	32,257
1,50	62,887	49,268	36,683
1,60	71,002	55,612	41,391
1,70	79,607	62,339	46,382
1,80	88,702	69,448	51,656
1,90	98,288	76,940	57,213
2,00	108,364	84,814	63,053

*Massa do anel laminado: 16,50kg

Tabela D.4 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase - método 2.

Tensão [V]*	Perdas Magnéticas (W)		
	60Hz	50Hz	40Hz
1,0	0,050	0,069	0,058
10,0	0,583	0,754	0,677
20,0	1,350	1,657	1,576
30,0	2,301	2,723	2,710
40,0	3,439	3,964	4,088
50,0	4,766	5,393	5,725
60,0	6,284	7,023	7,630
70,0	7,994	8,867	9,816
80,0	9,899	10,936	12,295
90,0	12,000	13,245	15,079
100,0	14,300	15,806	18,178
110,0	16,800	18,631	21,605
120,0	19,503	21,733	25,372
130,0	22,410	25,126	29,490
140,0	25,523	28,822	33,971
150,0	28,844	32,833	38,827
160,0	32,375	37,173	44,070
170,0	36,118	41,854	
180,0	40,075	46,889	
190,0	44,248	52,291	
200,0	48,638	58,073	
210,0	53,249		
220,0	58,081		

* Tensão eficaz de fase do secundário (V)

Tabela D.5 - Resultados do ensaio de calibração do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética - método 2.

Indução Máxima [T]	Perdas Magnéticas (W)		
	60Hz	50Hz	40Hz
0,10	0,780	0,813	0,557
0,20	1,679	1,639	1,167
0,30	2,828	2,619	1,915
0,40	4,229	3,764	2,805
0,50	5,887	5,085	3,987
0,60	7,804	6,593	5,034
0,70	9,983	8,300	6,384
0,80	12,427	10,102	7,898
0,90	15,138	12,353	9,580
1,00	18,118	14,720	11,436
1,10	21,370	17,329	13,471
1,20	24,896	20,189	15,688
1,30	28,697	23,311	18,094
1,40	32,776	26,705	20,691
1,50	37,133	30,381	23,486
1,60	41,770	34,349	26,481
1,70	46,688	38,618	29,682
1,80	51,889	43,198	33,092
1,90	57,372	48,098	36,716
2,00	63,139	53,328	40,558

APÊNDICE E – RESULTADOS COM AS AMOSTRAS DO DISPOSITIVO ELETROMAGNÉTICO TRIFÁSICO

Tabela E.1 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética, em 60Hz

Fornecedor	Indução Magnética (T)	Perda Magnética		Desvio Padrão	Max. (W)*	Min. (W)*
		(W)	(W/kg) ^Δ			
A	0,5	9,28	0,80	0,27	10,41	8,14
B		9,71	0,84	0,14	10,33	9,10
C		9,10	0,79	0,12	9,59	8,61
A	0,8	21,54	1,87	0,16	22,22	20,85
B		21,93	1,90	0,34	23,38	20,48
C		20,84	1,81	0,33	22,26	19,43
A	1,0	31,37	2,72	0,34	32,82	29,91
B		32,48	2,82	0,33	33,86	31,09
C		30,23	2,62	0,26	31,33	29,12
A	1,2	43,34	3,76	0,62	45,97	40,71
B		44,91	3,90	0,48	46,94	42,89
C		41,96	3,64	0,55	44,29	39,62
A	1,5	66,61	5,78	0,74	69,76	63,46
B		69,28	6,01	0,51	71,44	67,12
C		64,43	5,59	0,57	66,85	62,00
A	1,7	95,11	8,25	1,35	100,85	89,37
B		98,80	8,57	1,66	105,84	91,76
C		91,60	7,94	0,64	94,29	88,91

* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

^Δ Massa do estator: 11,53 kg

Tabela E.2 - Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase, em 60Hz.

Fornecedor	Tensão (V) *	Perda Magnética		Desvio Padrão	Max. (W) ^Δ	Min. (W) ^Δ
		(W)	(W/kg) [●]			
A	50,0	7,60	0,66	0,24	8,61	6,59
B		7,82	0,68	0,17	8,53	7,11
C		7,47	0,65	0,10	7,91	7,04
A	70,0	12,79	1,11	0,65	15,56	10,02
B		13,66	1,18	0,15	14,29	13,03
C		12,81	1,11	0,15	13,46	12,16
A	100,0	24,28	2,11	0,23	25,25	23,32
B		24,58	2,13	0,44	26,46	22,70
C		23,29	2,02	0,26	24,37	22,20
A	140,0	44,29	3,84	0,68	47,16	41,42
B		45,91	3,98	0,48	47,93	43,89
C		42,90	3,72	0,61	45,48	40,32
A	170,0	64,91	5,63	0,81	68,35	61,47
B		67,60	5,86	0,36	69,14	66,07
C		62,72	5,44	0,64	65,42	60,03
A	190,0	86,97	7,54	1,21	92,11	81,83
B		90,09	7,81	1,60	96,85	83,32
C		83,71	7,26	0,53	85,98	81,44

* Tensão eficaz de fase do secundário (V).

^Δ Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

● Massa do estator: 11,53 kg

Tabela E.3 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética, em 50Hz

Fornecedor	Indução Magnética (T)	Perda Magnética		Desvio Padrão	Max. (W)*	Min. (W)*
		(W)	(W/kg) ^Δ			
A	0,5	7,18	0,62	0,29	8,53	5,83
B		7,53	0,65	0,47	9,54	5,53
C		6,93	0,60	0,33	8,43	5,43
A	0,8	17,05	1,48	0,19	17,90	16,20
B		17,58	1,52	0,29	18,83	16,34
C		16,64	1,44	0,21	17,62	15,66
A	1,0	25,06	2,17	0,37	26,75	23,37
B		25,82	2,24	0,09	26,19	25,44
C		24,31	2,11	0,07	24,65	23,98
A	1,2	34,08	2,96	0,63	36,98	31,19
B		35,34	3,07	0,55	37,67	33,01
C		33,04	2,87	0,67	36,10	29,98
A	1,5	52,62	4,56	0,55	55,15	50,08
B		54,81	4,75	0,31	56,12	53,50
C		51,22	4,44	0,85	55,13	47,30
A	1,7	76,54	6,64	0,42	78,47	74,62
B		78,66	6,82	0,32	80,00	77,31
C		73,61	6,38	0,45	75,70	71,52

* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

^Δ Massa do estator: 11,53 kg

Tabela E.4 - Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase, em 50Hz.

Fornecedor	Tensão (V) *	Perda Magnética		Desvio Padrão	Max. (W) ^Δ	Min. (W) ^Δ
		(W)	(W/kg) [●]			
A	60,0	10,92	0,95	0,17	11,70	10,14
B		11,26	0,98	0,14	11,85	10,67
C		10,54	0,91	0,14	11,16	9,92
A	80,0	17,72	1,54	0,25	18,87	16,57
B		18,43	1,60	0,18	19,19	17,66
C		17,24	1,50	0,28	18,55	15,94
A	100,0	26,08	2,26	0,32	27,56	24,60
B		27,00	2,34	0,12	27,53	26,48
C		25,15	2,18	0,07	25,46	24,85
A	120,0	36,43	3,16	0,47	38,60	34,26
B		37,71	3,27	0,26	38,83	36,58
C		35,26	3,06	0,30	36,62	33,90
A	140,0	49,90	4,33	0,17	50,69	49,12
B		51,90	4,50	0,40	53,59	50,20
C		48,37	4,20	0,52	50,74	46,00
A	160,0	71,72	6,22	0,47	73,90	69,54
B		74,60	6,47	0,55	76,95	72,26
C		69,55	6,03	0,53	72,00	67,10

* Tensão eficaz de fase do secundário (V).

^Δ Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

● Massa do estator: 11,53 kg

Tabela E.5 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da indução magnética, em 40Hz

Fornecedor	Indução Magnética (T)	Perda Magnética		Desvio Padrão	Max. (W)*	Min. (W)*
		(W)	(W/kg) ^Δ			
A	0,5	4,44	0,39	0,30	5,83	3,05
B		4,84	0,42	0,20	5,68	4,00
C		4,77	0,41	0,32	6,11	3,43
A	0,8	11,94	1,04	0,20	12,85	11,03
B		12,40	1,08	0,30	13,66	11,15
C		11,61	1,01	0,40	13,30	9,91
A	1,0	18,30	1,59	0,25	19,47	17,14
B		19,08	1,65	0,45	21,01	17,15
C		17,82	1,55	0,25	18,88	16,76
A	1,2	25,20	2,19	0,37	26,88	23,52
B		26,14	2,27	0,38	27,77	24,51
C		24,65	2,14	0,22	25,57	23,73
A	1,5	39,63	3,44	0,35	41,22	38,04
B		41,39	3,59	0,50	43,51	39,27
C		38,73	3,36	0,94	42,73	34,74
A	1,7	57,59	4,99	0,46	59,70	55,49
B		60,41	5,24	0,66	63,20	57,62
C		56,27	4,88	0,41	57,99	54,55

* Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

^Δ Massa do estator: 11,53 kg

Tabela E.6 – Resultados dos ensaios com as amostras do dispositivo eletromagnético em função da tensão eficaz de fase, em 40Hz.

Fornecedor	Tensão (V) *	Perda Magnética		Desvio Padrão	Max. (W) ^Δ	Min. (W) ^Δ
		(W)	(W/kg) [●]			
A	50,0	8,14	0,71	0,16	8,86	7,41
B		8,41	0,73	0,25	9,46	7,36
C		7,89	0,68	0,45	9,80	5,98
A	70,0	14,63	1,27	0,43	16,62	12,64
B		15,46	1,34	0,36	16,99	13,92
C		14,27	1,24	0,15	14,93	13,62
A	90,0	23,39	2,03	0,32	24,85	21,92
B		24,12	2,09	0,73	27,20	21,03
C		22,89	1,99	0,24	23,92	21,87
A	100,0	28,73	2,49	0,28	30,04	27,42
B		29,82	2,59	0,41	31,58	28,06
C		28,14	2,44	0,12	28,67	27,62
A	110,0	35,48	3,08	0,43	37,45	33,51
B		37,01	3,21	0,42	38,81	35,22
C		34,79	3,02	0,80	38,20	31,38
A	130,0	57,67	5,00	0,43	59,67	55,68
B		60,58	5,25	0,66	63,38	57,79
C		56,50	4,90	0,39	58,15	54,85

* Tensão eficaz de fase do secundário (V).

^Δ Intervalo de confiança de 95% e distribuição da população para 3σ (97,5%).

● Massa do estator: 11,53 kg