

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

ANÁLISE E MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS
MATERIAS EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS E COM
CORREÇÃO DE HARMÔNICOS

ILTON ANCELMO PEREIRA JUNIOR

Joinville, fevereiro de 2011.

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

Formação: Mestrado em Engenharia Elétrica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO OBTIDA POR

Ilton Ancelmo Pereira Junior

**ANÁLISE E MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAS
EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS E COM CORREÇÃO DE HARMÔNICOS**

Apresentada em 15/02/2011 perante a Banca Examinadora:

Dr. Sérgio Haffner - Presidente (UFRGS)

Dr. Fausto Bastos Líbano (UNISINOS)

Dr. Ademir Nied (UDESC)

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mestrando: Ilton Ancelmo Pereira Junior – Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Haffner

Coorientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba

CCT/UDESC – JOINVILLE

**ANÁLISE E MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAS
EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS E COM CORREÇÃO DE HARMÔNICOS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE SANTA CATARINA, CENTRO DE
CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS.

Joinville

2011



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO – CPG

**"Análise e Medição das Propriedades Magnéticas dos Materiais em
Diferentes Frequências e com Correção de Harmônicos"**

por

Ilton Ancelmo Pereira Junior

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

na área de concentração "**Automação de Sistemas**", e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

Banca Examinadora:

Joinville, 15 de fevereiro de 2011

Dr. Sérgio Haffner

(presidente)

Dr. Fausto Bastos Líbano

UNISINOS

Dr. Ademir Nied

UDESC

FICHA CATALOGRÁFICA

NOME: Ilton Ancelmo Pereira Junor	
DATA DEFESA: 15/02/2011	
LOCAL: Joinville, CCT/UDESC	
NÍVEL: Mestrado	Número de ordem: 01 – CCT/UDESC
FORMAÇÃO: Engenharia Elétrica	
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Automação de Sistemas	
TÍTULO: Análise e Medição das Propriedades Magnéticas dos Materiais em Diferentes Frequências e com Correção de Harmônicos	
PALAVRAS - CHAVE: Automação industrial, grandezas magnéticas, instrumentação virtual, LabVIEW, quadro de Epstein.	
NÚMERO DE PÁGINAS: xx, 105 p.	
CENTRO/UNIVERSIDADE: Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC	
PROGRAMA: Pós-graduação em Engenharia Elétrica - PPGEEL	
CADASTRO CAPES: -----	
ORIENTADOR: Dr. Sérgio Haffner	
COORIENTADOR: Dr. Marcello Mezaroba	
PRESIDENTE DA BANCA: Dr. Sérgio Haffner	
MEMBROS DA BANCA: Dr. Fausto Bastos Líbano, Dr. Ademir Nied	

DEDICATÓRIA

Com amor, aos meus pais Ilton e Dalila.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à cooperação e compreensão de várias pessoas que se dedicaram ao longo do progresso desta contribuição científica. Gostaria de agradecer a todos que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, em especial:

- ao meu orientador, professor Sérgio Haffner, que conduziu diversas, longas e frutíferas conversas, as quais foram primordiais para evolução deste trabalho. Pelo auxílio na elaboração e planejamento dos ensaios, na análise de resultados e na correção desta dissertação. Obrigado por sua dedicação, amizade e motivação;
- ao meu coorientador, professor Mezaroba, pelas idéias e sugestões;
- ao professor Luís Alberto Pereira, por seu apoio e contribuições;
- ao nPEE, pela infraestrutura, suporte e apoio dos bolsistas;
- a empresa DAQSYS Dados e Controle, a qual faço parte, por viabilizar o desenvolvimento desta dissertação e conciliá-la com trabalho, por incentivar a pesquisa e crescimento intelectual;
- a minha namorada Franciane, que teve paciência, e manteve meu espírito alegre e entusiasmado, acompanhando meus passos e comemorando comigo cada progresso; e
- aos meus pais, pelos conselhos, carinho, amor e suporte prestado durante esta etapa.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	iv
DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTAS DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.3 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO	5
1.4 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	6
1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
1.2 PUBLICAÇÃO RELACIONADA AO DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO.....	7
1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	8
 CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS	9
2.1 PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS	9
2.2 MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS DUROS E MOLES	15
2.3 MATERIAIS LINEARES E NÃO-LINEARES	16
2.4 MATERIAIS HOMOGÊNEOS E NÃO-HOMOGÊNEOS.....	16
2.5 MATERIAIS ISOTRÓPICOS E NÃO-ISOTRÓPICOS	17
2.6 MATERIAIS DE GRÃO ORIENTADO (GO) E GRÃO NÃO-ORIENTADO (GNO).....	19
2.7 TRATAMENTO TÉRMICO	20
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22

CAPÍTULO 3 – MÉTODOS E NORMAS DE MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS.....	23
3.1 O QUADRO DE EPSTEIN	23
3.2 PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO	24
3.2.1 <i>Separação das perdas em histerésicas e de Foucault</i>	27
3.3 NORMA BRASILEIRA: NBR 6151	28
3.3.1 <i>Circuito esquemático</i>	28
3.3.2 <i>Requisitos para realização de ensaios</i>	29
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
CAPÍTULO 4 – MÉTODOS EXPERIMENTAIS	33
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS ..	33
4.2 CORREÇÃO DA FORMA DE ONDA DE TENSÃO DO SECUNDÁRIO	40
4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	46
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO	55
5.2 ANÁLISE DE ANISOTROPIA DO MATERIAL	59
5.3 INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO DO MATERIAL.....	63
5.4 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS.....	66
5.4.1 <i>Influência da frequência na distorção harmônica e na saturação</i>	71
5.5 ENSAIOS COM CORREÇÃO DE HARMÔNICAS	73
5.6 INTERFACE COM O USUÁRIO.....	77
5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
CAPÍTULO 6 – COMENTÁRIOS FINAIS	82
6.1 CONCLUSÕES.....	82
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO A – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	89
A.1 GRANDEZAS ELÉTRICAS	89
A.2 GRANDEZAS MAGNÉTICAS	91
A.3 EFEITO HALL.....	93

A.4	ANÁLISE DE SINAIS.....	94
A.4.1	TEOREMA DA AMOSTRAGEM.....	95
A.4.2	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL.....	96
ANEXO B	- PUBLICAÇÃO.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema para teste de Epstein.....	6
Figura 2 – Curva $B-H$ (SOARES, 2008).....	11
Figura 3 – Curva de magnetização (SANTOS, 2005).	13
Figura 4 – Variação na histerese para diferentes materiais (SOARES, 2008).	14
Figura 5 – Comparação entre curvas $B-H$ de diferentes materiais (SOARES, 2008).	15
Figura 6 – Principais direções cristalográficas no plano (110) de uma amostra cristalina(SANTOS, 2005).	17
Figura 7 – Curva de magnetização em diferentes direções de laminação (SANTOS, 2005; CULLITY e GRAHAM, 2009).	18
Figura 8 – Perdas magnéticas por histerese e dinâmicas, em lâminas com e sem tratamento térmico (MEURER, 2005).	21
Figura 9 – Laço $B-H$ das medidas realizadas em lâminas com e sem tratamento térmico a 50 Hz (MEURER, 2005).	22
Figura 10. Quadro de Epstein.	24
Figura 11. Posicionamento das lâminas no interior do quadro de Epstein.	25
Figura 12 – Circuito esquemático para realização do teste de perdas magnéticas e levantamento da curva $B-H$ (NBR-6151, 1996; MENDES, 2004).	29
Figura 13. Diagrama esquemático do sistema proposto para teste de Epstein.	33
Figura 14. Circuito para chaveamento entre os transdutores de corrente.	35
Figura 15. Princípio de funcionamento do circuito de medição por efeito Hall em malha fechada para transdutor de corrente (LEM, 2001).	37
Figura 16. Diagrama esquemático de ligação entre o transdutor e a placa de aquisição em modo diferencial (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009d).	39
Figura 17. Análise da curva $B-H$	41

Figura 18. Evolução das componentes harmônicas de corrente com o aumento da indução. Sendo (a) as componentes harmônicas em 1,0 T, (b) em 1,5 T e (c) em 1,65T.....	42
Figura 19. Evolução das componentes harmônicas de tensão com o aumento da indução. Sendo (a) as componentes harmônicas em 1,0 T, (b) em 1,5 T e (c) em 1,65 T.....	43
Figura 20. Topologia do sistema e a malha de controle proposta por Batistela (BATISTELA, 2001).	44
Figura 21. Diagrama da topologia de controle para correção de harmônicos.....	45
Figura 22. Comparação da forma de onda de tensão, antes e depois da correção dos harmônicos.	46
Figura 23 – Gráfico de perdas magnéticas realizado a 50 Hz. Sendo (a) o ensaio padrão (referência) e (b) os resultados obtidos.....	47
Figura 24 – Curva de magnetização realizada a 50 Hz e 60 Hz. Sendo (a) o ensaio padrão (referência) e (b) os resultados obtidos.....	48
Figura 25 – Repetibilidade dos ensaios a 50 Hz para amostra M470-65A. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.....	50
Figura 26. Ensaio com e sem tratamento térmico em 50 e 60 Hz, para amostra 1. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.....	56
Figura 27. Ensaio com e sem tratamento térmico em 50 e 60 Hz, para amostra 2. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.....	58
Figura 28. Ensaio para análise de anisotropia da amostra N1. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.	60
Figura 29. Ensaio para análise de anisotropia da amostra N2. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.	62
Figura 30. Ensaio para análise do efeito do envelhecimento da amostra 3. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.....	65
Figura 31. Ensaio para análise de amostras sem tratamento térmico em alta frequência, para amostra 4. Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.....	67
Figura 32. Ensaio para análise de amostras com tratamento térmico em alta frequência, para amostra 4 . Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.	68

Figura 33. Ensaio sequencial para frequências fixas e induções variáveis, na amostra 5. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas específicas.	69
Figura 34. Teste sequencial para induções fixas e frequências variáveis ao longo do ensaio, na amostra 5. Tendo em (a) H versus frequência e em (b) a as perdas específicas versus a frequência.	70
Figura 35. Avaliação da THD ao longo de ensaio sequencial em frequências fixas e induções variáveis, na amostra 5. Sendo apresentadas em (a) a THD de corrente versus H , em (b) a THD de corrente versus B , em (c) a THD de tensão versus H e em (d) a THD de tensão versus B	72
Figura 36. Comparação das perdas magnéticas em ensaio com correção de harmônicos e com correção matemática para amostra 6, sem tratamento térmico. Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.	74
Figura 37. Comparação da forma de onda de tensão, antes e depois da correção dos harmônicos na amostra 6, após o tratamento térmico. Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.	76
Figura 38. Tela do <i>software</i> para acompanhamento de ensaios. Sendo medido na indução de 1,7 T.....	77
Figura 39. Sinal de tensão gerado pela fonte CA. Sendo (a) a leitura do sinal no primário e (b) o sinal no secundário do quadro de Epstein.	78
Figura 40. Sinal de tensão do secundário após o cancelamento de harmônicos.	79
Figura 41. Componentes harmônicas do secundário. Sendo (a) sem cancelamento de harmônicos e (b) após o cancelamento de harmônicos.....	80
Figura 42 – Sentido e direção das forças que atuam em cargas pontuais (SOARES, 2008).	90
Figura 43 – Regra da mão direita, aplicada para detecção da orientação do campo e em função da corrente em um condutor (MUSSOI, 2007).	91
Figura 44 – Elemento Hall e a relação entre a corrente, o campo magnético e a força eletromotriz (CULLITY e GRAHAM, 2009).	93

Figura 45 – Comparação de sinais com diferentes frequência para uma taxa de amostragem de 40 Hz.	95
Figura 46 – Sinal de 1 Hz e as componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem.	97
Figura 47 – Harmônicos e harmônicos defasados de 180°.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da THD de corrente e da THD de tensão com a indução.	44
Tabela 2 – Cálculo de desvio padrão para análise dos resultados a 50 Hz da amostra M470-65A.	52
Tabela 3 – Conjunto de amostras N1 para análise de anisotropia.	59
Tabela 4 – Erro percentual antes a após o envelhecimento na amostra 3.	64
Tabela 5 – Diferença percentual entre ensaios com e sem correção de harmônicas para amostra 6.	75
Tabela 6 – Decomposição do sinal em módulo e fase.	79
Tabela 7 – Sinais detectados após análise harmônica.	98

LISTAS DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ε_0	–	permissividade do vácuo: $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [F/m]
μ	–	permeabilidade do material: $\mu = \mu_r \mu_0$ [H/m]
σ	–	condutividade do condutor [Ω/m^2]
μ_0	–	permeabilidade do vácuo (espaço livre): $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [A/m]
μ_r	–	permeabilidade relativa
ρ_v	–	densidade volumétrica de carga [C/m ³]
Ψ	–	fluxo magnético [Wb]
A	–	seção transversal do corpo de prova [m ²]
$\vec{B}$	–	densidade de fluxo magnético [Wb/m ²] ou [T]
d	–	densidade de massa do material do corpo de prova [kg/m ³]
$\vec{D}$	–	densidade de campo elétrico [C/m ²]
$\vec{E}$	–	vetor intensidade de campo elétrico [N/C]
e_H	–	força eletromotriz [V]
f	–	frequência [Hz]
$\vec{F}$	–	vetor força [N]
FF	–	fator de forma
f_{max}	–	maior frequência presente no sinal [Hz]
f_s	–	frequência de amostragem [Hz]
$\vec{H}$	–	intensidade de campo magnético [A/m]
$\vec{I}$	–	corrente [A]
I_1	–	componente fundamental de corrente [A]
I_n	–	componentes harmônicas de ordem n de corrente [A]
I_p	–	corrente do primário [A]
$\vec{J}$	–	densidade de corrente [A/m ²]
k	–	constante de Coulomb: $k=1/4\pi\varepsilon_0 = 9 \times 10^9$ [m/F]

K_h	–	relação entre as perdas devidas à histerese e as perdas totais
K_p	–	relação entre as perdas de correntes de Foucault e as perdas totais
l	–	comprimento de uma tira do corpo de prova [m]
l_m	–	comprimento efetivo do circuito magnético [m]
m	–	massa total do corpo de prova [kg]
m_a	–	massa efetiva (específica) do corpo de prova [kg]
N_p	–	número de espiras do enrolamento primário
N_s	–	número de espiras do enrolamento secundário
P_c	–	perdas totais do corpo de prova corrigida, para $FF > 1,11 \pm 1\%$ [W]
P_h	–	perdas aparentes por histerese [W]
P_m	–	potência medida pelo wattímetro [W]
P_p	–	perdas aparentes devidas a correntes de Foucault [W]
P_t	–	perdas totais do corpo de prova, para $FF < 1,11 \pm 1\%$ [W]
Q_1, Q_2	–	cargas pontuais [C]
$\hat{R}$	–	vetor unitário (versor) que indica a direção
R	–	distância [m]
R_H	–	constante Hall
R_i	–	resistência equivalente dos instrumentos secundários [Ω]
R_t	–	resistência série do enrolamento secundário do quadro e do indutor de compensação
S	–	área [m ²]
t	–	espessura da chapa [m]
T	–	período [s]
THD_I	–	distorção harmônica total de corrente
THD_U	–	distorção harmônica total de tensão
U_1	–	componente fundamental de tensão [V]
U_n	–	componentes harmônicas de ordem n de tensão [V]
$\overline{U}_S$	–	tensão média no secundário [V]
U_S	–	tensão eficaz no secundário [V]

ABREVIATURAS

ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
GBIP	–	Barramento de comunicação digital IEEE 488.2 (<i>General Purpose Interface Bus</i>)
GNO	–	Grão Não-Orientado
GO	–	Grão Orientado
INMETRO	–	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IEC	–	<i>International Electrotechnical Commission</i>
JIS	–	<i>Japanese Industrial Standard</i>
MAX	–	<i>Measurement and Automation Explore</i>
NBR	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NI	–	<i>National Instruments</i>
nPEE		Núcleo de Processamento de Energia Elétrica
PC	–	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
PCI	–	Interconector de Componentes Periféricos (<i>Peripheral Component Interconnect</i>)
RMS	–	Valor Quadrático Médio (<i>Root Mean Square</i>)
SST	–	Teste de Lâmina Única (<i>Single Sheet Tester</i>)
TA		Taxa de Amostragem
THD	–	Distorção Harmônica Total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USB – Barramento Serial Universal (*Universal Serial Bus*)

Resumo da Dissertação apresentado à UDESC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ANÁLISE E MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS
EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS E COM CORREÇÃO DE HARMÔNICOS**

Ilton Ancelmo Pereira Junior

Fevereiro de 2011

Orientador: Sérgio Haffner, Dr.

Coorientador: Marcello Mezaroba, Dr.

Área de Concentração: Automação de sistemas.

Palavras-chaves: Automação industrial, grandezas magnéticas, instrumentação virtual, LabVIEW, quadro de Epstein.

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a influência da variação da frequência nas propriedades magnéticas dos materiais. Os ensaios são realizados em quadro de Epstein, sendo as medições obtidas através de um sistema de aquisição de dados baseado em PC, o qual é controlado por um *software* desenvolvido em LabVIEW. Como resultados têm-se as curvas de magnetização e de perdas específicas para diversas frequências pré-selecionadas, sendo avaliadas as distorções harmônicas de tensão e de corrente, durante os ensaios. Ao final é apresentada uma metodologia capaz de realizar o cancelamento das harmônicas, geradas pela saturação do aço, através de uma fonte de tensão com ajuste de harmônicos.

Abstract of Dissertation presented to UDESC as a partial fulfillment of requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**ANALYSIS AND MEASUREMENT OF MAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS
AT DIFFERENT FREQUENCIES AND HARMONIC CORRECTION**

Ilton Ancelmo Pereira Junior

2011, February

Advisor: Sérgio Haffner, Dr.

Co-advisor: Marcello Mezaroba, Dr.

Concentration Area: Automation systems.

Keywords: Epstein frame or Epstein square, industrial automation, LabVIEW, magnetic quantities, virtual instruments.

ABSTRACT

This master thesis presents a study on the influence of frequency variation in the magnetic properties of materials. Tests are performed in the Epstein frame, the measurements are being obtained through a data acquisition system PC-based, which is controlled by software developed in LabVIEW. The results are the curves of magnetization and specific losses for various frequencies preset, and evaluated the current and voltage harmonic distortion during the tests. At the end, it's presented a methodology capable of performing the harmonics cancellation, generated by the steel saturation, through a voltage source with adjustable harmonics.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A utilização de materiais magnéticos vem aumentando ao longo dos anos em função do crescimento das economias mundiais. Tais materiais são aplicados principalmente na fabricação de motores e transformadores que por sua vez são utilizados na maioria dos aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos de nosso dia a dia.

De forma geral, todo material utilizado no processo de fabricação (ZEID, 1991; CASAROTTO FILHO, 1999) de produtos implica custos diretos ou indiretos para o consumidor. Desta forma, surge a necessidade de se buscar a redução de custos ao longo desse processo. Isto normalmente ocorre com a utilização de materiais mais baratos, mais eficientes e com a própria redução do tamanho dos equipamentos. Quando se trabalha com materiais magnéticos a realidade continua a mesma, sendo realizados diversos estudos para avaliar e melhorar a qualidade das ligas metálicas.

Na análise de materiais magnéticos, pode-se obter a curva de magnetização do material e as perdas magnéticas pelo teste de Epstein, pelo Toróide (MTHOMBENI e PILLAY, 2004) e através do Teste de Lâmina Única (*Single Sheet Tester*, SST). Embora o SST seja o mais simples operacionalmente (MTHOMBENI e PILLAY, 2004) o teste de Epstein é o mais utilizado na indústria e no meio acadêmico, sendo escolhido para a análise aqui apresentada.

O procedimento para realização do teste de Epstein é padronizado pela norma brasileira NBR 6151 (NBR-6151, 1996) e conduz a resultados equivalentes às principais normas internacionais: norma americana ASTM A343 (ASTM-A343, 1997), japonesa JIS C2550 (JIS-C-2550, 2000) e pela norma IEC 404-2 (IEC404-2, 1996), pois se assemelham no processo e também nos cálculos (MENDES, 2004). Esta metodologia é amplamente utilizada na indústria, sendo normalmente realizados ensaios em frequências padrões (50 Hz e 60 Hz), os quais atendem à maioria das aplicações.

No entanto, há uma necessidade crescente do mercado industrial em analisar as propriedades magnéticas dos materiais em frequências diferentes dos padrões. Isto ocorre devido à existência de diversos equipamentos que operam com frequências diferentes de 60 Hz. Muitas vezes os parâmetros de projeto são estimados, através de fórmulas aproximadas, com base em ensaios realizados nas frequências padrões. Este procedimento aumenta a incerteza dos resultados e dificultam as buscas por melhorias em projetos. As principais aplicações da indústria estão relacionadas ao uso de inversores de frequência no controle dos motores e compressores. Estes equipamentos apresentam melhor eficiência que os convencionais (o pico de corrente de partida dos compressores convencionais é o principal responsável pelo alto consumo de refrigeradores, devido às manobras de liga e desliga, provocando ainda a inserção de harmônicos na rede de energia elétrica), possuindo partida suave, controle de velocidade e garantindo a redução do consumo de energia, pois é capaz de operar em diferentes condições de acordo com a necessidade (ALTUS, 2007; WEG, 2007).

1.2 Revisão Bibliográfica

O aço elétrico ideal para aplicações magnéticas é aquele que pode ser magnetizado em seu maior nível de indução com o menor campo magnético externo e apresentar a menor quantidade de perdas totais. Este é o princípio básico que faz com que os fabricantes de aços gastem milhões em pesquisas.

No Brasil, os aços elétricos são de interesse de dois segmentos econômicos de engenharia forte, a siderurgia e a indústria da eletricidade (LANDGRAF, 2002). Um por cento do volume total de aços produzidos anualmente é utilizado por suas propriedades magnéticas.

Os aços elétricos são utilizados por terem uma qualidade única, não disponível em outros metais, polímeros ou cerâmicas: sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado (LANDGRAF, 2002). Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas tais como motores, geradores e transformadores.

Segundo Landgraf (2002), a história dos aços elétricos no mundo tem seu início juntamente com a história da indústria da eletricidade em 1880. Os aços de grão orientado, por sua vez, foram desenvolvidos em 1934. No Brasil, a Acesita iniciou produção de aço GNO em 1956, pelo processo de laminação a quente de pacotes. Em 1979, iniciou a produção de aço GNO laminado a frio, e, em 1981, a de aço GO, ambos com assistência técnica da Armco. A evolução dos aços GNO, até hoje, tem sido na direção de reduzir as perdas magnéticas.

Tradicionalmente, as perdas magnéticas correspondem ao principal parâmetro de controle desses materiais. A consciência mundial da necessidade de conservar a energia torna o tema das perdas ainda mais relevante (LANDGRAF, 2002). Sendo assim, os principais fabricantes de motores elétricos têm pressionado as siderúrgicas a conseguir aços com melhores desempenhos magnéticos. Para estas aplicações, onde há um aumento na demanda por maior eficiência de energia, de fato, novas classes de aços estão sendo desenvolvidas a cada ano, oferecendo menores perdas magnéticas e maior permeabilidade magnética (CARDOSO, 2005). A maximização da permeabilidade é o desafio internacional do processamento de aços elétricos GNO: a possibilidade de controlar a laminação a frio, recristalização, as inclusões não-metálicas e o crescimento de grão, de maneira a obter uma textura do tipo [100] perpendicular ao plano da chapa.

Apesar da quantidade e qualidade das chapas produzidas, outra dificuldade é a de garantir as especificações das chapas em toda a bobina, dessa forma estes parâmetros são expressados em típicos ou limitantes (de forma a garantir que não ultrapasse determinado valor) como: máxima perda específica (em 1 T e 1,5 T), mínima indução magnética (para campo magnético de 2500, 5000 e 10000 Ae/m), e em frequências de 50 e 60 Hz, sendo variável de acordo com a espessura e direção de laminação. Devido ao grande número de variáveis, torna-se necessário, a constante aferição das bobinas adquiridas pelos fabricantes de motores. Para isso, faz-se o uso de um sistema de medição com quadro de Epstein, sendo importante para fiscalizar as amostras de aços compradas ou vendidas e também no desenvolvimento de novas ligas e análise de tratamentos inerentes a amostra.

Muitas pesquisas mostram que os equipamentos utilizados no processo de medição das propriedades magnéticas dos materiais como o MPG100D, da BROCKHAUS, utilizado pelo laboratório de magnetismo do INMETRO como instrumento de aferição de amostras padrões para indústria (FUKUHARA, YONAMINE e MISSELL, 2006), pode ser substituído por uma instrumentação de custo inferior e muito mais flexível para atender as necessidades da indústria e pesquisadores (KOPRIVICA, MILOVANOVIĆ e DJEKIĆ, 2009). A este método de medição, utilizando computador (PC) e placa de aquisição de dados, chama-se instrumentação virtual (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009a). Nesta solução os dados são processados e armazenados no PC, sendo necessário o uso de um programa feito em LabVIEW (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009b), desenvolvido para atender a necessidades do projeto.

Apesar de ambas as soluções apresentarem resultados equivalentes na faixa de interesse, a pesquisa ficou limitada a uma pequena faixa de tensão (de 0 a 10 V), devido aos limites da placa de aquisição de dados (KOPRIVICA, MILOVANOVIĆ e DJEKIĆ, 2009). Mesmo com tais limitações, foram apresentados laços de histerese na faixa de 1,5 T obtidas em amostra toroidal. Para que esta tecnologia possa ser aplicada em testes com quadro de Epstein faz-se necessário a utilização de transdutores para proteger a placa de aquisição e possibilitar uma maior faixa de operação.

Outra solução interessante pode ser obtida através da utilização de um osciloscópio, sendo um canal utilizado para leitura de corrente e outro para leitura de tensão. A solução proposta por Batistela (2001), utiliza um osciloscópio (Tektronix 2430A – 150 MHz) realizando a transferência dos dados para um PC através de comunicação GPIB. Apesar dos dados serem armazenados e processados no computador, o custo de osciloscópio é muito maior que o da placa de aquisição (NI USB-6009) utilizada por Koprivica, Milovanović e Djekić (2009), mesmo esta possuindo uma resolução de 14 bits comparada a apenas 8 bits do osciloscópio. Tendo também como vantagens uma taxa de aquisição maior e a velocidade do processo de medição, pois independe de um protocolo de comunicação para transferência de uma grande quantidade de dados.

Sabe-se que durante a saturação do aço, provocado pelo aumento da indução, ocorre a distorção da forma de onda de tensão no secundário. Isto acontece a partir do joelho da curva de magnetização. Dessa forma, o fluxo nas amostras deixa de ser puramente senoidal devido à presença de harmônicos. A norma NBR 6151 recomenda a correção dos harmônicos, quando possível. O estudo apresentado por Batistela (BATISTELA, 2001) contempla a correção de harmônicos, realizado através do projeto de inversor de tensão com filtro, incluindo uma malha de realimentação. Apesar das vantagens do projeto proposto, o mesmo não está disponível comercialmente, sendo de difícil implementação e requerendo um conhecimento avançado de técnicas de controle e eletrônica. Outro ponto observado foi o porquê de não utilizar a própria placa de aquisição de dados que faz parte da malha de realimentação para fazer a aquisição dos sinais de tensão e corrente lida pelo osciloscópio.

1.3 Proposta da Dissertação

Merece destaque a multidisciplinaridade da área de “Materiais Magnéticos” que para o entendimento dos diversos fenômenos existentes, requer o conhecimento de diversas áreas como: Engenharia de Materiais, Metalúrgica, Elétrica, Mecânica, Química e a própria Física. Em outras palavras, os problemas que surgem na área de “Materiais Magnéticos” exigem, para sua compreensão, conceitos de todas essas especialidades.

Neste trabalho, busca-se estudar as propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado, analisando a anisotropia do material, os efeitos do tratamento térmico, a variação das propriedades magnéticas com a frequência e o efeito da inserção de harmônicos no material devido à saturação. Além disto, é proposto um método para efetuar o cancelamento de harmônicas indesejadas em um sistema baseado no quadro de Epstein.

As medições serão realizadas empregando o teste de Epstein, como no trabalho desenvolvido por Batistela (2001), mas diferindo na instrumentação, na fonte de alimentação e na realimentação do sistema. O sistema desenvolvido emprega transdutores como Batistela (2001), mas utiliza uma placa de aquisição de dados, como no trabalho de (KOPRIVICA, MILOVANOVIĆ e DJEKIĆ, 2009), porém aplicado ao quadro de Epstein e não a uma amostra toroidal.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma metodologia simples para avaliar as características magnéticas dos materiais, que utiliza equipamentos comerciais e se baseia na utilização de uma fonte com variação em amplitude, em frequência e com ajuste de harmônicos. Os sinais são adquiridos, processados por uma placa de aquisição de dados localizada em um PC e realimentados através da comunicação com a fonte de tensão (ver Figura 1). Este controle é feito através de um software desenvolvido em LabVIEW feito de forma específica para atender esta aplicação. O sistema tem como referência uma amplitude de tensão e uma frequência a serem seguidas. Quando existe a presença de harmônicos é realizado um processo de cancelamento, por intermédio de ajustes na fonte de alimentação.

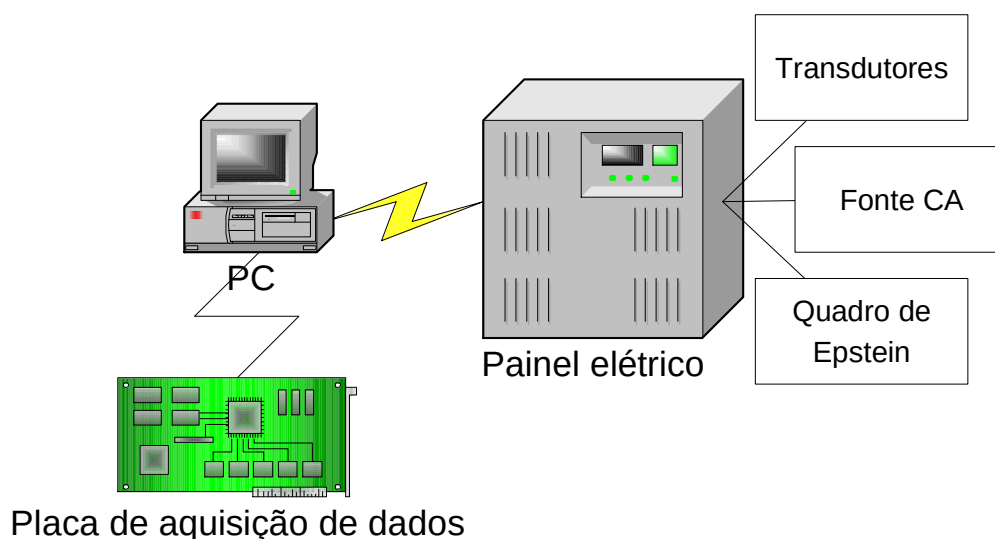


Figura 1 – Sistema para teste de Epstein.

1.4 Motivação da Dissertação

Os principais fatores de motivação são:

- garantir a repetibilidade e reduzir a incerteza dos resultados;
- minimizar erros operacionais;
- reduzir o tempo necessário para realização do ensaio;
- realizar ensaios em diferentes faixas de frequências;
- possibilitar a realização automática de relatórios do ensaio;
- utilizar equipamentos comerciais para automatizar o processo;
- analisar a influência do cancelamento de harmônicos nos resultados.

1.1 Organização da Dissertação

Esta dissertação é constituída de seis capítulos, com o objetivo de apresentar o estudo, os procedimentos e os resultados obtidos.

No capítulo 1, se apresenta uma breve explanação sobre o tema, mostrando estudos de outros autores, os objetivos deste trabalho como análise em frequência e correção de harmônicos e a motivação para o estudo. No capítulo 2, dando continuidade ao estudo, verifica-se que os materiais magnéticos possuem uma série de características importantes, que são discutidas e detalhadas ao longo do trabalho. Dessa forma, é possível diferenciar materiais e escolher o material mais adequado para sua aplicação.

A finalidade do capítulo 3 é apresentar o quadro de Epstein e os procedimentos para realização dos ensaios. De forma comparativa é apresentado um resumo das etapas de ensaio da norma NBR-6151. Os capítulos antecessores servem de base para os demais capítulos, sendo discutida no capítulo 4 a forma como o sistema foi elaborado e validado, por intermédio de um ensaio comparativo com outro sistema.

Através de vários gráficos são apresentados e discutidos no capítulo 5 diversos resultados obtidos ao longo deste trabalho, tais como: anisotropia do material, tratamento térmico, variação da indução com a frequência e o cancelamento de harmônicos. Analisa-se também o comportamento das componentes harmônicas e a distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*, THD) das formas de onda de tensão e corrente ao longo dos ensaios, sendo as informações sobre o cálculo e a definição de THD apresentados no ANEXO A. Por fim, no capítulo 6, têm-se os comentários finais, no qual são discutidas as contribuições deste trabalho.

1.2 Publicação Relacionada ao Desenvolvimento da Dissertação

Durante a realização desta pesquisa, foi submetido e publicado o respectivo artigo (ver ANEXO B):

- Ilton A. Pereira Jr.; Marcelo Mezaroba; Sérgio Haffner e Luís Alberto Pereira. “Análise e medição de propriedades magnéticas dos materiais em diferentes frequências e com correção de harmônicos”. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2010*, 2010, Bonito, MS. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2010, 2010. v. 1. p. 2152-2159.

1.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma breve explanação sobre o tema, mostrando sua importância em diversas pesquisas no meio acadêmico, refletindo as necessidades do setor industrial na busca por melhorias em seus produtos. O tema em questão justifica-se pela grande parcela de aços de GNO os quais são utilizadas em motores elétricos de pequeno porte, tendo como o consumo e a eficiência, grandezas fundamentais para sua inserção no mercado tanto em nível nacional quanto internacional.

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações, referentes às características, propriedades e classificação dos materiais magnéticos.

2.1 Propriedades eletromagnéticas dos materiais

Quando se aplica um campo magnético $\vec{B}$ a um material, tem-se a soma de dois efeitos, a intensidade de campo magnético $\vec{H}$, produzido pelas correntes de excitação que circulam pelas N espiras, e o efeito da magnetização do material $\vec{M}$ (efeito da polarização eletrônica no interior do material associada ao spin dos elétrons), de acordo com a equação (2.1) (BATISTELA, 2001; SADIKU, 2004; PAUL, 2006; SANTOS, 2005):

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \left(1 + \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \right) \vec{H} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (2.1)$$

onde,

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (2.2)$$

e

$$x_m = \frac{\vec{M}}{\vec{H}}, \quad (2.3)$$

resultando em:

$$\mu = \mu_0 + \mu_0 x_m = \mu_0 (1 + x_m). \quad (2.4)$$

A suscetibilidade magnética x_m de um material é a sua capacidade de “ampliar” o número das linhas de fluxo que passam por ele, dependendo da possibilidade e capacidade de número de *spins* se alinharem. A relação entre intensidade de campo magnético $\vec{H}$ e magnetização $\vec{M}$ é, então, a suscetibilidade magnética do material, dada pela equação (2.3). Obviamente, para o vácuo a susceptibilidade x_m é nula ($x_m = 0$) e a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$) diz como se distribui quantitativamente as linhas de fluxo magnético ao atravessarem uma superfície no vácuo. A permeabilidade de um material μ é dada pela soma dos efeitos da distribuição do fluxo magnético no vácuo e da susceptibilidade magnética do material, conforme a relação (2.4) (o modelo físico da composição das substâncias no espaço atômico supõe que os materiais são compostos por vácuo e elementos subatômicos), sendo a permeabilidade relativa ao vácuo de um material μ_r é dada pela equação (2.2).

Em geral, pode-se usar a permeabilidade relativa μ_r para classificar os materiais em termos de suas propriedades magnéticas ou de seu comportamento magnético. Um material é dito não-magnético se $\mu_r = 1$ ou $\mu_r \approx 1$, sendo magnético quando do contrário (SADIKU, 2004).

Os materiais magnéticos podem ser agrupados em três categorias principais: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (SINNECKER, 2000; SADIKU, 2004). Um material é dito diamagnético, se tiver $\mu_r < 1$, é paramagnético se tiver $\mu_r > 1$ e se $\mu_r \gg 1$, é ferromagnético. Materiais ferromagnéticos são sempre não lineares, exceto quando a temperatura de operação está acima da temperatura Curie e fazendo com que estes percam suas propriedades ferromagnéticas.

O diamagnetismo ocorre em materiais em que os campos magnéticos, devido aos movimentos de translação dos elétrons em torno do núcleo e de rotação dos elétrons em torno de seus próprios eixos, se cancelam mutuamente. Desse modo, o momento magnético de cada átomo é zero, e os materiais são fracamente afetados pelo campo magnético.

No paramagnetismo não existe o cancelamento completo, como nos materiais diamagnéticos, sendo dependente da temperatura, ao contrário dos diamagnéticos.

O ferromagnetismo ocorre em materiais para os quais os átomos têm momento magnético permanente relativamente grande. Além disto, possuem a capacidade de serem magnetizados fortemente por um campo magnético, mantendo um grau considerável de magnetização, quando retirados do campo.

Nos materiais ferromagnéticos, a curva de desmagnetização não é igual à de magnetização. Esse fenômeno é denominado histerese e pode ser visto no gráfico representado pela Figura 2. Nesse gráfico, o eixo horizontal indica a intensidade de campo magnético produzida por um solenóide com núcleo do material ferromagnético.

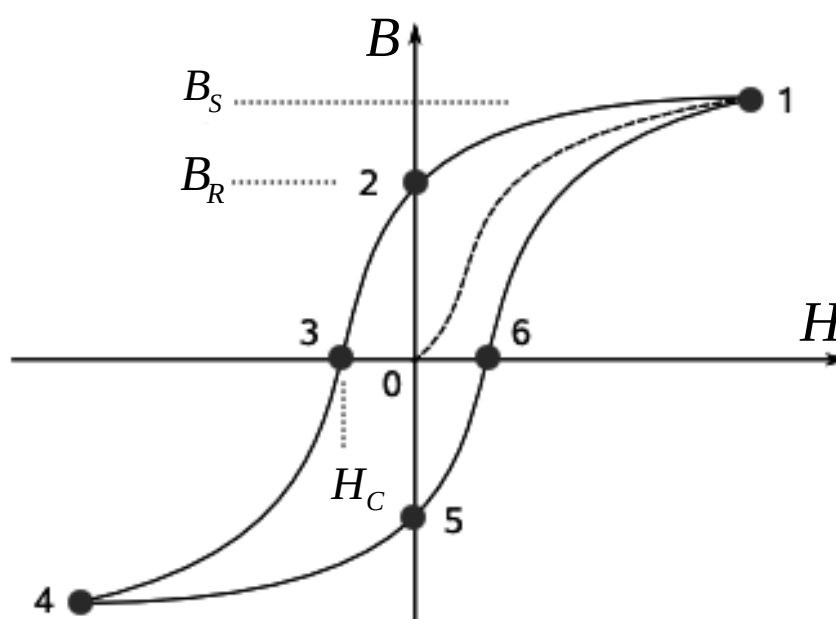


Figura 2 – Curva B - H (SOARES, 2008).

Importante lembrar que B é a parcela devida apenas à corrente elétrica, sendo o eixo vertical a indução magnética no núcleo, que inclui a magnetização do material (KRAUSE e WASYNEZUK, 1989).

Tendo um material desmagnetizado, o aumento progressivo (a partir do zero) da indução até o valor de saturação produz a curva inicial 0-1. Se o valor de H é reduzido até zero, o caminho é a curva 1-2, diferente da inicial.

Nenhuma corrente de magnetização ($H = 0$) esta presente no ponto 2, e o valor de B não é nulo, significando uma magnetização residual B_R (ímã permanente), conhecida também como remanência. Para anular a magnetização residual, é necessário um valor negativo de intensidade (ponto 3) H_C , que é usualmente denominado campo coercitivo ou força coercitiva (SOARES, 2008; SANTOS, 2005; KRAUSE e WASYNEZUK, 1989).

Aumentando o valor negativo de H , chega-se ao ponto de saturação 4, de sentido inverso ao 1 anterior, sendo o caminho de retorno até o ponto 1 inicial, dado pela curva 4-5-6-1, com B_R e H_C de sinais contrários aos sinais dos anteriores (KRAUSE e WASYNEZUK, 1989).

No aspecto termodinâmico, pode-se dizer que a histerese representa as irreversibilidades do processo de magnetização e desmagnetização do material, no qual a área interna da curva 1-2-3-4-5-6-1 é proporcional à energia dissipada sob forma de calor (KRAUSE e WASYNEZUK, 1989).

Para diferentes correntes aplicadas a uma amostra, surgem diferentes ciclos de histerese correspondentes. O aumento da área de cada ciclo representa o aumento das perdas magnéticas, e os picos de cada laço de histerese quando unidos (pontos “a”, “f” e “g” da Figura 3) formam a linha tracejada denominada de curva de magnetização do material (SANTOS, 2005).

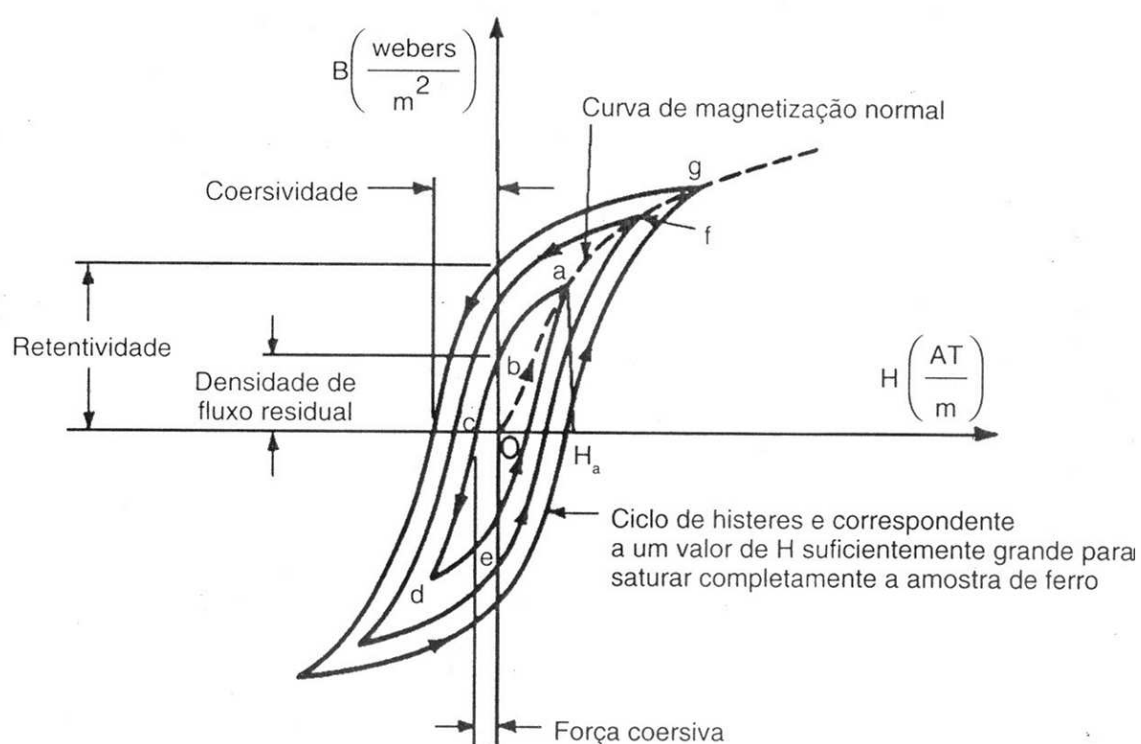


Figura 3 – Curva de magnetização (SANTOS, 2005).

As proporções da curva de histerese dependem da composição do material magnético e têm influência na aplicação. Uma curva estreita como (a) da Figura 4 é adequada para, por exemplo, núcleos de transformadores, onde se requer a menor perda possível de energia devido à histerese do material (naturalmente, um núcleo ideal para transformador teria histerese nula e a curva B - H seria uma simples reta).

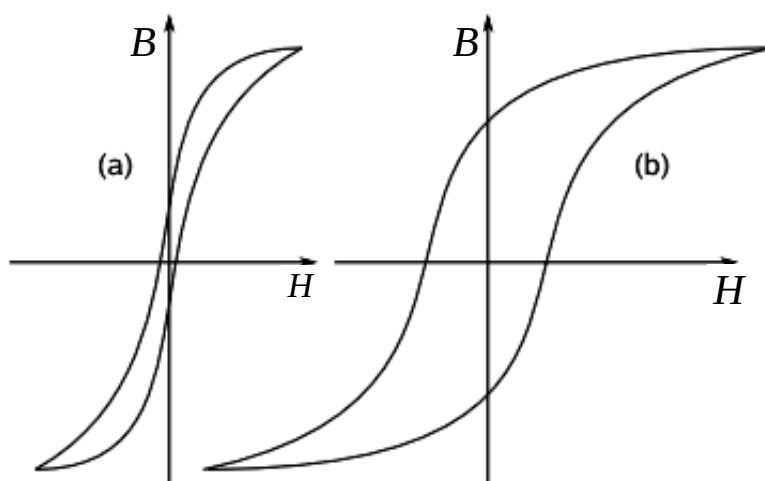


Figura 4 – Variação na histerese para diferentes materiais (SOARES, 2008).

Uma curva mais larga como em (b) (Figura 4) é apropriada para ímãs permanentes devido à elevada magnetização residual e ao também elevado campo coercitivo, significando que ele não pode ser facilmente desmagnetizado.

A Figura 5 mostra curvas de magnetização para alguns materiais ferrosos. Notar que o aço-silício oferece uma elevada permeabilidade e sugere uma curva de histerese estreita conforme já visto na Figura 4 (a). Sendo o material básico utilizado no projeto de motores e núcleos de transformadores comuns.

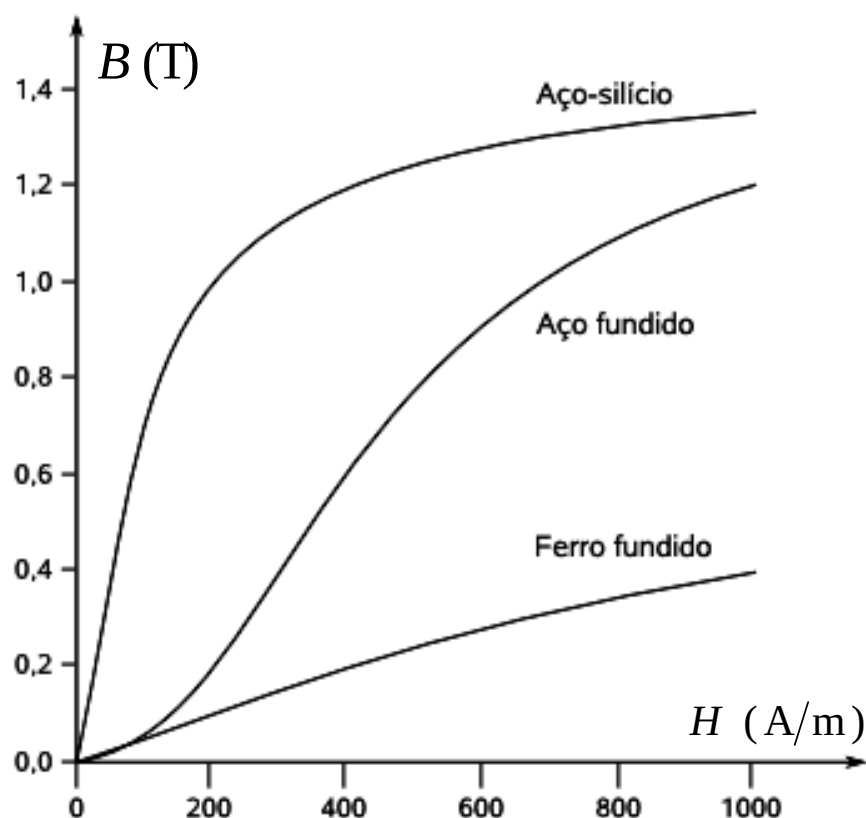


Figura 5 – Comparação entre curvas B - H de diferentes materiais (SOARES, 2008).

2.2 Materiais ferromagnéticos duros e moles

Os materiais ferromagnéticos possuem uma característica marcante que é conhecida como magnetização espontânea, ou seja, eles apresentam uma magnetização não nula, mesmo na ausência de campo externo aplicado. Em geral podemos classificá-los em dois grupos: materiais ferromagnéticos duros (ímãs) e materiais ferromagnéticos moles ou doces. Geralmente esta classificação está associada à resposta magnética do material a um campo aplicado.

Uma das propriedades que é utilizada para separar dois tipos de ferromagnetismo é a coercividade, ou seja, o campo necessário para levar a magnetização do material à zero. Embora não exista uma linha divisória definida de maneira clara, assume-se que materiais ferromagnéticos que possuem uma coercividade alta são denominados duros (coercividade maior que 10^4 A/m); aqueles que possuem coercividade baixa são denominados moles ou doces (coercividade menor que 500 A/m) (SINNECKER, 2000).

A grande maioria dos materiais magnéticos é utilizada em aplicações tais como núcleos de transformadores, motores, geradores, etc. Para tais aplicações é desejável que um material tenha:

- alta magnetização de saturação;
- baixa coercividade;
- alta permeabilidade inicial;
- baixas perdas energéticas por histerese.

Estas em geral são as características típicas desejadas de um material ferromagnético doce (SINNECKER, 2000). Em função da larga aplicação são de grande importância para indústria.

2.3 Materiais lineares e não-lineares

Os materiais que apresentam uma característica linear são constituídos pelos materiais que possuem uma relação entre B e H linear, ou seja, uma reta. Este grupo é constituído pelos materiais diamagnéticos e paramagnéticos.

Os materiais que não possuem características lineares são chamados de não lineares e são do tipo ferromagnéticos.

2.4 Materiais homogêneos e não-homogêneos

Um material é considerado homogêneo quando apresenta aspecto uniforme ao ser examinado em microscópio óptico ou ultramicroscópio e, quando subdividido, as amostras obtidas se apresentam uniformes em relação às suas propriedades.

Em materiais não-homogêneos, também conhecidos como heterogêneos, a mistura não tem aspecto uniforme, mesmo quando só é perceptível ao ser examinada pelo ultramicroscópio.

O levantamento das curvas de magnetização para as três direções indicadas acima, mostra que a saturação para a direção [100] ocorre com uma intensidade de campo magnético reduzida, enquanto que para as direções [110] e [111] é necessária maior intensidade de campo para atingir a saturação, ou seja, a forte ligação existente entre a estrutura cristalina e os efeitos da magnetização provoca resultados de diferentes valores para cada direção, como se observa na Figura 7, as três curvas de magnetização em um mesmo tipo de material (Fe - Ferro) (SANTOS, 2005). Sendo importante frisar que a direção de “fácil” magnetização de um cristal é o sentido da magnetização espontânea dos domínios no estado desmagnetizado.

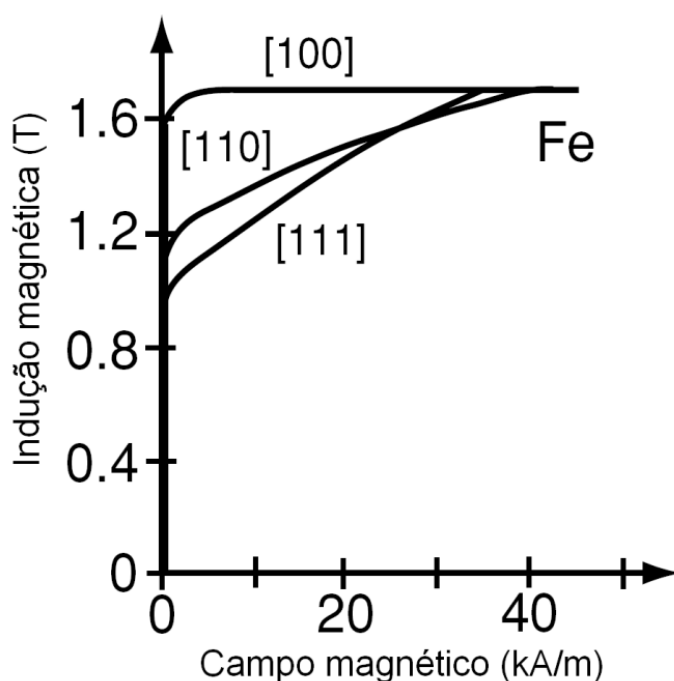


Figura 7 – Curva de magnetização em diferentes direções de laminação (SANTOS, 2005; CULLITY e GRAHAM, 2009).

No material isotrópico as suas propriedades magnéticas não dependem da direção considerada, ou seja, são iguais em todas as direções. Em materiais não-isotrópicos, também chamados de anisotrópicos, existe uma dependência das propriedades magnéticas com a direção considerada.

2.6 Materiais de grão orientado (GO) e grão não-orientado (GNO)

Os aços de grão orientado são desenvolvidos para obter boas propriedades magnéticas na direção da laminação, ou seja, baixas perdas magnéticas e uma alta permeabilidade, características necessárias para conseguir uma maior economia de energia. Estes aços são utilizados principalmente na construção de núcleos de transformadores, grandes motores e medidores de energia (LANDGRAF, 2002).

A maior utilização é em transformadores de alta e média potência, onde a montagem do circuito magnético é realizada em etapas, dessa forma é possível realizar o alinhamento das linhas de fluxo magnético conforme a direção de laminação das chapas. Nesse processo, é importante que a condição de anisotropia se faça presente, pois dessa forma o valor das perdas magnéticas decresce acentuadamente (SANTOS, 2005).

Os principais tipos de aço silício GO produzidos são (SANTOS, 2005):

- aço GO regular: utiliza a técnica de Goss (é a combinação do plano diagonal da estrutura cristalina cúbica do ferro com a direção de laminação) e apresenta baixas perdas e permeabilidade magnética relativa máxima em torno de 1800;
- aço GO de alta indução: é produzido através de tecnologia desenvolvida pelas empresas Nippon e Kawasaki Steel. As perdas são menores que nos aço GO regular e a permeabilidade relativa máxima chega a 1900;
- aço GO com refino de domínios magnéticos: produzido a partir do aço GO de alta indução, realizando um refino dos domínios magnéticos por laser, diminuindo as perdas e aumentando a permeabilidade magnética.

Os aços de grão não orientado são utilizados na fabricação de núcleos de motores, reatores e geradores de energia elétrica. Caracterizam-se por apresentar baixas perdas magnéticas, fator essencial para a conservação de energia e para a vida útil dos equipamentos elétricos. A adição de silício ao ferro modifica profundamente as mudanças de fase. Uma vez que o conteúdo de carbono é muito pequeno, atualmente estas ligas são conhecidas como ferro-silício. A adição de silício ao ferro resulta nos seguintes efeitos sobre as propriedades físicas (BENEVIDES, 2006):

- a resistividade elétrica aumenta, causando uma redução nas correntes parasitas;

- a anisotropia cristalina diminui, causando um aumento na permeabilidade;
- diminui a indução de saturação.

Diferente das aplicações em transformadores, onde o fluxo magnético tem uma direção de orientação, nos motores de indução, as linhas de fluxo magnético apesar de serem paralelas à superfície da chapa, não seguem uma única direção, havendo a necessidade de alguns cuidados com relação a textura cristalográfica (SANTOS, 2005). Nesta situação, a isotropia das propriedades do material no plano da chapa tem que ser buscada para responder a esse percurso característico do fluxo magnético.

Os aços GNO são classificados em função das perdas magnéticas em:

- aço de alto rendimento, com perdas por volta de 1,0 W/kg;
- aço de médio rendimento, com perdas magnéticas em torno de 2,0 W/kg;
- aço de baixo rendimento, com perdas magnéticas ao redor de 4,0 W/kg.

Se for estabelecida como referência a intensidade do campo magnético atingem-se maiores valores de densidade de fluxo magnético nos aços de grão orientado, seguidos pelos de grão não orientado e pelos de baixo carbono (SANTOS, 2005).

2.7 Tratamento Térmico

Após os diversos processos de fabricação do aço, o material recebe em sua etapa final de produção o tratamento térmico, conhecido como aço totalmente processado, enquanto que o aço que não recebe este tratamento é denominado como aço semiprocessado, sendo o tratamento térmico realizado normalmente pelo fabricante de máquinas elétricas. No caso específico de aços semiprocessados utilizados para fins elétricos, este tratamento térmico chama-se recozimento final, etapa fundamental para a melhoria das propriedades magnéticas (CARDOSO, 2005). O recozimento reduz as perdas magnéticas pela metade e aumenta a permeabilidade de 100 a 300 % (MEURER, 2005; CARDOSO, 2005), pois durante este processo ocorre:

- redução do teor de carbono, devido a atmosfera oxidante;
- alívio das tensões (introduzidas pelo corte);
- recristalização;
- crescimento de grão;
- formação da camada superficial dielétrica.

Os aços totalmente processados já receberam o tratamento térmico na fábrica, e o recozimento pelo consumidor final é opcional. Como as propriedades magnéticas do aço são afetadas por tensões mecânicas introduzidas durante a operação de corte e puncionamento, recomenda-se um tratamento térmico para o alívio de tensões. O recozimento dos aços é realizado após o processo de estampagem, justamente para aliviar as tensões introduzidas pelo processo de corte.

O estudo realizado por MEURER (MEURER, 2005), apresenta a comparação entre um ensaio realizado com lâminas de aço ao silício semiprocessadas, com e sem o tratamento térmico, nos quais foram medidas as perdas magnéticas, separando-as em perdas por histerese e perda dinâmica. Verifica-se que, como o tratamento térmico apenas modifica a estrutura dos grãos magnéticos, somente a perda por histerese é modificada. A parcela das perdas dinâmicas permanece inalterada, como é apresentado na Figura 8. Observa-se que a perda por histerese sofre uma grande diminuição com o tratamento térmico, enquanto que a perda dinâmica não sofre alterações significativas.

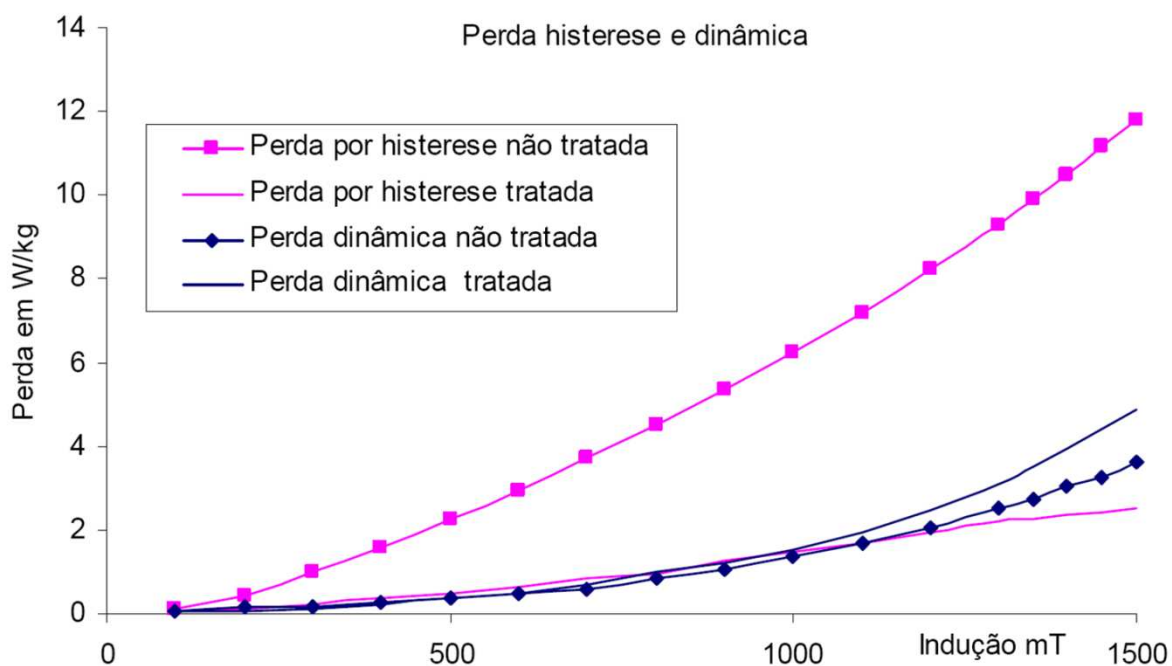


Figura 8 – Perdas magnéticas por histerese e dinâmicas, em lâminas com e sem tratamento térmico (MEURER, 2005).

Uma comparação entre a curva $B-H$ de ambas as lâminas pode ser observada na Figura 9. O tratamento térmico reduziu a área do laço (consequência da diminuição das perdas), diminuindo também o valor do campo máximo necessário para o material chegar na indução de 1,5 T. O laço $B-H$ da lâmina não tratada apresenta uma perda magnética muito maior que a lâmina tratada, na ordem de 109%.

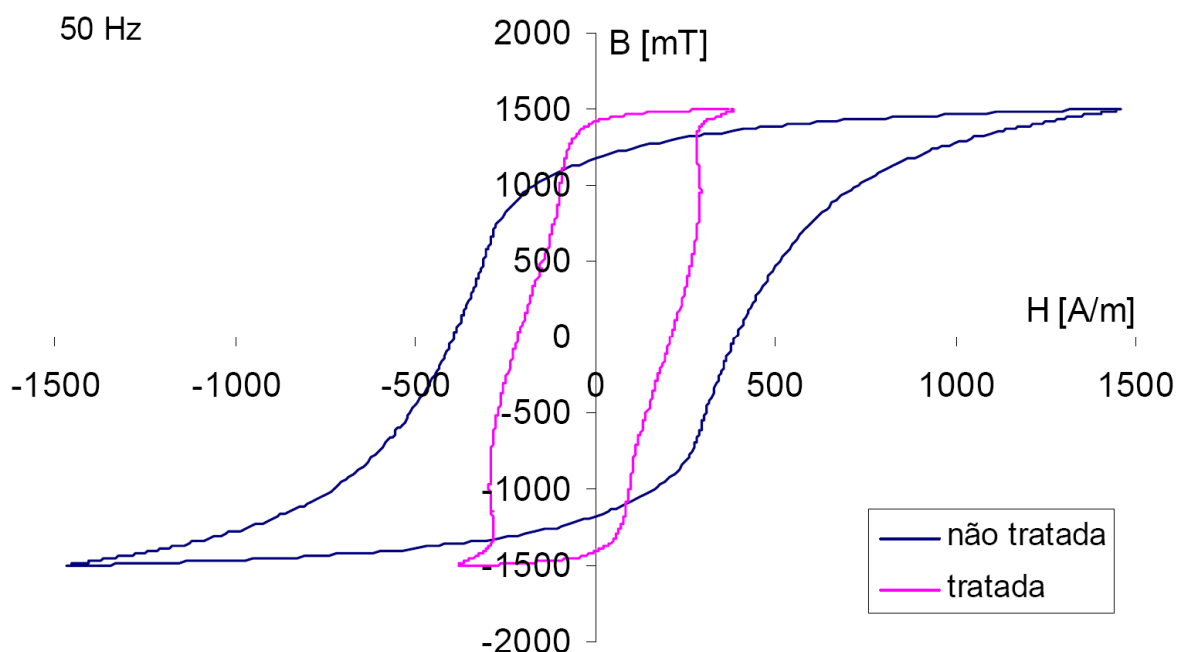


Figura 9 – Laço $B-H$ das medidas realizadas em lâminas com e sem tratamento térmico a 50 Hz (MEURER, 2005).

2.8 Considerações Finais

Neste capítulo foram revisados conceitos e procedimentos importantes para o processo de fabricação de aços elétricos. Muitos desses conceitos utilizados para identificar e diferenciar os diversos tipos de materiais. Dessa forma fica justificado o porquê da realização de tratamento térmico nas amostras, cujo principal função é melhorar as propriedades magnéticas aumentando a permeabilidade do material.

Outro ponto relevante está associado à anisotropia dos aços de GNO, fenômeno que leva a realização de diversos ensaios com amostras com cortes diferentes como: 100% longitudinais, 100% transversais, 50% longitudinais 50% transversais e até diagonais. Tais testes são fundamentais para se ter um mapeamento das características magnéticas em todas as regiões de interesse.

CAPÍTULO 3 – MÉTODOS E NORMAS DE MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

A estimativa das características de magnetização dos materiais e obtenção das perdas magnéticas pode ser realizada através do teste de Epstein, procedimento padronizado pela norma brasileira NBR-6151 (1996). Neste capítulo são descritos o quadro de Epstein e o procedimento de ensaio.

3.1 O quadro de Epstein

O quadro de Epstein assemelha-se a um transformador constituído por dois enrolamentos: primário e secundário. As amostras de teste formam o núcleo magnético do transformador. O quadro de Epstein apresenta ainda um “indutor mútuo” para compensar o fluxo disperso no interior das bobinas, localizado no centro do espaço formado pelos enrolamentos.

Os enrolamentos apresentam um total de 700 espiras e são recomendados para teste num intervalo de frequência de 25 a 400 Hz. Excita-se o enrolamento primário e mede-se a tensão secundária. O comprimento efetivo para o caminho magnético é adotado convencionalmente como 0,94 m, para o quadro de 25 cm (NBR-6151, 1996). A Figura 10 apresenta o quadro de Epstein, fabricado pela empresa Yokogawa, utilizado durante os ensaios.

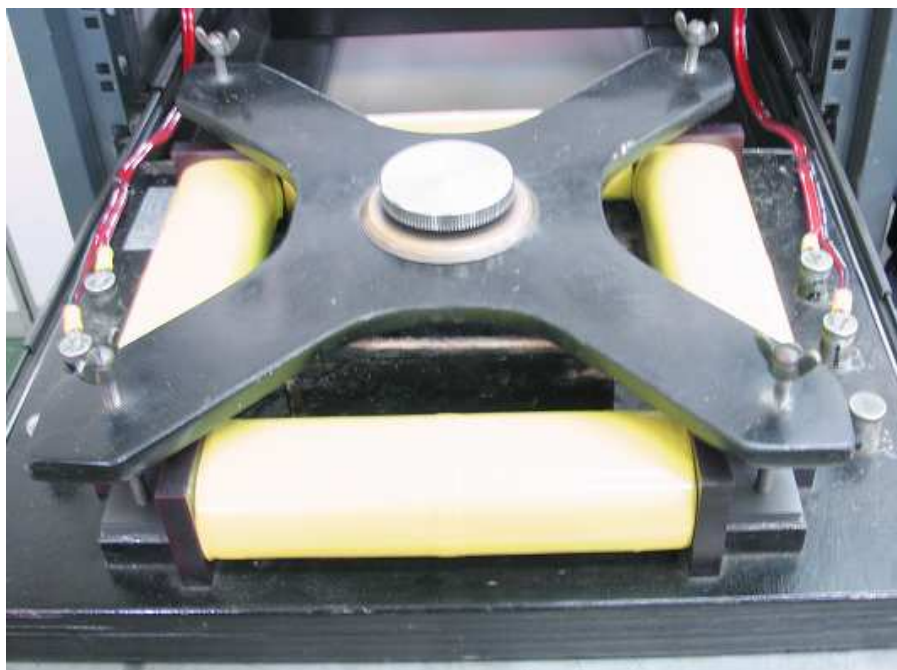


Figura 10. Quadro de Epstein.

3.2 Procedimento para o ensaio

Inicialmente, mede-se a massa da amostra com exatidão de $\pm 0,1$ % através de uma balança de precisão. Em seguida inserem-se as lâminas no quadro de Epstein formando juntas duplamente sobrepostas nos cantos (Figura 11).

Se metade das lâminas for cortada na direção da laminação e as restantes perpendiculares a esta direção, inserem-se as primeiras em dois braços paralelos do quadro de Epstein e as últimas nos braços restantes. É necessário que os braços tenham o mesmo número de lâminas (NBR-6151, 1996; MENDES, 2004).

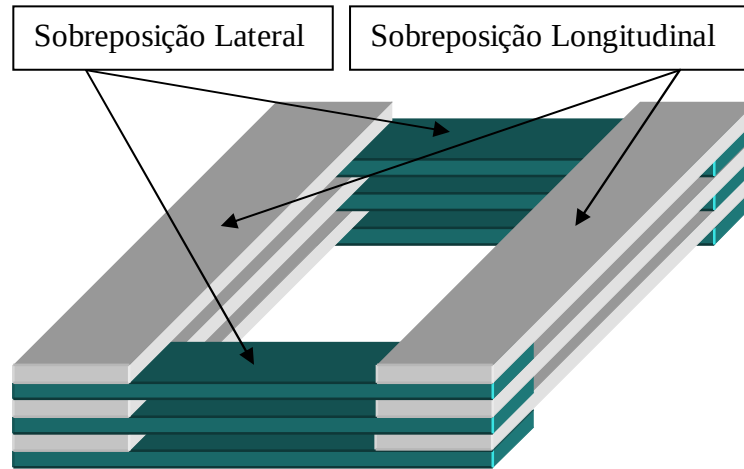


Figura 11. Posicionamento das lâminas no interior do quadro de Epstein.

A fonte de tensão é ajustada de tal modo que o valor de tensão eficaz no secundário esteja de acordo com a equação (3.1), a qual é deduzida a partir da Lei de Faraday. Assim, a amplitude da indução desejada (ou valor de crista de indução) (MENDES, 2004) pode ser obtida pela aplicação da seguinte expressão:

$$U_s = 4,44fN_sAB, \quad (3.1)$$

sendo U_s a tensão eficaz medida no secundário do quadro de Epstein; f a frequência; N_s o número de espiras do secundário; A a área da secção transversal do corpo de prova, B a indução magnética e o fator 4,44 está relacionado com o valor RMS da tensão senoidal.

O comprimento efetivo para o caminho magnético é adotado convencionalmente como $l_m = 0,94 m$, para o quadro de 25 cm. Existem quadros de diferentes tamanhos, como por exemplo de 50 cm, porém nesse trabalho será considerado o quadro de 25 cm. A massa efetiva do corpo de prova é dada por:

$$m_a = \frac{l_m m}{4l}. \quad (3.2)$$

Através da massa medida calcula-se também a área da seção transversal do corpo de prova, dado pela equação (3.3).

$$A = \frac{m}{4ld}. \quad (3.3)$$

Para se obter a curva B - H (SADIKU, 2004; PAUL, 2006) é necessário o valor instantâneo da indução magnética, dado por:

$$B(t) = \frac{-1}{N_s A} \int U_s(t) dt, \quad (3.4)$$

e o valor instantâneo do campo magnético, originado da aplicação da lei de Ampère,

$$H(t) = \frac{-N_2 I(t)}{l}, \quad (3.5)$$

onde $I(t)$ é a corrente instantânea do primário, $U_s(t)$ a tensão instantânea do secundário e l é o comprimento do caminho magnético.

Após ajustada a tensão no secundário, mede-se a tensão no secundário e a corrente no primário. Estes valores são utilizados para o cálculo da tensão eficaz, tensão média, potência, corrente de pico, perdas magnéticas e a permeabilidade (NBR-6151, 1996). Outra relação importante é a razão entre a tensão eficaz e tensão média (válido para sinal senoidal retificada em onda completa), conhecido como fator de forma (FF), parâmetro utilizado na correção das perdas devido à inserção de harmônicos (NBR-6151, 1996), como mostra a equação (3.6):

$$FF = \frac{U_s}{\bar{U}_s}, \quad (3.6)$$

onde $\bar{U}_s$ é a tensão média medida no secundário.

Recomenda-se manter o fator de forma da tensão secundária na faixa de $1,11 \pm 1\%$, este controle pode ser realizado através de sistemas eletrônicos de realimentação. Se não for possível, realizam-se correções nos valores medidos de perda magnética para considerar um desvio do fator de forma até 10 %.

Admite-se que a perda por histerese (P_h) não depende do fator de forma se a amplitude da indução magnética for mantida no valor esperado. A perda por correntes de Foucault (P_p) depende do valor eficaz da tensão, logo, depende do fator de forma. Dessa forma, a perda magnética total (P_t), com $FF < 1,11 \pm 1\%$, pode ser representada pela equação (3.7):

$$P_t = P_h + P_p \left(\frac{FF}{1,1107} \right)^2 = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1,1107 \bar{U}_2)^2}{R_i + R_t}, \quad (3.7)$$

onde P_m é a potência medida pelo wattímetro.

As perdas magnéticas corrigidas (P_c), quando $FF > 1,11 \pm 1 \%$, do material são dadas por:

$$P_c = \frac{P_t}{K_h + K_p \left(\frac{FF}{1,1107} \right)^2}, \quad (3.8)$$

sendo P_t as perdas totais, calculadas a partir dos valores medidos de corrente no primário e tensão no secundário, K_h e K_p são coeficientes obtidos no processo de separação das perdas totais em histerésicas e Foucault (NBR-6151, 1996) e 1,1107 corresponde ao fator de forma de uma função senoidal. As perdas específicas (perdas magnéticas) são obtidas dividindo-se a perdas totais da expressão (3.8) pela massa efetiva da amostra (equação (3.2)) (NBR-6151, 1996).

3.2.1 Separação das perdas em histerésicas e de Foucault

O método de separação de perdas consiste na realização do ensaio para duas frequências que estejam; uma entre a metade e a outra, entre o dobro da frequência na qual se quer corrigir. Neste procedimento, a tensão e consequentemente, B devem ser mantidos constantes. Assim tem-se uma potência para cada frequência estabelecida:

$$P_{c1} = C_p f_1^2 + C_h f_1, \quad (3.9)$$

e

$$P_{c2} = C_p f_2^2 + C_h f_2. \quad (3.10)$$

Tendo a seguinte relação entre elas:

$$C_p = \frac{a(P_{c2} - aP_{c1})}{f_2^2(a - 1)} \quad (3.11)$$

e

$$C_h = \frac{a^2 P_{c1} - P_{c2}}{f_2(a - 1)}, \quad (3.12)$$

onde

$$a = \frac{f_1}{f_2}. \quad (3.13)$$

Utilizando-se as potências medidas nos ensaios nas frequências f_1 e f_2 , chega-se a aos valores de C_p e C_h .

Para se determinar as perdas em uma frequência intermediária, utiliza-se a equação:

$$P_c = C_p f^2 + C_h f = P_p + P_h \quad (3.14)$$

sendo

$$P_p = C_p f^2 \quad (3.15)$$

e

$$P_h = C_h f \quad (3.16)$$

onde,

$$P_h = P_c K_h \quad (3.17)$$

e

$$P_p = P_c K_p. \quad (3.18)$$

Substituindo as equações (3.17) e (3.18) em (3.7), tem-se a perdas totais corrigidas, dada pela expressão (3.8).

3.3 Norma brasileira: NBR 6151

O objetivo da norma NBR 6151 é definir procedimentos para obtenção das propriedades de lâminas planas de aço para fins elétricos.

3.3.1 Circuito esquemático

Para realizar os ensaios de perdas magnéticas e de permeabilidade magnética de forma satisfatória é necessário conectar os instrumentos de medição corretamente. O esquema de ligação para realização do ensaio de perdas magnéticas é ilustrado pelo circuito esquemático representado pela Figura 12.

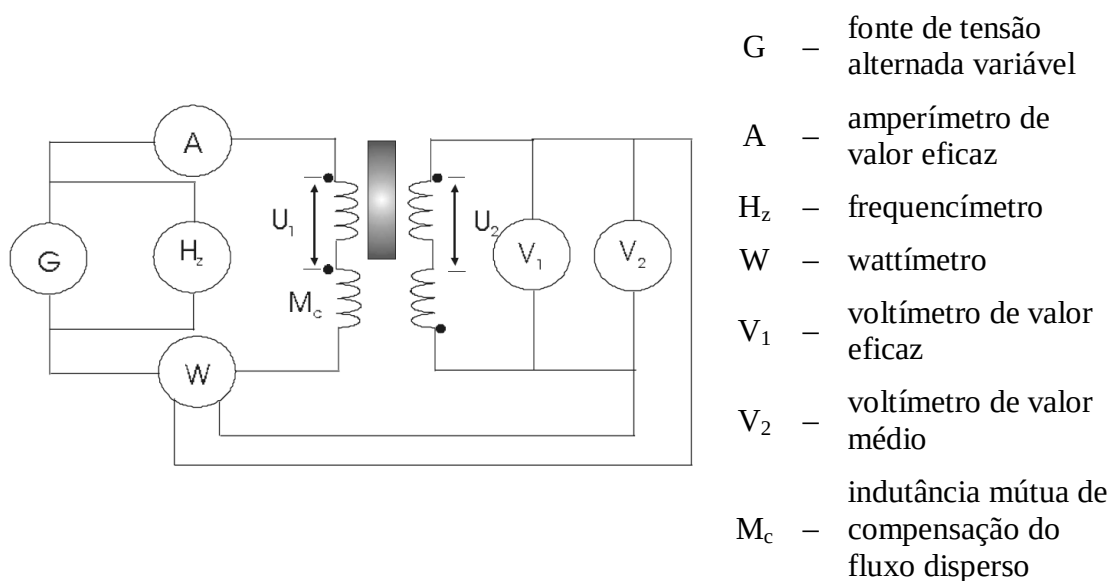


Figura 12 – Circuito esquemático para realização do teste de perdas magnéticas e levantamento da curva $B-H$ (NBR-6151, 1996; MENDES, 2004).

O ensaio de permeabilidade magnética pode utilizar o mesmo circuito utilizado para o ensaio de perdas magnéticas, pois este circuito contém os instrumentos necessários para medição e obtenção da indução magnética e da permeabilidade. Os instrumentos utilizados para o ensaio de permeabilidade magnética são uma fonte de tensão alternada, um amperímetro de valor eficaz e voltmímetro de valor médio (equipamentos G , A e V_2 mostrados na Figura 12).

3.3.2 Requisitos para realização de ensaios

Para realização do ensaio, as amostras devem estar padronizadas e atender a certos requisitos estruturais e dimensionais (NBR-6151, 1996):

- são utilizadas lâminas sem isolamento adicional;
- são utilizadas lâminas de superfície plana e espessura igual ou inferior a 1,0 mm;
- cortam-se lâminas sem rebarbas, de largura $30 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ e comprimento entre 280 mm à 308 mm, com exatidão de $\pm 0,5 \text{ mm}$. Para facilitar a montagem e desmontagem do quadro, utilizam-se normalmente lâminas de 305 mm de comprimento;
- o número de lâminas deve ser múltiplo de 4 e não deve ser inferior a 12;

- a espessura é medida em quatro pontos diferentes da lâmina, localizados no mínimo a 40 mm das bordas. A medição é feita com exatidão de 0,01 mm, sendo a média aritmética o resultado final.

A norma apresenta métodos para o cálculo da densidade de massa do material, porém esta informação geralmente é fornecida pelo fabricante do material, não sendo este o foco do estudo realizado neste trabalho.

Existem algumas condições necessárias a serem respeitadas para a realização do ensaio (NBR-6151, 1996):

- as lâminas devem ser inicialmente desmagnetizadas, para este fim, pode ser aplicado um campo magnético alternado decrescente. As lâminas devem apresentar temperatura entre 18 a 28°C;
- este ensaio é válido mantendo-se a forma de onda da indução magnética senoidal. Esta condição é satisfeita quando a tensão secundária induzida for senoidal. Assim, o fator de forma da tensão secundária não deve deslocar-se mais que 1 % de 1,11 (este limite pode ser transposto no ensaio da permeabilidade magnética). Caso necessário, o fator de forma deve ser mantido na faixa de $1,11 \pm 1 \%$ através de sistemas eletrônicos com realimentação. Caso isto não seja possível, corrige-se a perda magnética para desvios do fator de forma entre 1 e 10 %;
- a frequência deve ser constante com tolerância de $\pm 0,2 \%$;
- para produtos de grão não orientado, o ensaio é realizado para amplitude de indução magnética até 1,5 T e preferivelmente para frequência entre 15 Hz e 100 Hz. Frequência de 400 Hz pode ser alcançada com uma instrumentação adequada;
- é permitido aplicar um esforço de 1 N a cada canto, perpendicularmente ao plano das tiras intercaladas.

Para atender às exigências da norma durante a obtenção das perdas magnéticas e da permeabilidade magnética deve-se realizar a medida das seguintes grandezas:

- valor médio da tensão secundária: deve ser medido utilizando-se um voltímetro, de bobina móvel com retificador, de classe 0,5. A resistência interna deste aparelho deve ser elevada (superior ou igual à $1000 \Omega/V$). O instrumento é geralmente calibrado em valor eficaz. Para regime senoidal puro tem-se a seguinte relação de tensões $U_S = 1,1107 \bar{U}_S$ proveniente da equação (3.6);
- valor eficaz da tensão secundária: deve ser medido utilizando-se um voltímetro de valor eficaz verdadeiro com resistência interna superior ou igual à $500 \Omega/V$ e de classe 0,5;
- corrente primária: deve ser medida utilizando-se um amperímetro de valor eficaz de classe 0,5 ou melhor, cuja resistência interna seja baixa;
- frequência: para a medida é permissível utilizar um frequencímetro de classe 0,5, ou de classe 0,2 se for necessário maior exatidão;
- potência: é medida utilizando-se um wattímetro de classe 0,5 próprio para sistemas de fator de potência baixo (0,1 ou 0,2). A resistência do circuito de tensão deve ser inferior ou igual a $100 \Omega/V$;
- monitoramento da imagem da tensão medida: utilizar osciloscópio;
- quando o método do resistor calibrado for utilizado para medição do campo magnético é necessário um osciloscópio ou um voltímetro eletrônico de valor de pico. A exatidão da medida deve ser $\pm 3\%$ ou melhor. A exatidão do resistor calibrado deve ser $\pm 0,5 \%$ ou melhor. A resistência do resistor calibrado não deve ser superior a 1Ω para minimizar a distorção da forma de onda do fluxo;
- quando for utilizado o método do indutor mútuo para calcular o campo magnético, este deve apresentar exatidão de $\pm 0,5 \%$ ou melhor e impedância primária mínima. A impedância secundária do indutor deve ser baixa comparando-se com o instrumento de medida a ele conectado (para minimização do erro).

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo é apresentado os procedimento adotados para realização dos ensaios, sendo detalhado de forma complementar, a metodologia descrita na norma NBR 6151, a qual foi utilizada como referência na definição das etapas do ensaio, junto com o trabalho proposto por (MENDES, 2004) o qual apresenta um comparativo entre as principais normas internacionais, além da propria NBR 6151.

É importante resaltar que apesar da norma NBR 5161, criada em 1977, tenha sido revalidada em 1996, a definição dos instrumentos ainda está fundamentada em medidores analógicos, não tendo sido realizadas as devidas alterações para considerar as novas tecnologias de medição e processamento das medidas que estão disponíveis na atualidade.

Neste capítulo descrevem-se as tecnologias utilizadas para o desenvolvimento e validação da solução proposta. São detalhados o hardware, o software e a aquisição de dados utilizados para se obterem os resultados coerentes através de um sistema automatizado.

4.1 Descrição do sistema automatizado de medição de propriedades magnéticas

O sistema empregado nas medições realizadas é composto por uma bancada, um painel elétrico, um quadro de Epstein e um computador pessoal (PC), conforme ilustrado na Figura 13. No painel elétrico ficam os transdutores de corrente e de tensão, a fonte de alimentação e o quadro de Epstein. No PC está a placa de aquisição de dados (NI PCI-6220) e o *software* desenvolvido em LabVIEW, o qual faz a aquisição e o processamento dos sinais. Esta arquitetura de aquisição baseada em PC é chamada de instrumentação virtual, tendo como vantagem a flexibilidade e o baixo custo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009a).

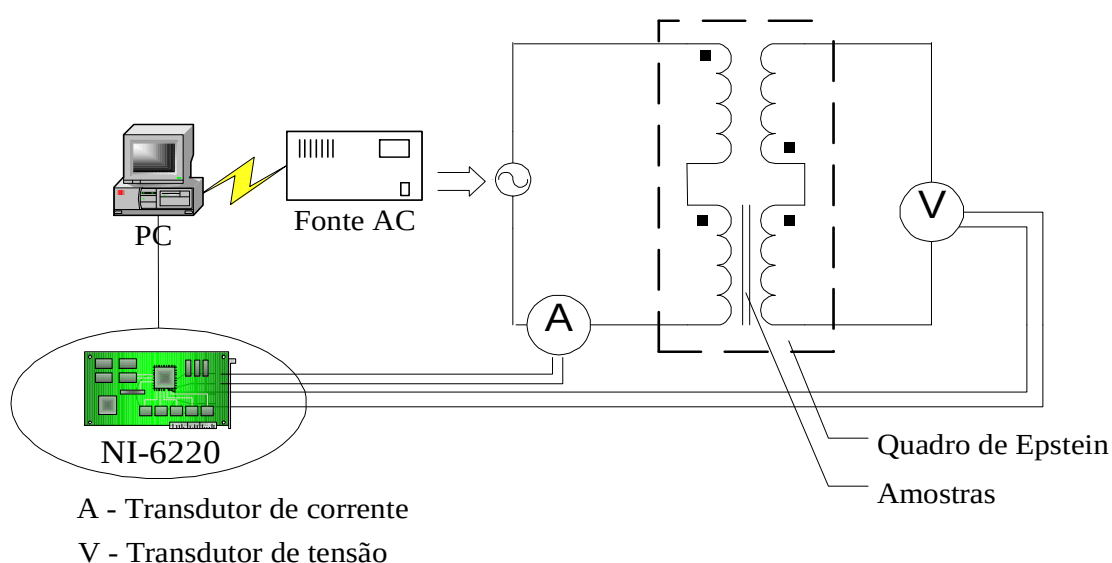


Figura 13. Diagrama esquemático do sistema proposto para teste de Epstein.

A placa de aquisição de dados NI PCI-6220 possui como principais características:

- 24 entradas ou saídas digitais;
- 2 contadores;
- 16 entradas analógicas (referenciadas) ou 8 em modo diferencial;
- 16 bits de resolução;
- entrada analógica configurável em ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V, ± 0.2 V;
- taxa de amostragem de 250 kS/s (em um único canal ou no conjunto de canais).

O transdutor de tensão utilizado é o modelo CV 3-200/SP6, da LEM (LEM, 2001), possuindo as seguintes características:

- faixa de operação de 0 a 100 V;
- precisão de $\pm 0,25$ %;
- linearidade $< 0,1$ %;
- tempo de resposta de 3 μ s;
- resposta em frequência de 0 a 700 kHz.

Os transdutores de corrente selecionados foram o CT 1-T e CT 10-T (LEM) , tendo a respectiva especificação para o CT 1-T:

- faixa de operação de 0 a 1 A;
- precisão de $\pm 0,25$ %;
- tempo de resposta < 1 μ s;
- resposta em frequência de 0 a 500 kHz.

A especificação do CT-10T é:

- faixa de operação de 0 a 10 A;
- precisão de $\pm 0,1$ %;
- tempo de resposta < 1 μ s;
- resposta em frequência de 0 a 500 kHz.

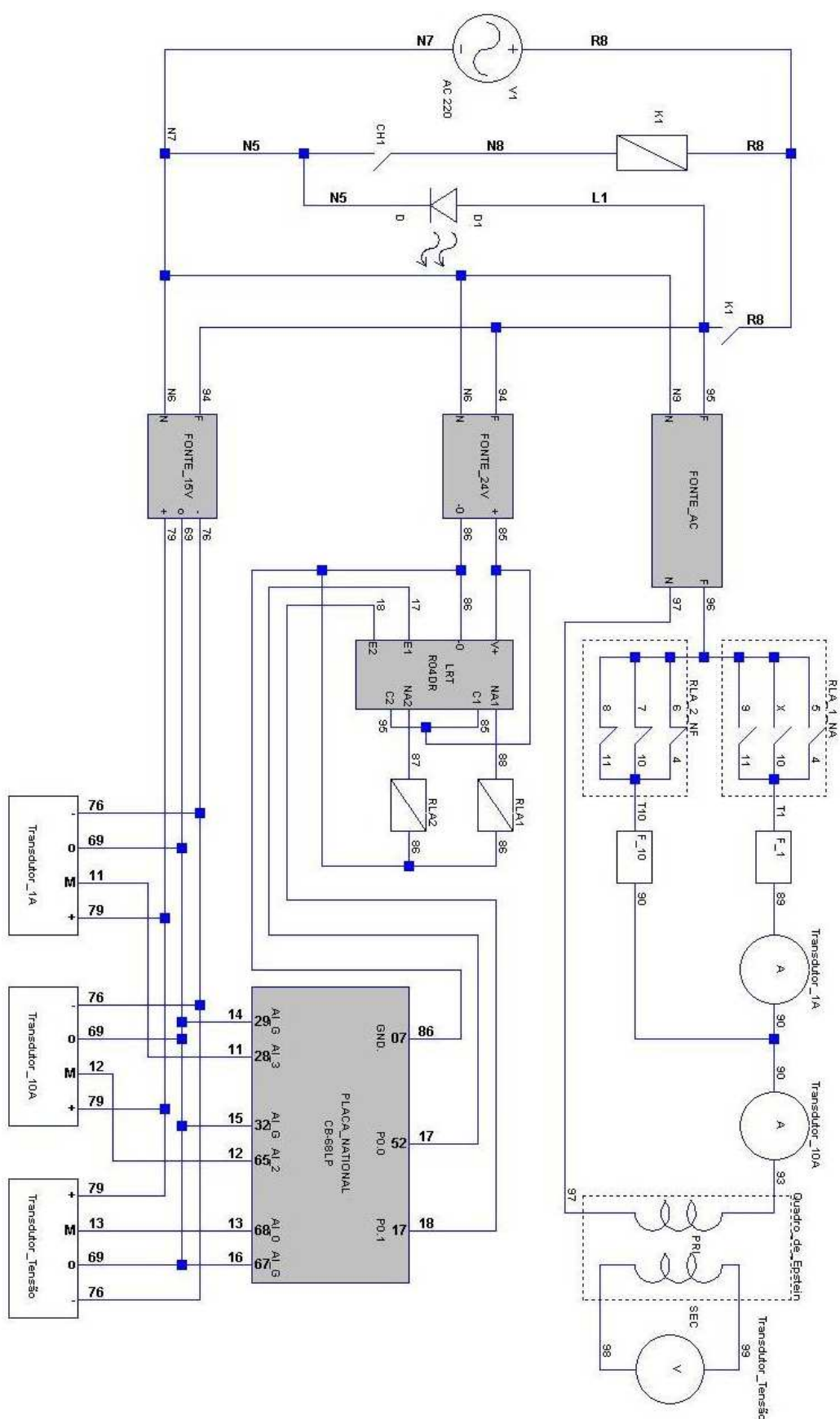


Figura 14. Circuito para chaveamento entre os transdutores de corrente.

Optou-se por utilizar dois transdutores de corrente devido a corrente ser muito baixa no início do ensaio, em alguns casos inferior a 100 mA, e podendo ultrapassar os 5 A no final do ensaio, em altas induções, dependendo do tipo de material utilizado. Dessa forma a precisão é mantida durante todo o ensaio, mesmo durante o chaveamento entre os transdutores, o qual é realizado de forma a proteger o transdutor de 1 A, sem interromper o fluxo magnético durante essa operação como mostra a Figura 14. Mantém-se um contactor em modo normalmente fechado (RLA_2_NF) e o outro em normalmente aberto (RLA_1_NA), conforme ilustrado na Figura 14, no lado esquerdo inferior, nessa condição a corrente circula pelo transdutor de 10 A e pelo contactor RLA_2_NF, quando é necessário trocar de faixa de corrente, aciona-se o contactor RLA_1_NA, fazendo com que a corrente circule pelos dois contactores, em seguida abre-se o contactor RLA_2_NF fazendo a corrente circular pelo transdutor de 1 A e pelo de 10 A. Para retornar a escala maior, basta fechar novamente o contactor RLA_2_NF e em seguida abrir RLA_1_NA.

Pode-se observar no meio da parte inferior da Figura 14, a borneira CB68 a qual serve de interface com a placa de aquisição de dados. Na borneira estão conectados, no lado esquerdo, as entradas analógicas dos transdutores de corrente de 1A e de 10A, e o transdutor de tensão. São conectados também as saídas digitais da placa, no lado direito, aos relés (LRT), cujas saídas são responsáveis pelo acionamento do comando dos contactores.

Todos os transdutores são isolados, sem inserção de perdas e com alta imunidade a ruído externo. Operam utilizando o princípio de medição por efeito Hall (ver ANEXO A), em malha fechada, também chamado de Efeito Hall compensado, utiliza o elemento de tensão Hall para gerar uma compensação de corrente na bobina secundária, a fim de criar um fluxo magnético total igual a zero, como pode ser observado na Figura 15. Em outras palavras, a corrente secundária cria um fluxo magnético igual em amplitude, mas na direção oposta, para o fluxo criado pela corrente primária. Na parte superior da Figura 15, tem-se a alimentação da rede utilizada para energizar as fontes de ± 15 V, a de 24 V e a fonte AC, empregada durante os ensaios.

A operação do elemento Hall em uma condição de fluxo zero elimina o desvio de ganho em relação a temperatura, uma vantagem adicional desta configuração é que o enrolamento secundário irá agir como um transformador de corrente em frequências mais elevadas, estendendo significativamente a largura de banda e reduzindo o tempo de resposta o transdutor (LEM, 2001).

Quando o fluxo magnético é igual a zero, o potencial magnético (ampère-espira) é igual, consequentemente, a corrente secundária é a imagem exata da corrente primária, I_P . Embora as vantagens de um transdutor de circuito fechado incluem muito boa precisão e linearidade, assim como um rápido tempo de resposta, a principal limitação é o alto consumo de corrente da fonte secundária, que deve fornecer a compensação atual, bem como a tendência atual.

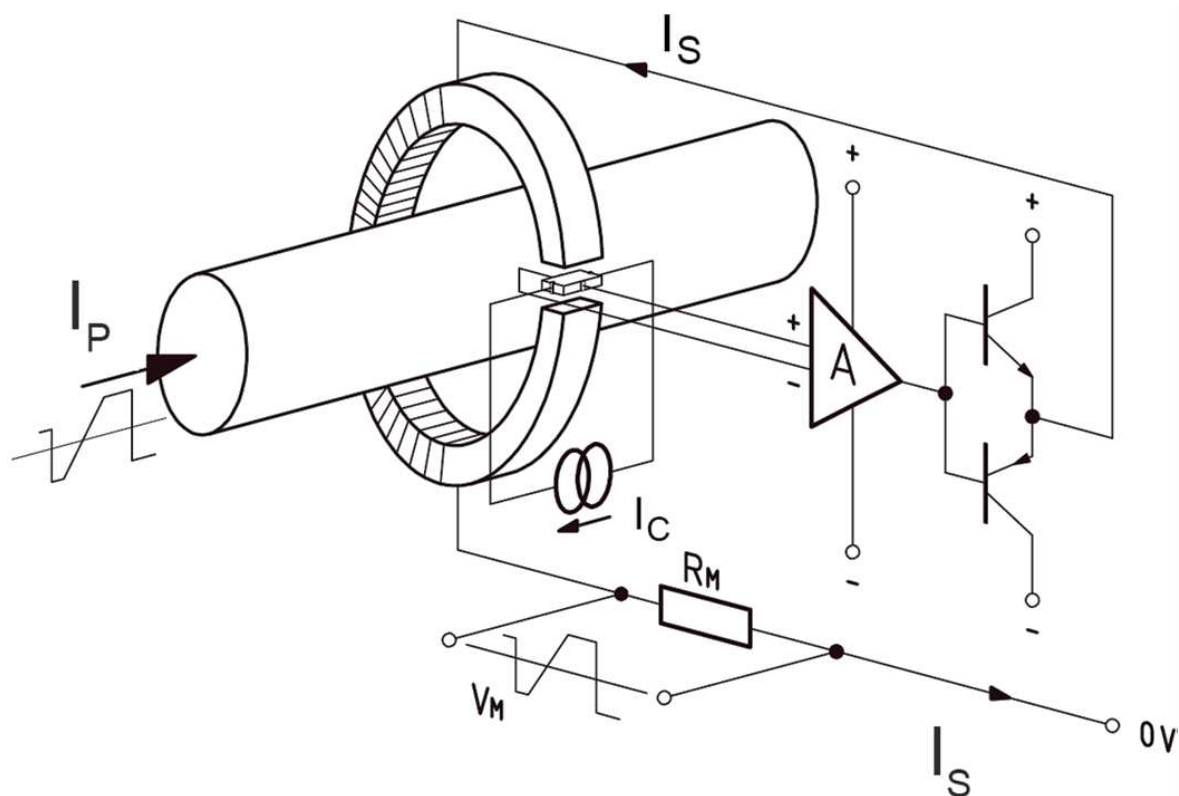


Figura 15. Princípio de funcionamento do circuito de medição por efeito Hall em malha fechada para transdutor de corrente (LEM, 2001).

Durante os ensaios foram utilizadas duas fontes de tensão. A primeira, uma fonte de tensão CA linear, modelo Extech 6720 de 2 kVA da empresa Extech, com variação em amplitude (0 a 300 V) e em frequência (0 a 500 Hz). Possuindo resolução de 0,1 V em tensão e 0,5 Hz em frequência, precisão de $\pm 0,5\%$ e THD de menor que 0,5%. A outra, uma fonte CA chaveada, modelo FCATH 450-38-50 com 4,5 kVA da empresa Supplier, com variação em amplitude (0 a 300 V), frequência (fundamental de 0 a 500 Hz) e com adição de harmônicos. A comunicação com as fontes é realizada via protocolo de comunicação GPIB e serial RS-232, respectivamente, para as fontes Extech 6720 e FCATH 450-38-50.

Nesse sistema é possível realizar ensaios entre 45 a 400 Hz, para uma tabela de indução previamente configurada, variando de 0 a 1,7 T. As restrições estão relacionadas com os limites dos transdutores de corrente (10 A) e de tensão (100 V), e do próprio quadro de Epstein (corrente primária máxima de 10 A).

Após o ensaio ser programado, o software configura automaticamente a fonte CA para acionar a saída de tensão de acordo com a equação (3.1), sendo o sinal realimentado em função da diferença entre a referência e a leitura do transdutor de tensão.

Os parâmetros da aquisição de dados são configurados no *software Measurement and Automation Explore* (MAX) (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009c), através de canais virtuais, onde são atribuídas ao tipo de sensor as respectivas escalas, a associação dos canais físicos da placa e a forma de leitura dos canais. É utilizada na aplicação, a leitura de dois sinais simultâneos, a uma taxa de aquisição de 2000 amostras por segundo, em modo contínuo e com leitura diferencial. Maiores detalhes sobre o teorema da amostragem é apresentado no ANEXO A. O esquemático de conexão entre o transdutor e as entradas analógicas da placa de aquisição de dados, os quais são interligados pelo módulo de terminais de ligação (AI+ e AI-), é apresentado na Figura 16.

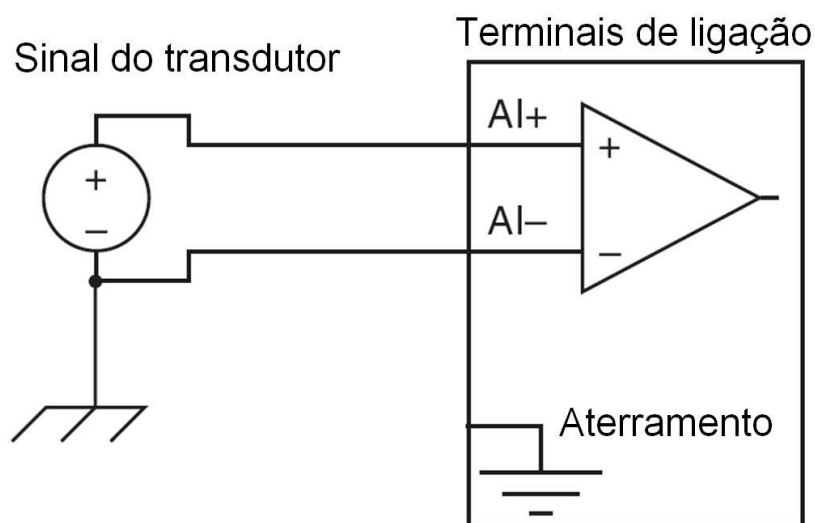


Figura 16. Diagrama esquemático de ligação entre o transdutor e a placa de aquisição em modo diferencial (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009d).

A aquisição de dados no LabVIEW é realizada através dos VIs (programa ou chamada de função do LabVIEW) da biblioteca DAQmx, os quais executam as tarefas (*Task*) pré-configurada. O processamento destes sinais é feito através dos respectivos VIs:

- *Extract Single Tone Information.vi* – Calcula a frequência da medição de tensão;
- *Basic Averaged DC-RMS.vi* – Cálculo de tensão RMS, corrente RMS e a potência através do nível CC do produto (ponto a ponto) entre corrente e tensão;
- *Waveform Peak Detection.vi* – Detecção de picos, usado no cálculo da corrente de pico, a qual é utilizada para a obtenção do pico de H (equação (3.5)).
- *Integral $x(t)$.vi* – Utilizado no cálculo de B , em função do sinal de tensão (equação (3.4)).
- *Harmonic Distortion Analyzer.vi* – Fornece informações dos harmônicos e da THD, para sinais de tensão e corrente;
- *Extract Multiple Tone Information N Chan.vi* – Calcula módulo e fase de cada harmônico.

Dessa forma, podem-se obter os respectivos resultados ao longo do ensaio, pré-configurado com frequências fixas e indução variável:

- Curva $B-H$;
- Curva de magnetização – formada pelos picos de B e H ;
- Curva de perdas específicas – formada pelas perdas em função da B ;
- THD de corrente e de tensão.

Outra forma de realização de ensaio é através de variação da frequência para induções fixas ao longo do ensaio, tendo como resultados:

- Curva $B-H$;
- Curva de H versus frequência;
- Curva de perdas específicas versus frequência;
- THD de corrente e de tensão.

4.2 Correção da forma de onda de tensão do secundário

Sabe-se que durante a saturação do aço, provocado pelo aumento da indução, ocorre a distorção da forma de onda de tensão no secundário. Isto acontece a partir do joelho da curva de magnetização, normalmente a partir de 1,5 T. Dessa forma, o fluxo nas amostras deixa de ser puramente senoidal devido as não-linearidades do aço, gerando a presença de harmônicos. A norma NBR 6151 recomenda a correção dos harmônicos, quando possível.

Para se analisar este comportamento, realizou-se um ensaio a 50 Hz em três pontos de indução: 1,0, 1,5 e 1,65 T, obtendo a curva $B-H$ em cada ponto (ver Figura 17. Percebe-se que a partir de 1,5 T, realmente, ocorre a saturação do material, ficando evidente no ponto seguinte (1,65 T).

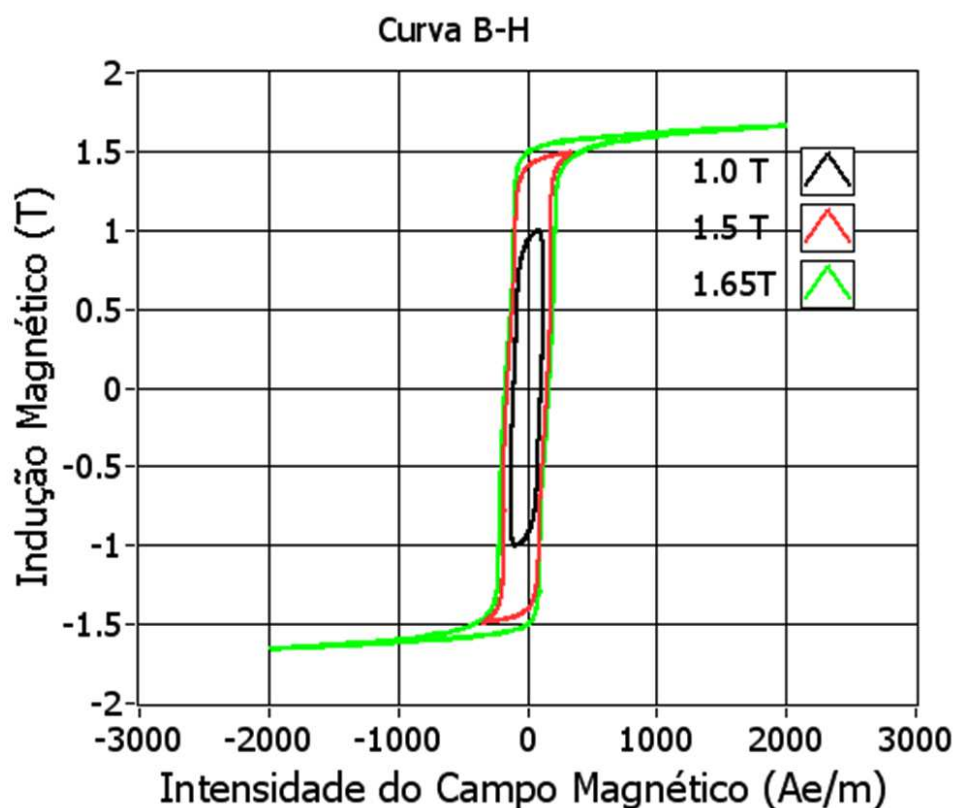
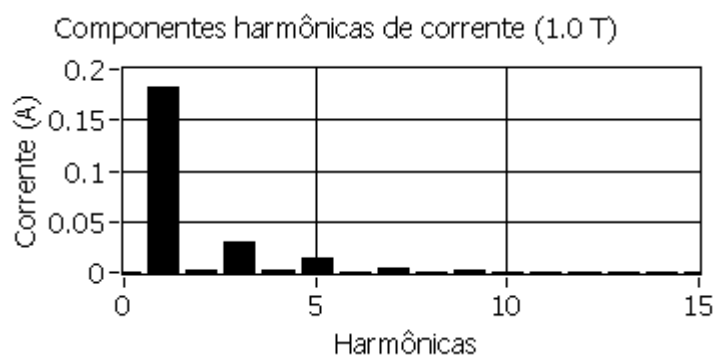


Figura 17. Análise da curva $B-H$.

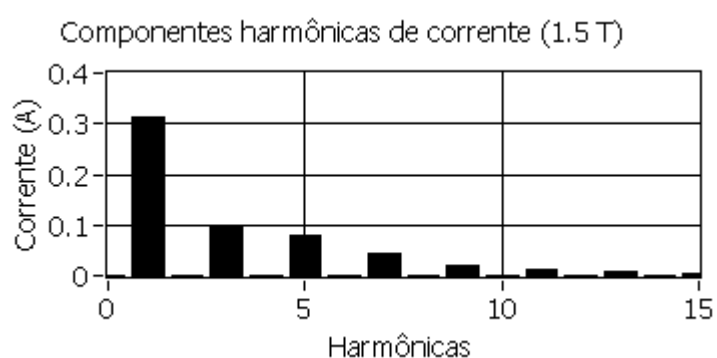
Porém, para se avaliar as distorções harmônicas, cada curva de tensão e corrente do ensaio realizado será analisada individualmente, sendo apresentada através das Figura 18 e Figura 19. Observa-se que devido a características da corrente de magnetização, esta apresenta alto conteúdo harmônico até mesmo para baixas induções, como pode ser verificado na Figura 18 (a), onde a presença da 3ª e da 5ª harmônicas são bem expressivas.

Esta análise contempla as harmônicas de 1ª a 15ª, sendo o ponto zero o nível CC. Percebe que em nenhuma curva ocorre a presença de harmônicas pares, isto se justifica pela simetria de meia onda, presentes nas formas de onda de tensão e de corrente (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996).

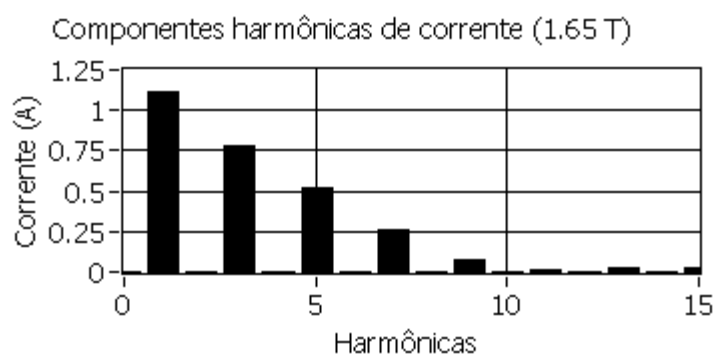
Na Figura 18 (b), percebe-se um aumento significativo na distorção harmônica em relação Figura 18 (a). Porém, como já verificado na Figura 17, a partir deste ponto que inicia a saturação, logo a presença de harmônicas em tensão (ver Figura 19 (b)) ainda é praticamente insignificante. Mas quando se atinge a saturação, mostradas em Figura 18 (c) e Figura 19 (c), percebe-se que as distorções harmônicas ocorridas na corrente são refletidas na tensão, devido as não-linearidades do material terem sido atingidas.



(a)



(b)



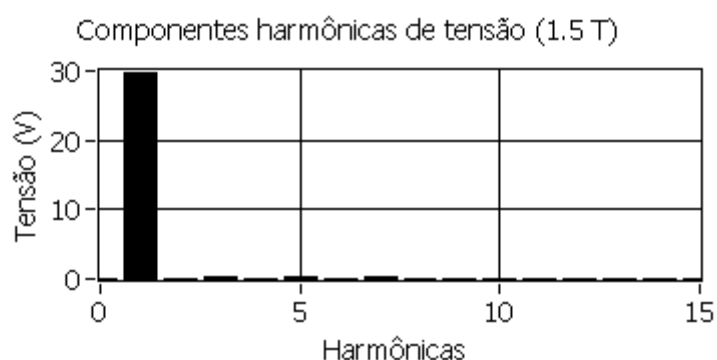
(c)

Figura 18. Evolução das componentes harmônicas de corrente com o aumento da indução.

Sendo (a) as componentes harmônicas em 1,0 T, (b) em 1,5 T e (c) em 1,65T.



(a)



(b)



(c)

Figura 19. Evolução das componentes harmônicas de tensão com o aumento da indução.

Sendo (a) as componentes harmônicas em 1,0 T, (b) em 1,5 T e (c) em 1,65 T.

Para apresentar este comportamento de forma numérica (ver Tabela 1), utilizamos a TDH de tensão e a THD de corrente, para avaliar a “qualidade” do sinal em relação à frequência fundamental. Mostrando nas Figura 18 e Figura 19, sua evolução com o aumento da indução.

Tabela 1 – Evolução da THD de corrente e da THD de tensão com a indução.

Indução (T)	THD de corrente (%)	THD de tensão (%)
1,0	17,63	0,58
1,5	43,45	1,08
1,65	87,38	5,95

Verifica-se que a distorção do sinal de tensão deve ser corrigida para garantir que as amostras e a análise estejam submetidas a um fluxo puramente senoidal. Pode-se aplicar a correção proposta pela norma NBR-6151, apresentada na equação (3.8). No entanto esta é uma aproximação válida apenas para fluxo senoidal.

Para se garantir um fluxo puramente senoidal, a correção deve ser feita em tempo real, através de realimentação em malha fechada. O estudo apresentado por Batistela (2001) contempla a correção de harmônicos, realizado através do projeto de inversor de tensão com filtro LC, incluindo uma malha de realimentação. Apesar das vantagens do projeto proposto, o mesmo não está disponível comercialmente, sendo de difícil implementação e requerendo um conhecimento avançado na área de controle e eletrônica.

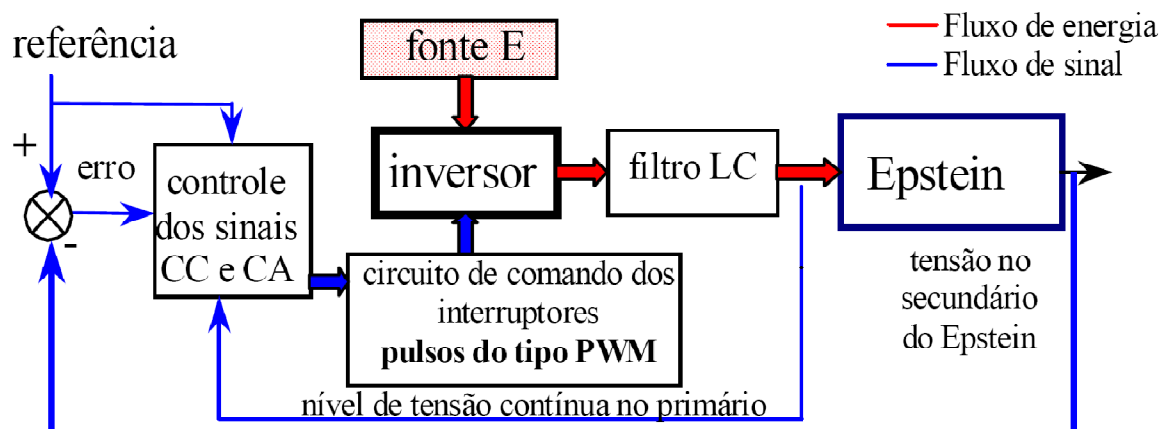


Figura 20. Topologia do sistema e a malha de controle proposta por Batistela (BATISTELA, 2001).

Neste trabalho é apresentada uma metodologia mais simples que utiliza equipamentos comerciais e se baseia na utilização de uma fonte com variação em amplitude, em frequência e com ajuste de harmônicos. Os sinais são adquiridos, processados e realimentados através da comunicação com a fonte de tensão. O sistema tem como referência uma amplitude e uma frequência a serem seguidas. Quando existe a presença de harmônicos, estes são defasados de 180° e somados a referência, provocando o cancelando de cada harmônica no secundário. Um diagrama esquemático da metodologia de controle proposta é apresentado na Figura 21.

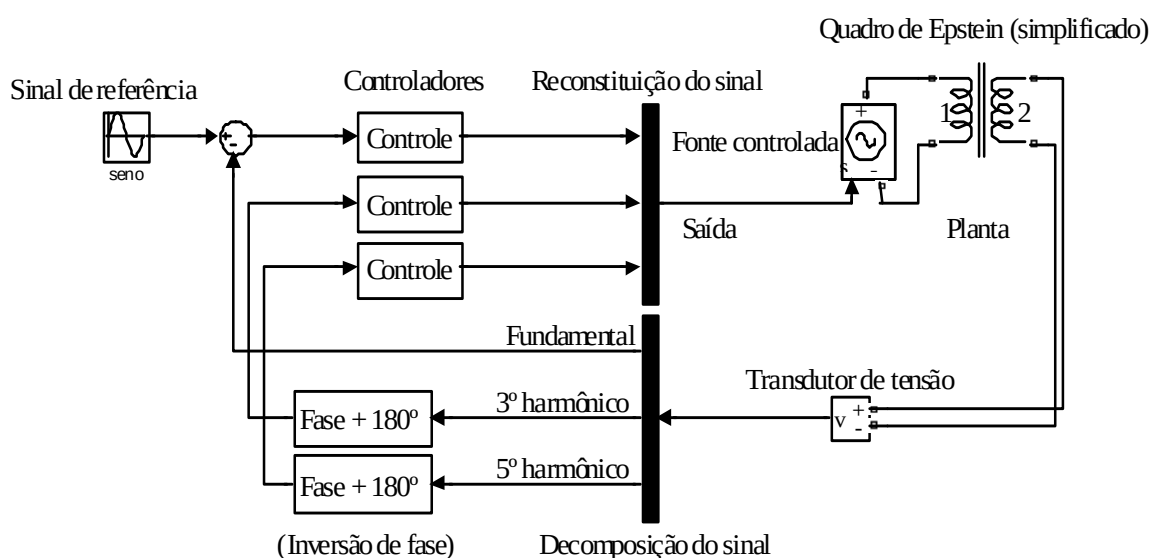


Figura 21. Diagrama da topologia de controle para correção de harmônicos.

Importante lembrar que as harmônicas de maior intensidade normalmente são as de 3ª e 5ª ordem, podendo existir harmônicas de ordens superiores como 7ª e 9ª ou até maiores. Na Figura 21, de forma esquemática, considerou-se apenas as harmônicas de 3ª e 5ª ordem, mas poderiam existir outras harmônicas como apresentado na Figura 19 (c), onde as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem podem ser identificadas.

Como já detalhado na Tabela 1, o aumento gradativo da indução na região de saturação do material provoca a incidência de harmônicas, cada vez, com maior THD tanto em tensão quanto em corrente. Conforme esperado, aumentando um pouco mais a indução, obtiveram-se resultados com uma distorção ainda maior. Por exemplo, na indução de 1,7 T, a THD de tensão chega a aproximadamente 8 % e para 1,75 T a THD de tensão registrada, fica em torno de 12 %.

Aplicando a realimentação das componentes harmônicas de maior intensidade (3ª, 5ª e 7ª), defasadas de 180°, conforme o esquemático apresentado na Figura 21. Consegue-se reduzir a THD de tensão de 12%, do sinal original em 1,75 T, para aproximadamente 3%. Portanto este procedimento melhora, significativamente, o comportamento do sinal, conforme é apresentado na Figura 22, as formas de onda de tensão no secundário antes e após a correção de harmônicas.

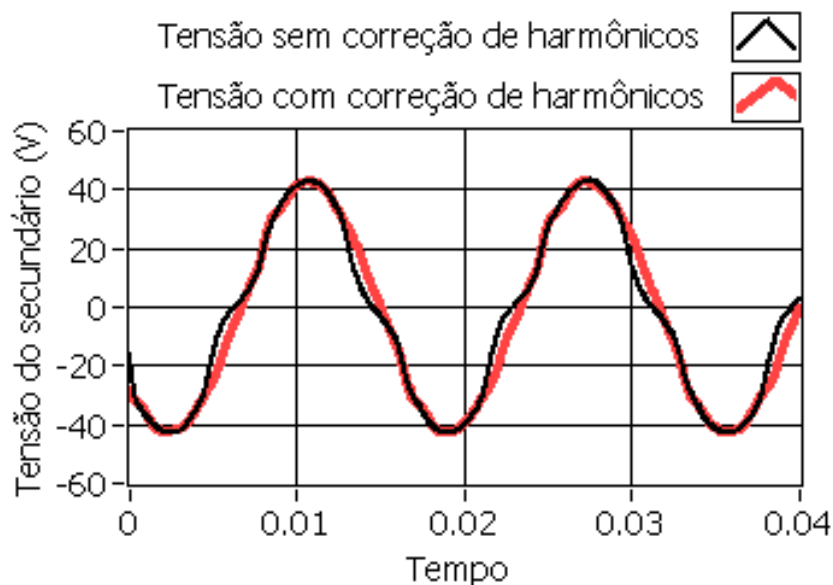
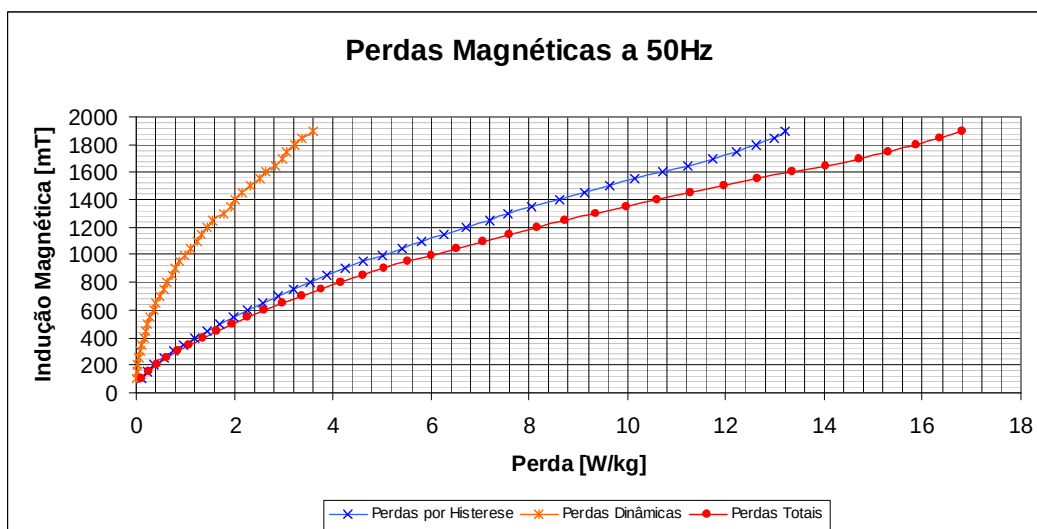


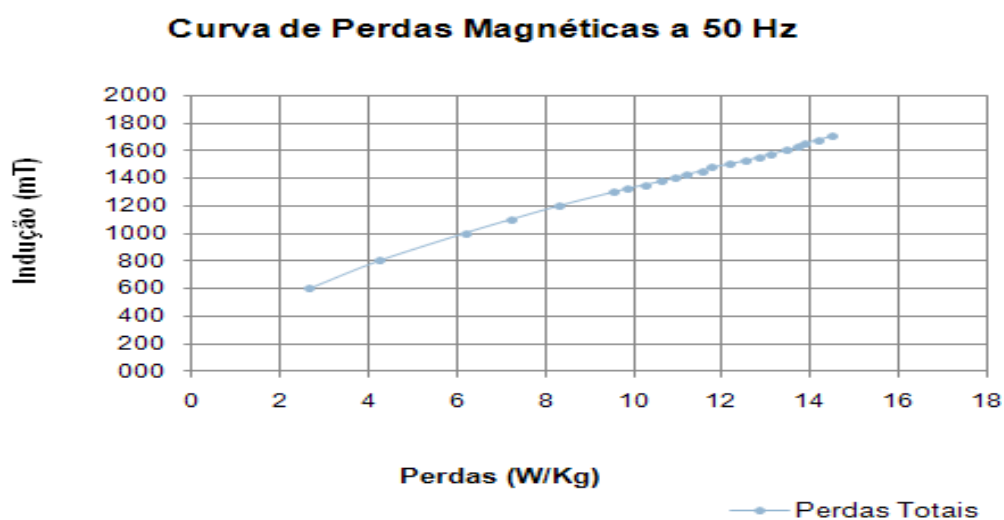
Figura 22. Comparação da forma de onda de tensão, antes e depois da correção dos harmônicos.

4.3 Validação dos resultados

Para validação dos resultados, foram realizados procedimentos de calibração e ensaios comparativos com amostras padronizadas, ou seja, o mesmo conjunto de amostras é testado e comparado os resultados em sistemas com teste de Epstein diferentes. O sistema tomado como padrão é o MPG 100D do Brockhaus, situado na UFSC e é utilizado como sistema de referência para todo o Brasil. O primeiro ensaio comparativo é o de perdas magnéticas, realizado a 50 Hz, apresentado na Figura 23 (a) o ensaio padrão e na Figura 23 (b) os resultados obtidos. Importante lembrar que de acordo com as unidades utilizadas para indução magnética, tem-se que 1 kG é equivalente a 100 mT.



(a)

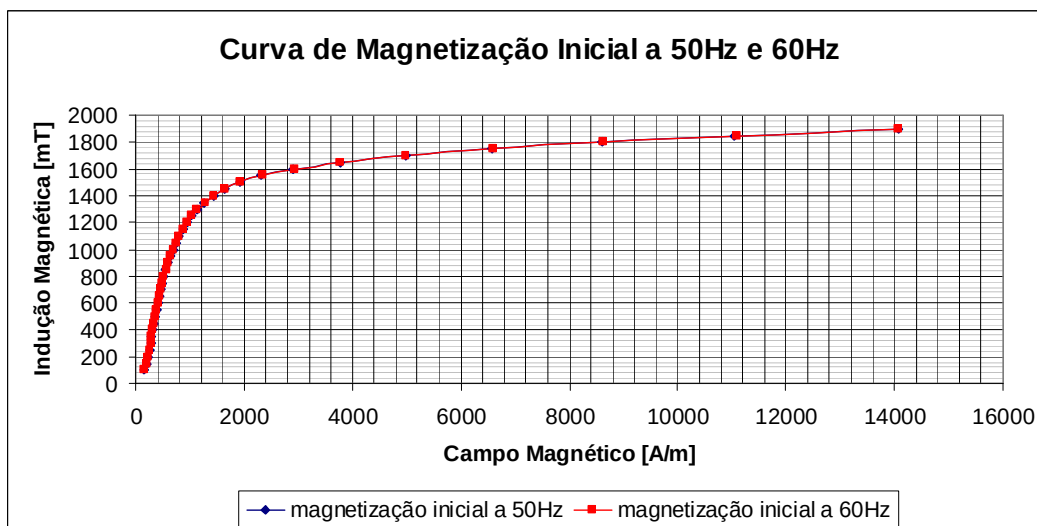


(b)

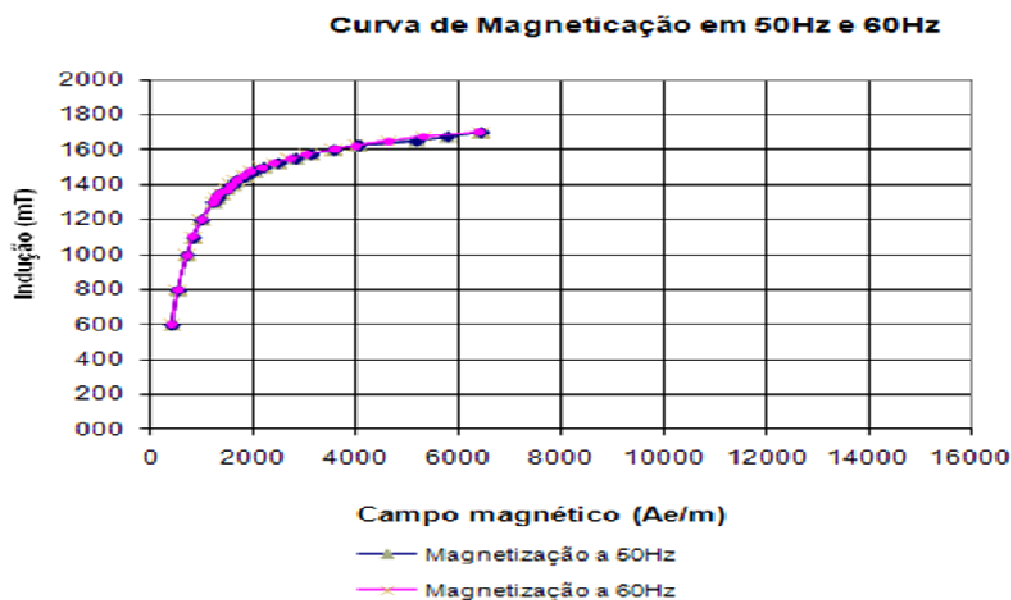
Figura 23 – Gráfico de perdas magnéticas realizado a 50 Hz. Sendo (a) o ensaio padrão (referência) e (b) os resultados obtidos.

Como se pode observar a Figura 23 (a) apresenta três curvas, no entanto a curva a ser comparada é a de perdas totais, a qual pode ser comparada com as perdas totais da Figura 23 (b). Verifica-se que os resultados são bem próximos, por exemplo, para perdas de 8 W/kg tem-se aproximadamente 1,19 T de indução em ambos os gráficos.

Este ensaio também foi realizado para 60 Hz, apresentando resultados equivalentes ao padrão, de forma semelhante 50 Hz. Por fim são apresentados os resultados obtidos para 50 Hz e 60 Hz para a curva de magnetização, onde a Figura 24 (a) apresenta os dados padrões e a Figura 24 (b) os dados obtidos durante realização de ensaios.



(a)



(b)

Figura 24 – Curva de magnetização realizada a 50 Hz e 60 Hz. Sendo (a) o ensaio padrão (referência) e (b) os resultados obtidos.

Através da análise dos resultados percebe-se que apesar do equipamento padrão percorrer uma faixa mais ampla de valores de indução, os resultados obtidos ficaram muito próximos do padrão, validando o equipamento. O motivo pelo qual a curva não ultrapassa 1,7 T é uma questão de padronização dos ensaios, visto que a região de interesse é na faixa de 1,5 T. Além de apresentar resultados coerentes, o sistema apresenta boa repetibilidade, fato proveniente dos ajustes de tensão em malha fechada e o pelo método de medição.

Para uma amostra com referência M470-65A, fabricado pela ThyssenKrupp Electrical Steel, com densidade específica de $7,70 \text{ g/cm}^3$, massa de 1024 g, espessura de 0,5 mm, foram realizados quatro ensaios consecutivos em 50 Hz para avaliar a repetibilidade do sistema, sendo estes resultados apresentados nas Figura 25 (a) e (b), nos quais se observa a semelhança em praticamente todos os pontos da curva.

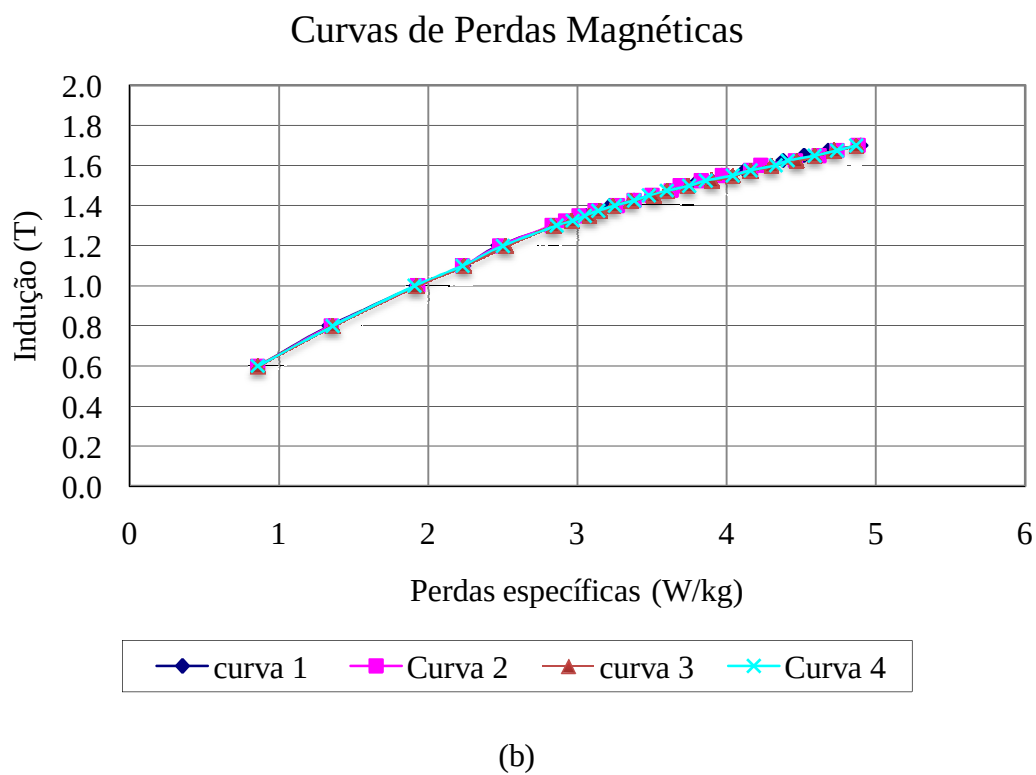
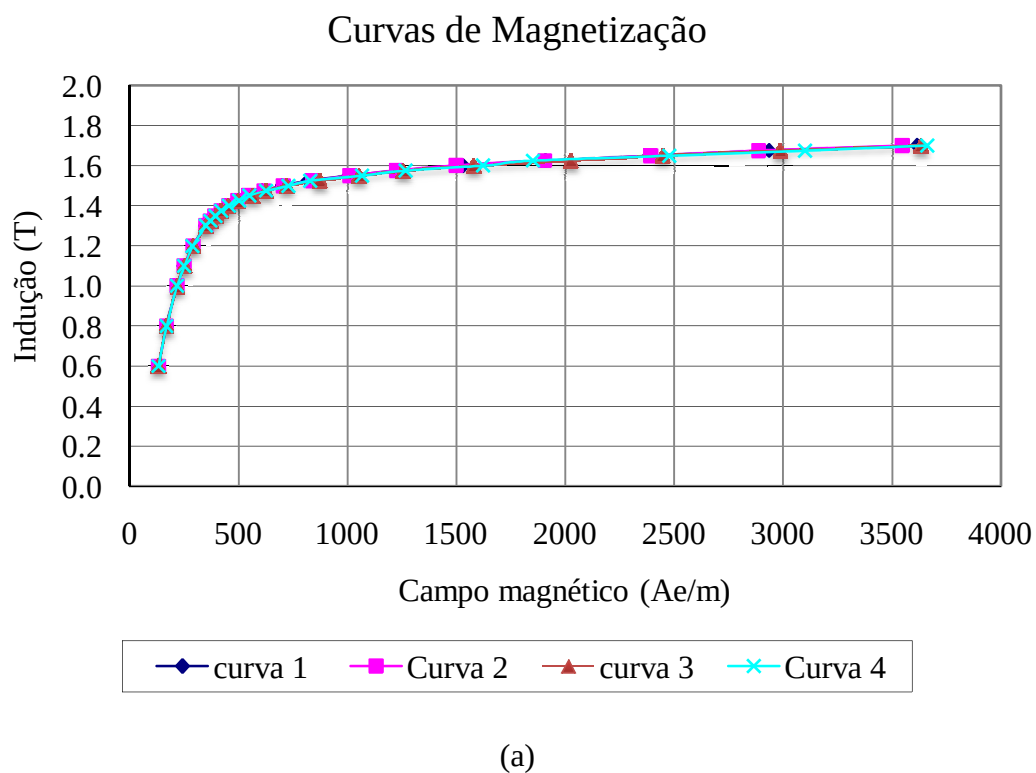


Figura 25 – Repetibilidade dos ensaios a 50 Hz para amostra M470-65A. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.

Na Tabela 2 podem-se ser observados os valores de indução de referência e os respectivos valores médios (1) de campo magnético, os desvios padrões (1) do campo magnético, o erro percentual máximo (1) para os quatro ensaios realizados. São apresentados também a média (2), o desvio padrão (2), e o erro percentual máximo (2) entre os ensaios para a medição das perdas específicas. Para os resultados apresentados, percebe-se que o desvio padrão máximo foi de 0,05 W/kg, tendo como maior erro percentual de 1,31 % em relação à média. Para as induções, o desvio padrão máximo chegou a 91,86 Ae/m, e o erro percentual máximo em relação à média chegou a 4,88 %.

O alto desvio padrão para o campo magnético é justificado pelas pequenas oscilações da fonte de tensão, que resultam em variações na corrente, pois conforme se pode observar na equação (3.5), a indução é múltipla da corrente, sendo as variações de corrente multiplicadas pela relação de espiras do quadro Epstein.

Tabela 2 – Cálculo de desvio padrão para análise dos resultados a 50 Hz da amostra M470-65A.

Indução (T)	Média 1 (Ae/m)	Desvio Padrão 1 (Ae/m)	Erro Máximo 1 (%)	Média 2 (W/kg)	Desvio Padrão 2 (W/kg)	Erro Máximo 2 (%)
0,60	131,82	0,35	0,00	0,86	0,00	0,86
0,80	168,88	0,65	0,92	1,35	0,01	1,35
1,00	217,54	0,74	0,52	1,92	0,01	1,92
1,10	250,10	1,59	0,22	2,24	0,01	2,24
1,20	290,53	1,42	0,90	2,49	0,02	2,49
1,30	348,40	1,61	0,53	2,85	0,01	2,85
1,33	370,80	0,69	1,18	2,96	0,02	2,96
1,35	393,31	3,59	1,31	3,05	0,03	3,05
1,38	419,78	2,47	0,64	3,14	0,01	3,14
1,40	452,95	3,01	0,77	3,25	0,02	3,25
1,43	497,32	3,02	0,44	3,38	0,01	3,38
1,45	551,37	8,80	0,50	3,50	0,01	3,50
1,48	618,97	8,08	0,35	3,61	0,01	3,61
1,50	713,92	14,06	1,07	3,73	0,03	3,73
1,53	840,35	22,93	1,04	3,85	0,04	3,85
1,55	1034,26	30,85	0,87	4,01	0,04	4,01
1,58	1245,29	19,61	0,72	4,15	0,02	4,15
1,60	1557,94	53,91	1,05	4,28	0,05	4,28
1,63	1922,34	73,25	1,13	4,43	0,04	4,43
1,65	2425,45	43,92	1,31	4,58	0,04	4,58
1,68	2977,40	91,86	0,85	4,72	0,03	4,72
1,70	3613,59	49,19	0,20	4,88	0,01	4,88

4.4 Considerações Finais

O capítulo apresenta o *hardware* utilizado no desenvolvimento do sistema, integrando os procedimentos de ensaios detalhados no Capítulo 3. Após a calibração dos transdutores através de um wattímetro WT230 da Yokogawa, um conjunto de amostras como referência, ensaiadas em um sistema já conhecido e calibrado, o qual foi utilizado para validar a metodologias aqui apresentada.

Verificou-se que apesar da norma impor como necessário a desmagnetização das amostras antes do ensaio, não se obtiveram diferenças significativas entre resultados consecutivos para uma mesma amostra. Por consequência, este procedimento foi eliminado do processo, reduzindo o tempo de ensaio.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversos ensaios realizados são apresentados neste capítulo, sendo discutidas questões como: a anisotropia do material, a influência do tratamento térmico nas amostras, o comportamento da indução com a variação da frequência, a análise harmônica provocada pela saturação e como corrigi-la.

As amostras testadas durante os ensaios são aqui enumeradas e brevemente detalhadas:

- amostra 1 – aço GNO 60900 fabricado pela CSN, com densidade 7,85 g/cm³, massa 772 g, espessura 0,58 mm e 50 % longitudinal 50 % transversal;
- amostra 2 – aço GNO 50CS1300 fabricado pela China Steel, com densidade de 7,85 g/cm³, massa de 565 g, espessura de 0,5 mm e corte 50 % longitudinal 50 % transversal;
- amostras N1 – aço de GNO B50AH600 fabricado pela BAOSTEEL, com densidade de 7,70 g/cm³ e espessura de 0,5 mm, para um grupo de amostras com diversos tipos de corte;
- amostras N2 – aço de GNO E230 fabricado pela Acesita, com densidade de 7,75 g/cm³ e espessura de 0,5 mm, para um grupo de amostras com diversos tipos de corte;
- amostra 3 – aço de GNO E230 fabricado pela Acesita, com densidade 7,75 g/cm³, massa 827 g, espessura de 0,5 mm e 50 % transversal 50 % longitudinal;
- amostra 4 – aço de GNO 60900 fabricado pela CSN, com densidade de 7,8 g/cm³, massa de 700 g, , espessura 0,58 mm e corte 50% longitudinal 50% transversal;
- amostra 5 – aço de GNO E230 fabricado pela Acesita, com densidade de 7,8 g/cm³, massa de 786,8 g, espessura de 0,6 mm e corte 50 % longitudinal 50 % transversal;

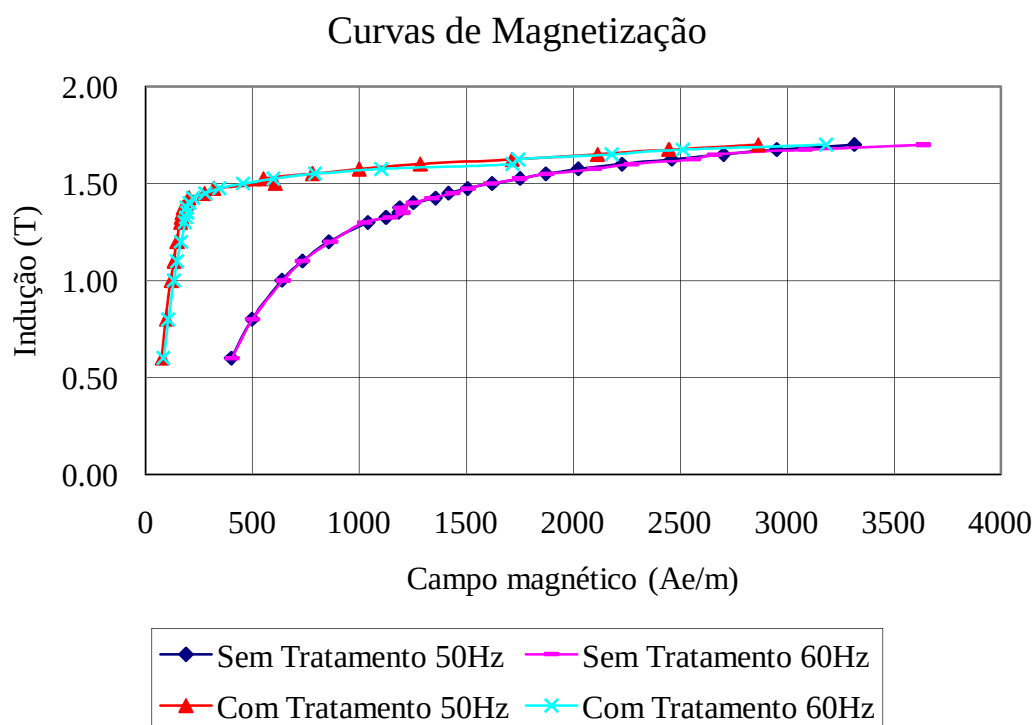
- amostra 6 – aço de GNO E360 fabricado pela ThyssenKrupp Electrical Steel, com densidade $7,80 \text{ g/cm}^3$, massa 786g, espessura 0,6 mm e corte longitudinal.

5.1 Influência do tratamento térmico

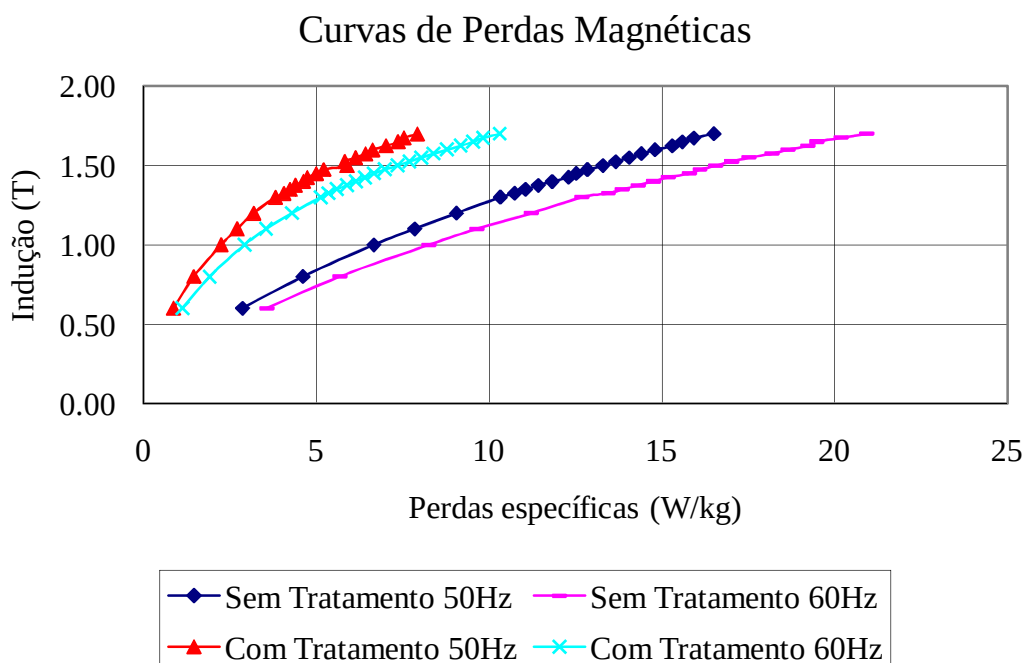
Conforme já mencionado no Capítulo 2, seção 2.7, o tratamento térmico é utilizado para aliviar as tensões do processo de laminação e melhorar as propriedades magnéticas dos materiais.

Para a amostra 1, sem tratamento térmico, foram realizados ensaios em 50 e 60 Hz. Depois de realizado o ensaio, esta mesma amostra sofreu um tratamento térmico e foi testada novamente. Os resultados obtidos comparando as amostras com e sem tratamento térmico são apresentados na Figura 26 (a) e (b).

Segundo as especificações do fabricante, os valores típicos de perdas específicas em 1,0 e 1,5 T, a 60 Hz em amostras com tratamento térmico final são 3,5 e 8 W/kg. Nos ensaios foram obtidas após o tratamento 2,92 e 7,34 W/kg, respectivamente, para 1,0 e 1,5 T. Percebe que além de reduzir as perdas magnéticas tanto em 50 Hz quanto em 60 Hz, como ilustra a Figura 26 (b), a curva de magnetização (Figura 26 (a)), sofreu uma grande mudança, reduzindo o campo magnético de forma muito acentuada nos pontos inferiores a 500 Ae/m. Além disso, provocou um grande aumento na declividade da curva, tornando praticamente linear, na região que antecede a saturação.



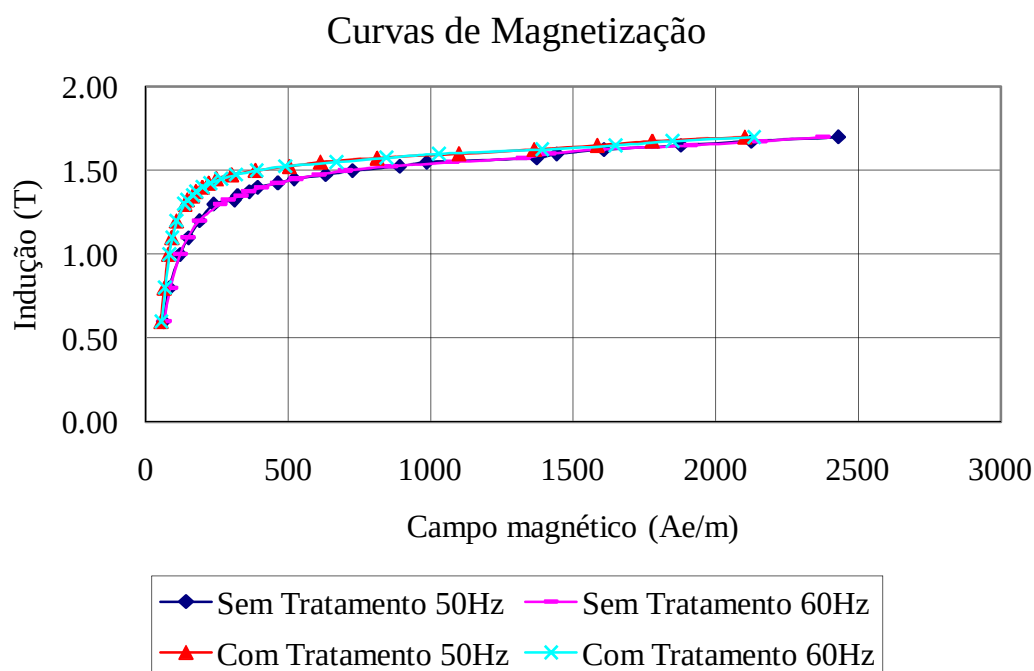
(a)



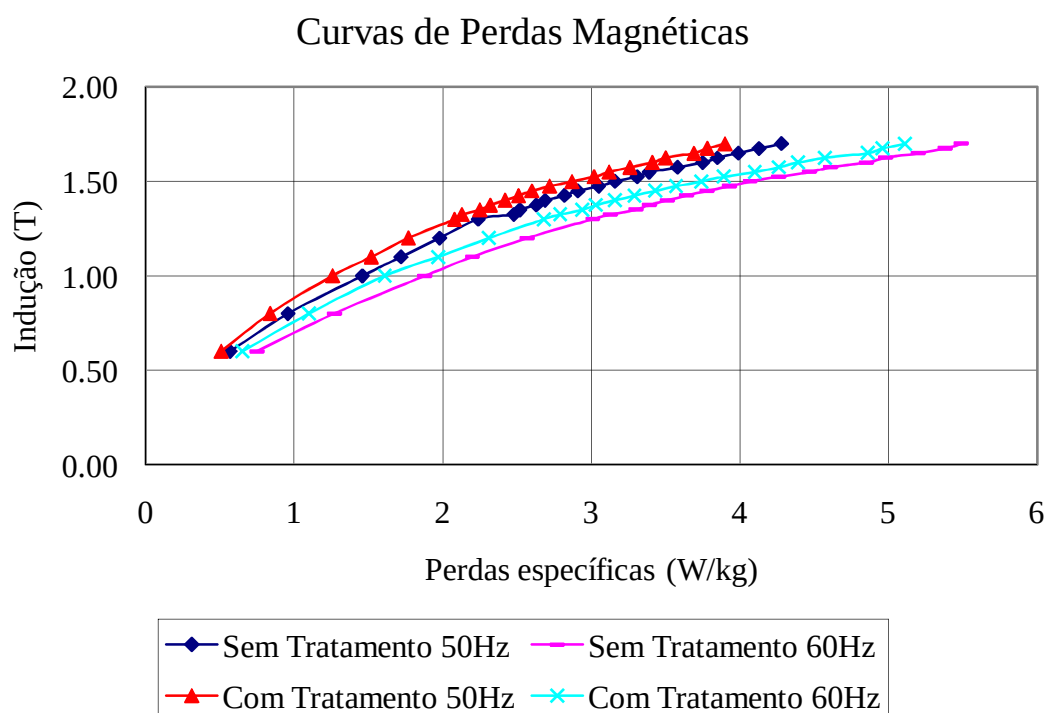
(b)

Figura 26. Ensaio com e sem tratamento térmico em 50 e 60 Hz, para amostra 1.
Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.

As alterações que o tratamento térmico provoca, nem sempre são tão visíveis quanto o ocorrido na amostra 1. Para complementar a análise, um segundo ensaio foi realizado com a amostra 2, cujos resultados são apresentados na Figura 27 (a) e (b). Segundo o fabricante, as perdas máximas em 1,5 T e 50 Hz devem ser inferiores a 13,0 W/kg, não sendo informados valores típicos, o que justificam a diferença para os aproximadamente 5 W/kg em 1,5 T.



(a)



(b)

Figura 27. Ensaio com e sem tratamento térmico em 50 e 60 Hz, para amostra 2. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.

Como se pode observar na Figura 27 (a), ocorreu uma leve mudança na inclinação da curva, tornando o joelho da curva mais acentuado. Já na Figura 27 (b), percebe-se uma pequena redução das perdas específicas.

Apesar de não ser uma grande mudança nas características do material, como a observada na amostra 1, pequena melhorias no material geram produtos mais baratos e eficientes.

5.2 Análise de anisotropia do material

Com o objetivo de verificar de forma experimental as diferenças nas propriedades magnéticas dos materiais associadas à direção de laminação, foi selecionada o conjunto de amostras N1, cujas características são detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Conjunto de amostras N1 para análise de anisotropia.

Densidade (g/cm ³)	Frequência (Hz)	Massa (g)	Estado da Amostra	Espessura (mm)
7,70	60	641	Transversal	0,50
7,70	60	647	Longitudinal	0,50
7,70	60	644	Transversal/Longitudinal	0,50
7,70	60	646	Diagonal	0,50
7,70	60	644	Diagonal/ Transversal	0,50
7,70	60	646	Diagonal/ Longitudinal	0,50

Os resultados obtidos durante os seis ensaios são apresentados na Figura 28 (a) e (b), no qual se podem verificar, na curva de magnetização, diferenças significativas no joelho da curva, principalmente na amostra diagonal. Comparando os últimos pontos da curva de magnetização, em 1,7 T na Figura 28 (a), observa-se que existe uma grande diferença entre as amostras longitudinal com 3600 Ae/m e diagonal com 6400 Ae/m. Isto também se reflete na curva de perdas, Figura 28 (b), no qual as perdas variam de 5,3 W/kg a 6,6 W/kg para as amostras longitudinais e transversais, respectivamente.

Dessa forma, conclui-se que realmente a direção de laminação é um fator importante na análise das amostras, devido à anisotropia que o material apresenta.

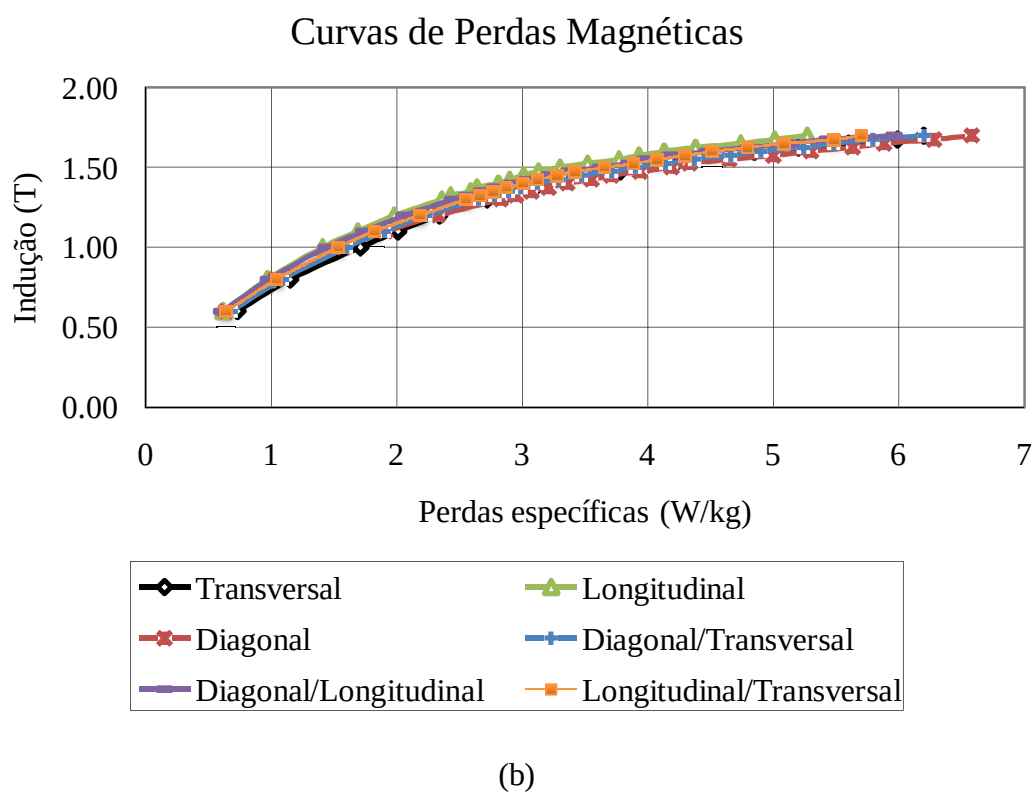
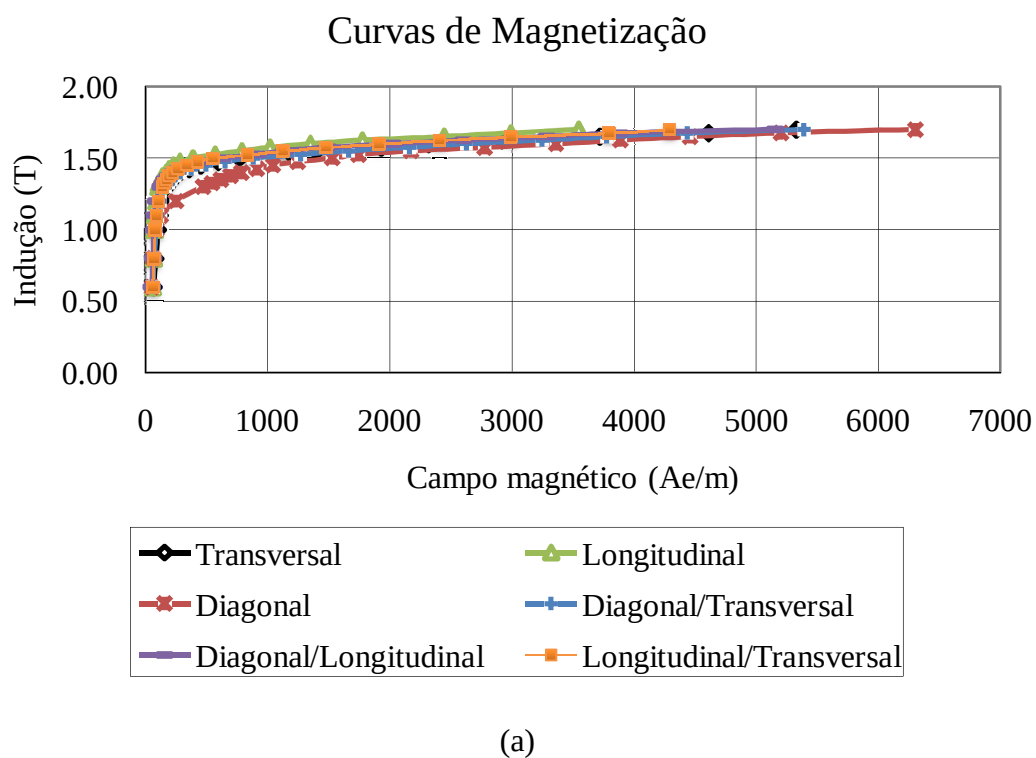


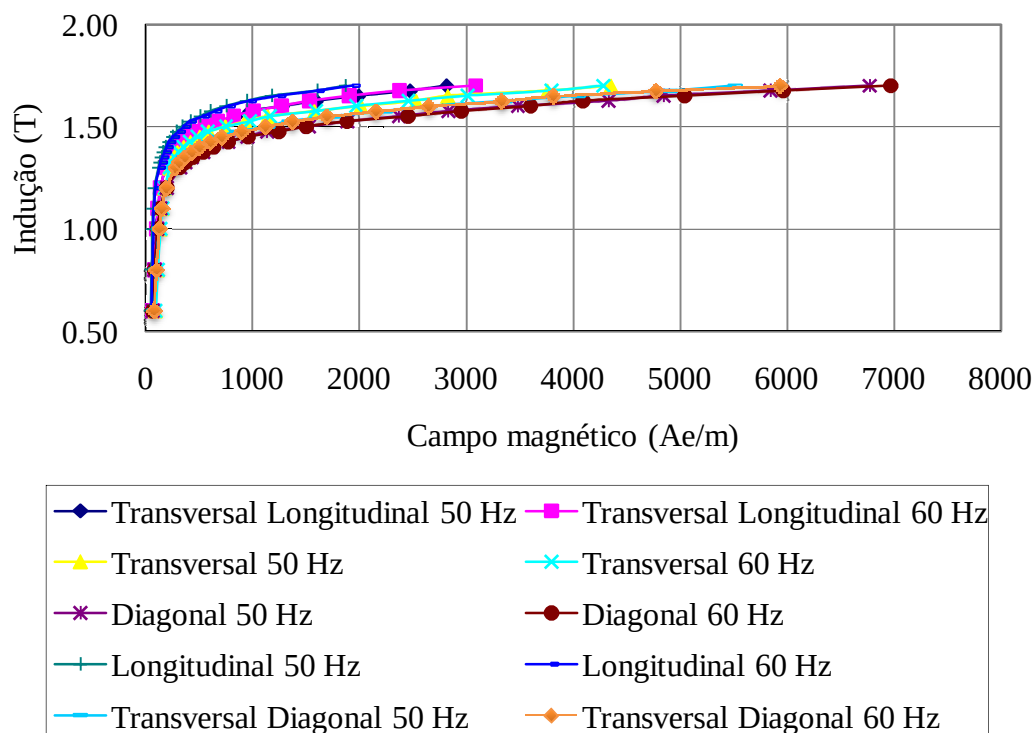
Figura 28. Ensaio para análise de anisotropia da amostra N1. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.

Outro ensaio foi realizado para avaliar se o comportamento apresentado pelas amostras N1, se repetiria em outro material, sendo utilizado, um conjunto de amostras N2, testadas em 50 e 60 Hz, com as respectivas direções de laminação:

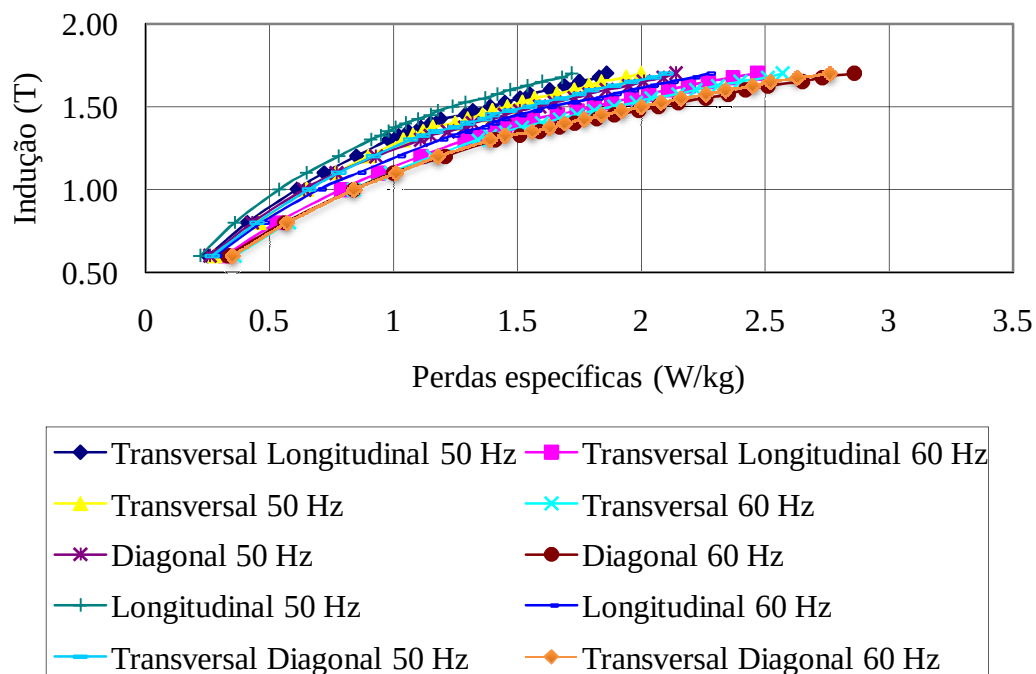
- 50 % transversal 50 % longitudinal;
- transversal;
- diagonal;
- longitudinal;
- 50 % transversal 50 % diagonal.

Nos resultados dos ensaios, mostrados nas Figura 29 (a) e (b), observa-se que existem grandes diferenças no comportamento da curva de perdas e na curva de magnetização em função do tipo de corte. Conforme mostrado na Figura 29 (a), o corte longitudinal, apresenta a maior permeabilidade magnética, tendo um campo magnético de 2000 Ae/m em 1,7 T, resultado muito inferior ao corte diagonal, com a menor permeabilidade e chegando ao campo de 7000 Ae/m em 1,7 T. Este comparativo também se reflete nas perdas, ver Figura 29 (b), a qual apresenta 1,7 W/kg, no corte longitudinal, e 2,8 W/kg no corte diagonal, na indução de 1,7 T.

Constatou-se que tanto para a amostra N2 quanto para amostra N1, os resultados com melhor eficiência são obtidos em corte longitudinal e os piores em diagonal, tendo o material E230, da amostra N2, apresentado uma anisotropia mais acentuada que a outra amostra.



(a)



(b)

Figura 29. Ensaio para análise de anisotropia da amostra N2. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.

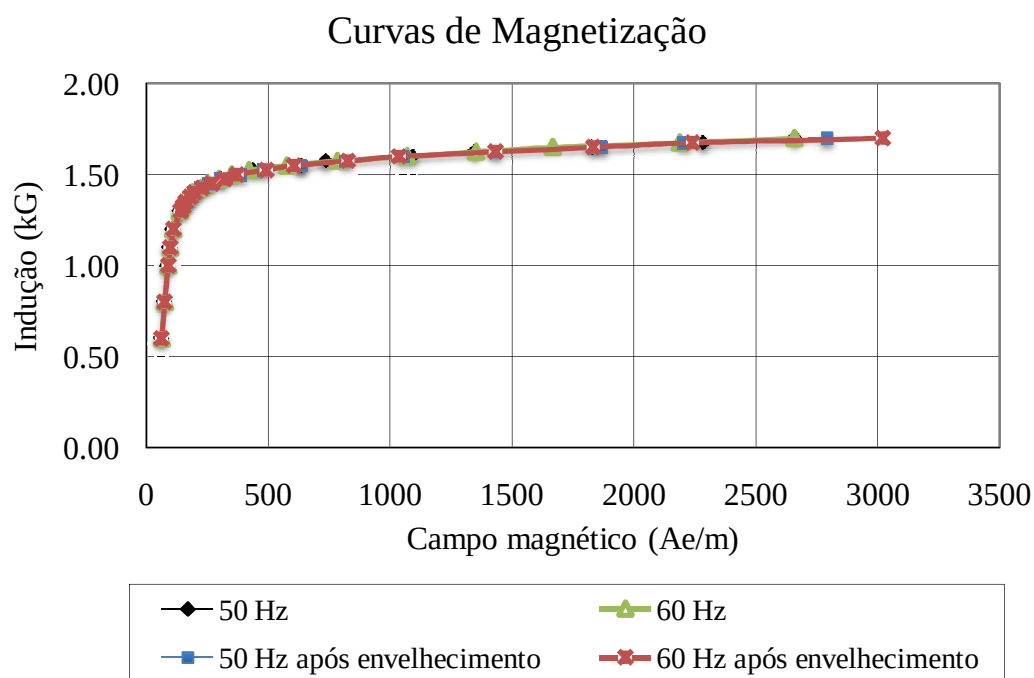
5.3 Influência do envelhecimento do material

O envelhecimento do material provoca o aumento das perdas, sendo importante estimar este valor. O envelhecimento tem como fatores mais significativos, o teor final de carbono e a velocidade no resfriamento final. O aumento das perdas não pode ultrapassar 5%, para os aços totalmente processados, quando ensaiados conforme a norma ABNT NBR NM 71:2000, num envelhecimento acelerado de 225°C por 24 horas.

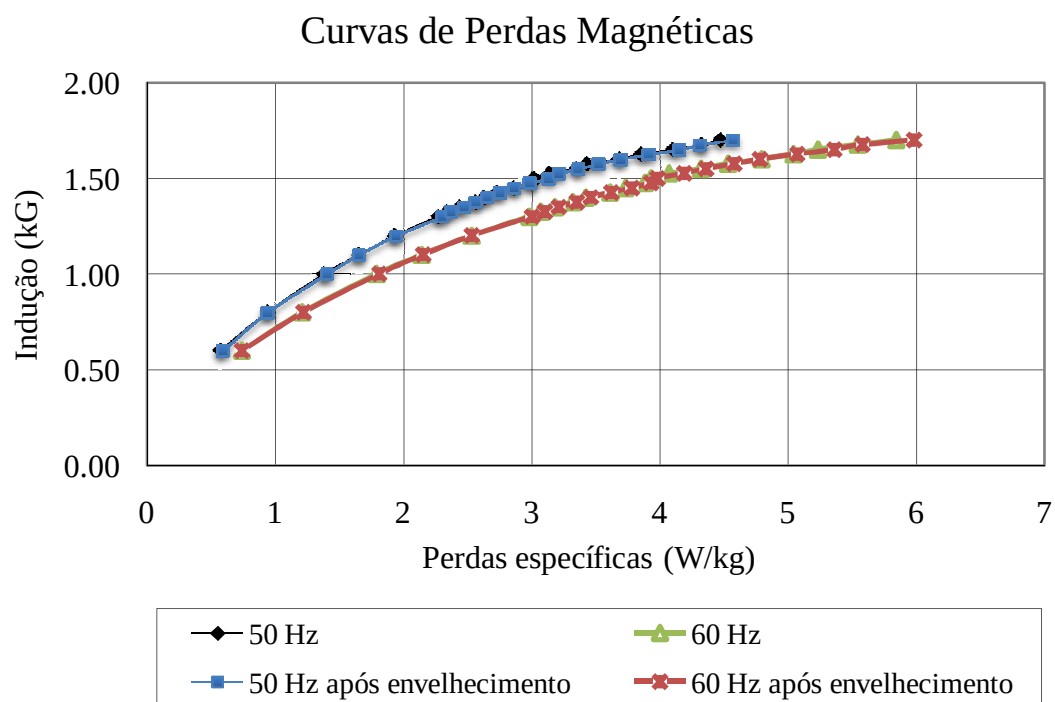
Para uma amostra 3, realizou-se ensaios em 50 e 60 Hz, antes e após o envelhecimento, para avaliar o efeito do envelhecimento. A Tabela 4 apresenta a diferença percentual entre as perdas magnéticas após o envelhecimento, em relação ao ensaio com amostras sem envelhecimento, tendo como erros máximos de 3,64 % em 50 Hz e 2,95 % em 60 Hz. Observa-se que as diferenças entre as perdas estão dentro dos 5% definidos pela norma Brasileira (NBR NM 71:2000, 2000). O ensaio é apresentado na Figura 30 (a) e (b), onde se observa um pequeno crescimento nas perdas e no campo magnético após a realização do envelhecimento do material.

Tabela 4 – Erro percentual antes e após o envelhecimento na amostra 3.

Indução (T)	Diferença em 50 Hz (%)	Diferença em 60 Hz (%)
0,60	3,51	0,00
0,80	0,00	0,83
1,00	1,45	1,12
1,10	0,00	0,47
1,20	0,52	0,00
1,30	1,32	0,67
1,33	1,28	0,98
1,35	1,23	0,94
1,38	0,00	0,90
1,40	0,76	1,17
1,43	0,73	0,28
1,45	0,00	1,34
1,48	-0,67	1,29
1,50	3,64	1,27
1,53	2,23	2,95
1,55	0,30	0,93
1,58	2,62	1,10
1,60	0,27	-0,21
1,63	1,56	0,60
1,65	1,22	2,49
1,68	-0,23	0,72
1,70	2,24	2,40
Máximo	3,51	2,95



(a)



(b)

Figura 30. Ensaio para análise do efeito do envelhecimento da amostra 3. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas.

5.4 Influência da frequência nas propriedades magnéticas dos materiais

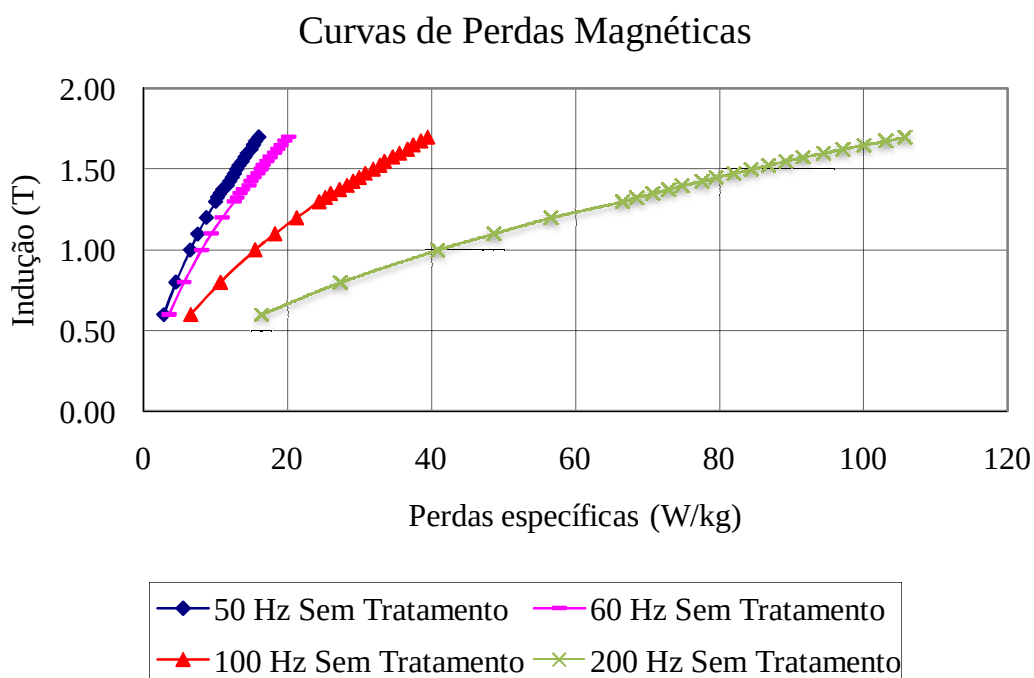
Respeitando o limite de indução de 1,7 T, podem-se obter resultados para uma faixa de frequência de 45 a 200 Hz. Os primeiros ensaios em alta frequência, comparam a influência do tratamento térmico nas amostras, sendo utilizada a amostra 4, sem tratamento térmico, e um segundo ensaio no mesmo conjunto de amostras, porém com tratamento térmico. As amostras 4 foram submetidas a ensaios nas frequências de 50, 60, 100 e 200 Hz.

Observa-se que há um crescimento acentuado das perdas magnéticas com o aumento da frequência, tanto em amostras sem tratamento térmico quanto para as com tratamento, cujos valores apresentam-se nas Figura 31 (a) e Figura 32 (a).

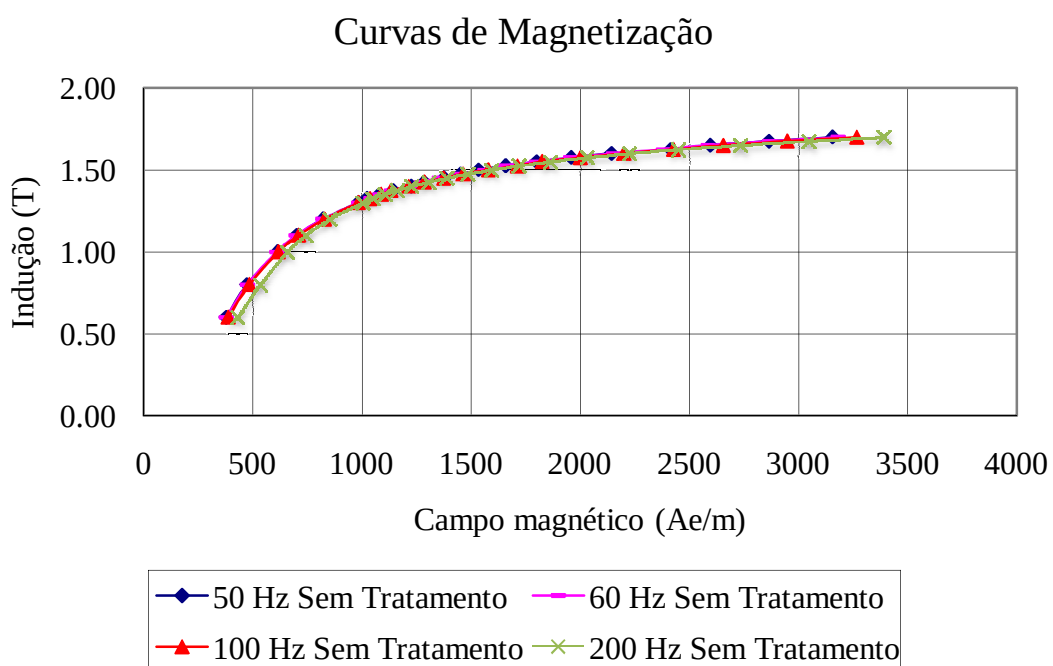
Analizando o mesmo ponto de indução, percebe-se que a diferença entre as perdas magnética, para diferentes frequências, se torna gradativamente maior com o aumento da indução. Nota-se que a diferença entre as perdas em 200 Hz e 50 Hz no primeiro ponto de indução (0,6 T) é inferior a 20 W/kg, no entanto para 1,7 T a diferença ultrapassa 80 W/kg. Dessa forma ficam claras as dificuldades envolvidas em se trabalhar no projeto de motores elétricos utilizando matérias em altas frequências.

Assim como nos ensaios em 50 e 60 Hz, nas frequências maiores há uma redução nas perdas magnética após o tratamento térmico, reduzindo as perdas em 1,7 T, a 100 Hz, de 40 W/kg para 29 W/kg (27,5 % do valor inicial) e em 200 Hz, de 108 W/kg para 90 W/kg (16,67 % do valor inicial).

Um comportamento interessante apresentado pela amostras sem tratamento, é que a curva de magnetização permanece praticamente igual, ver Figura 31 (b), com um pequeno aumento em 200 Hz, visível no início e no final da curva. Por outro lado, na Figura 32 (b), a curva de magnetização sofre deformações diferentes das apresentadas Figura 31 (b), principalmente no joelho de cada curva, reduzindo a declividade da curva, na região linear, com o aumento da frequência.



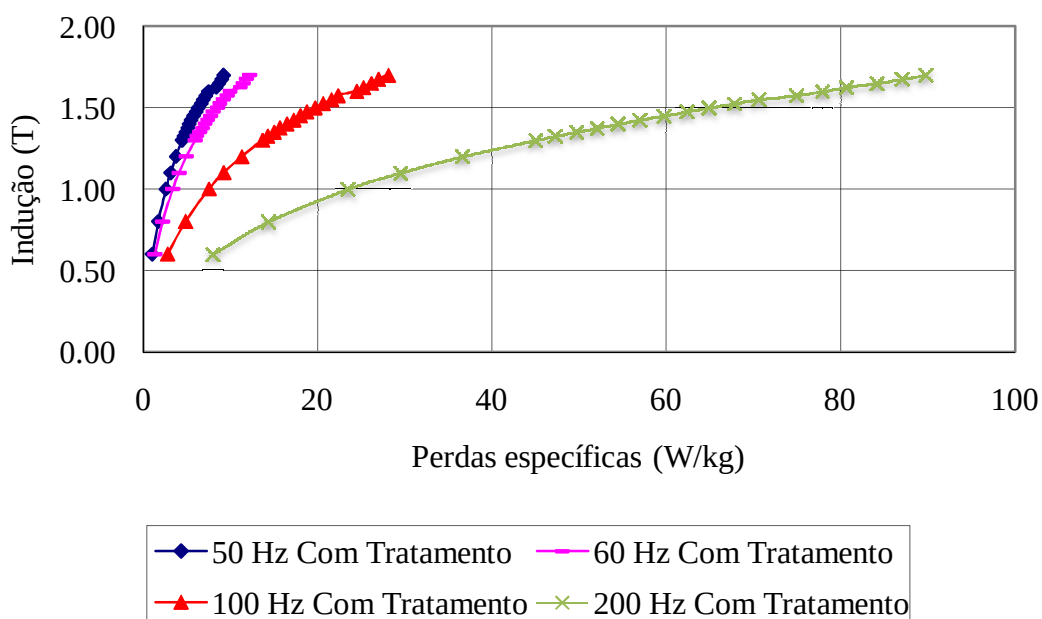
(a)



(b)

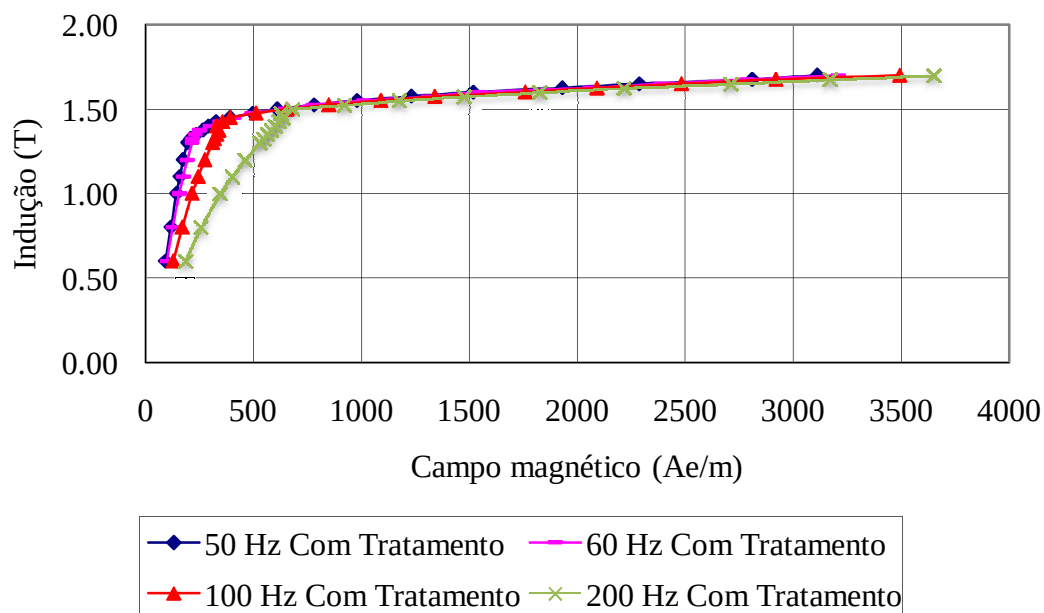
Figura 31. Ensaio para análise de amostras sem tratamento térmico em alta frequência, para amostra 4. Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.

Curvas de Perdas Magnéticas



(a)

Curvas de Magnetização



(b)

Figura 32. Ensaio para análise de amostras com tratamento térmico em alta frequência, para amostra 4 . Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.

Com o objetivo de medir valores intermediários, apresenta-se na Figura 33 os resultados de um ensaio realizado de forma sequencial para as frequências de 50, 100, 150 e 180 Hz, utilizando a amostra 5. Para estes ensaios foram pré-definidos 12 valores de indução (entre 0,6 e 1,7 T) sendo a fonte de tensão, que alimenta o circuito primário, automaticamente ajustado para obter os valores programados com uma tolerância de $\pm 0,1$ V. A Figura 33 (a) mostra a curva de magnetização do material e a Figura 33 (b), a curva de perdas específicas, ambas realizadas para diferentes frequências.

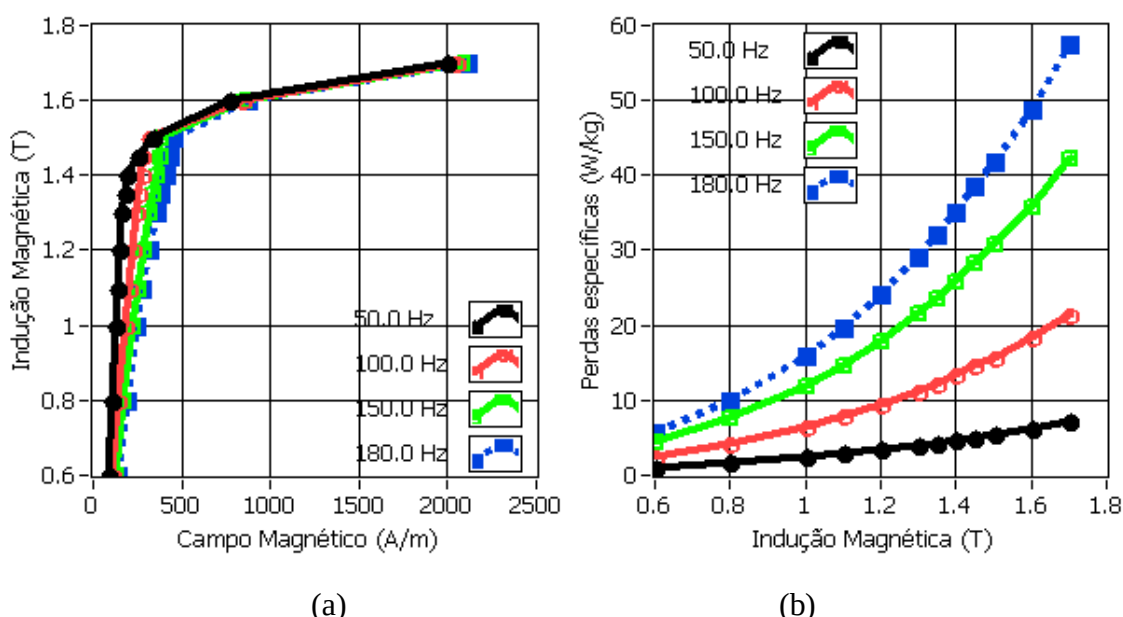


Figura 33. Ensaio sequencial para frequências fixas e induções variáveis, na amostra 5. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas específicas.

Para um mesmo material, observa-se que o comportamento das curvas de magnetização da Figura 33 (a) não é alterado de forma significativa com a variação da frequência.

Com o aumento da frequência, embora ocorra uma redução na permeabilidade do material (comprovada pela variação na declividade das curvas de magnetização no intervalo de 0 a 500 A/m), verifica-se que ocorre um deslocamento no joelho da curva, fazendo com que a saturação ocorra em valores mais elevados de H e B. Esta característica foi também observada em outras amostras de diferentes materiais de ferromagnéticos de GNO ensaiadas segundo mesmo procedimento.

No gráfico de perdas específicas, Figura 33 (b), é possível verificar o conhecido aumento das perdas com relação a variação da indução magnética e também um expressivo aumento das perdas com o crescimento da frequência. Observar que para frequências menores (até 60 Hz), o crescimento é quase linear enquanto que para frequências a partir de 150 Hz assume uma forma aproximadamente quadrática.

Outra forma de se avaliar o comportamento do material magnético é realizada através da variação em frequência ao longo do ensaio, para valores fixos de indução. Na Figura 34 (a) têm-se os resultados para a amostra 5, testada nas induções de 0,6, 0,7 e 0,8 T, com a frequência variando de 50 a 400 Hz. A limitação na indução em 0,8 T ocorre devido à alta tensão necessária para manter a indução para frequências acima de 200 Hz (saturando o transdutor de tensão utilizado).

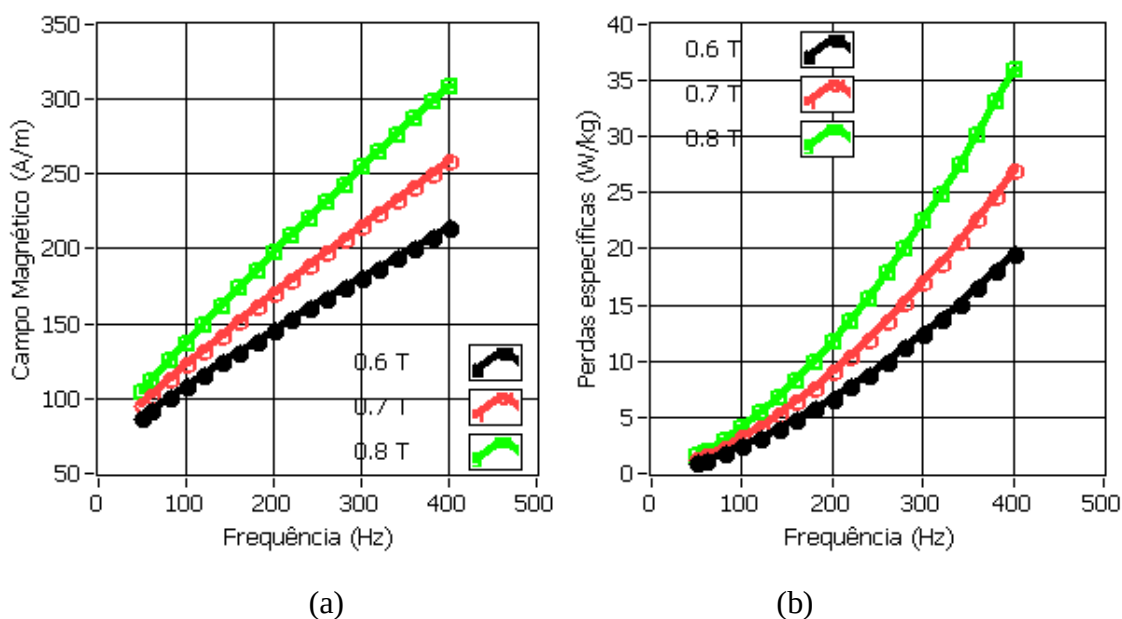


Figura 34. Teste sequencial para induções fixas e frequências variáveis ao longo do ensaio, na amostra 5. Tendo em (a) H versus frequência e em (b) a as perdas específicas versus a frequência.

Como se pode observar, na Figura 34 (a) há um crescimento quase linear do campo magnético com relação ao aumento da frequência. Vale salientar que o valor de indução ajustado para as três curvas é relativamente baixo para o aço magnético utilizado, estando este abaixo do joelho de saturação. De forma semelhante ao comportamento visualizado na Figura 33 (a), percebe-se na Figura 34 (a) uma redução da permeabilidade, pois para manter um determinado valor de indução é necessário aumentar o campo magnético quando a frequência é elevada. Por exemplo, para manter 0,8 T na frequência de 100 Hz, é necessário um campo de 137 A/m; na frequência de 400 Hz, é necessário um campo de cerca de 310 A/m.

Na Figura 34 (b) observa-se de forma bastante explícita o crescimento das perdas específicas com relação ao aumento da frequência, para valores definidos de indução magnética. Nota-se um comportamento polinomial, com expoentes crescentes à medida que a indução aumenta. Observar que as informações apresentadas na Figura 34 (b) complementam aquelas mostradas na Figura 33 (b), na qual a frequência varia apenas até 180 Hz.

5.4.1 Influência da frequência na distorção harmônica e na saturação

Outro comportamento interessante é a distorção da forma de onda da corrente do primário e da tensão induzida no secundário, provocado pela saturação do material ao longo dos ensaios. A quantificação desta distorção foi realizada através da THD da corrente primária e da THD de tensão secundária, obtidas diretamente pelo processamento dos sinais adquiridos nos ensaios da amostra 5, cujas características magnéticas estão apresentadas na Figura 33 (a) e (b).

A Figura 35 mostra o aumento da THD de corrente e de tensão quando o campo e a indução magnética são variados e a frequência é mantida constante. Observa-se que a THD da corrente de magnetização na Figura 35 (a) e (b) mostram uma acentuada distorção e que esta apresenta redução com o aumento da frequência. Por outro lado, a THD da tensão secundária da Figura 35 (c) e (d) é bastante reduzida, sendo inferior a 6 %, mantendo a redução com o aumento da frequência. Ainda, pode ser verificado que existe semelhança entre o comportamento da THD da corrente e da tensão, com relação à variação do campo e da indução.

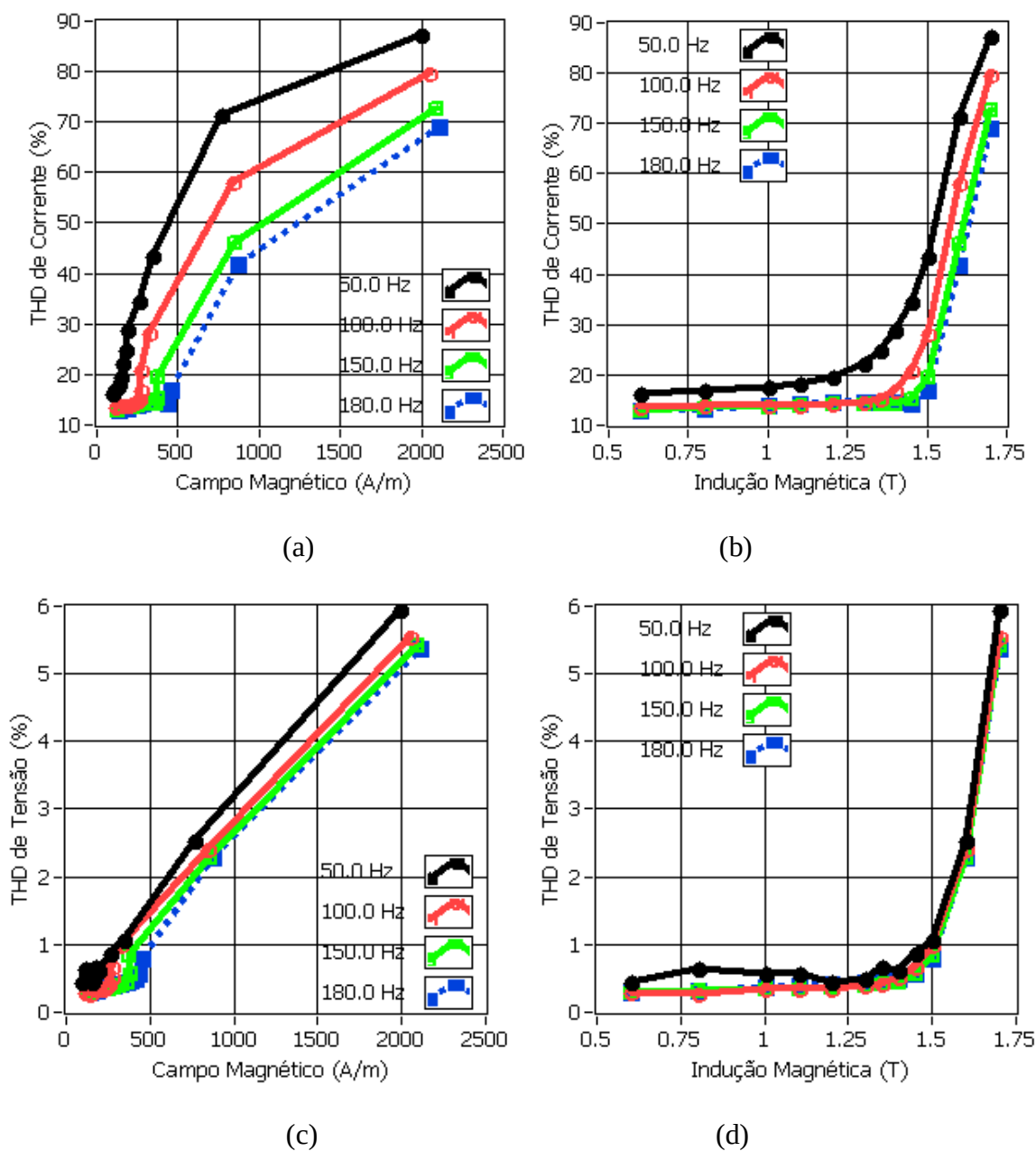


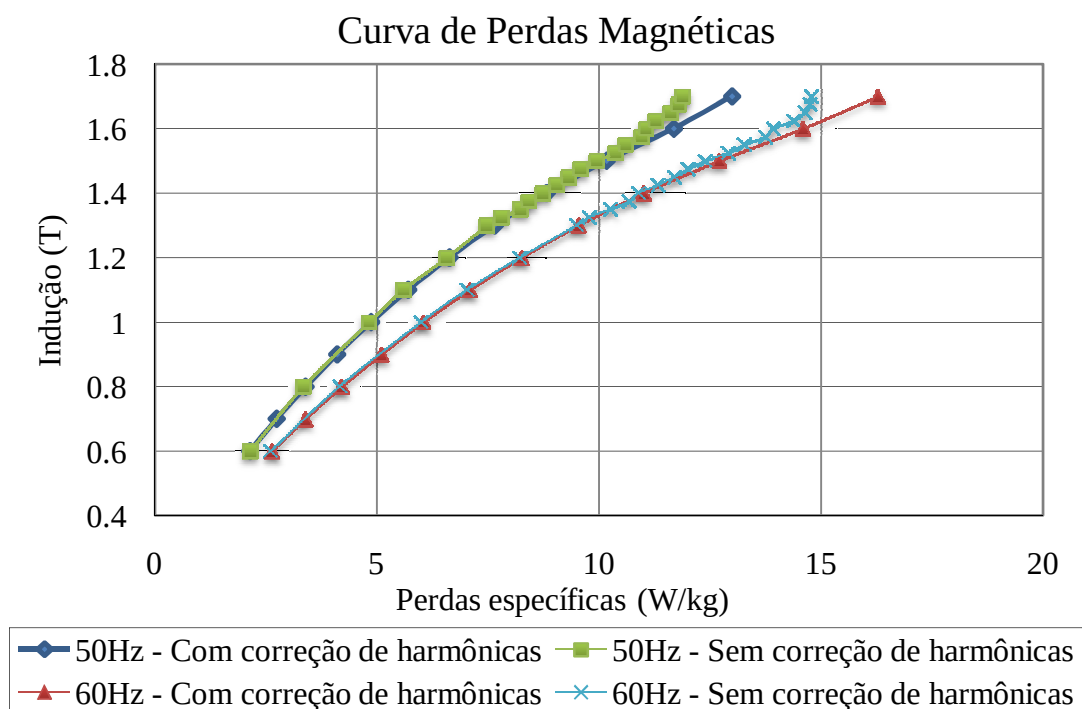
Figura 35. Avaliação da THD ao longo de ensaio sequencial em frequências fixas e induções variáveis, na amostra 5. Sendo apresentadas em (a) a THD de corrente versus H , em (b) a THD de corrente versus B , em (c) a THD de tensão versus H e em (d) a THD de tensão versus B .

5.5 Ensaaios com correção de harmônicas

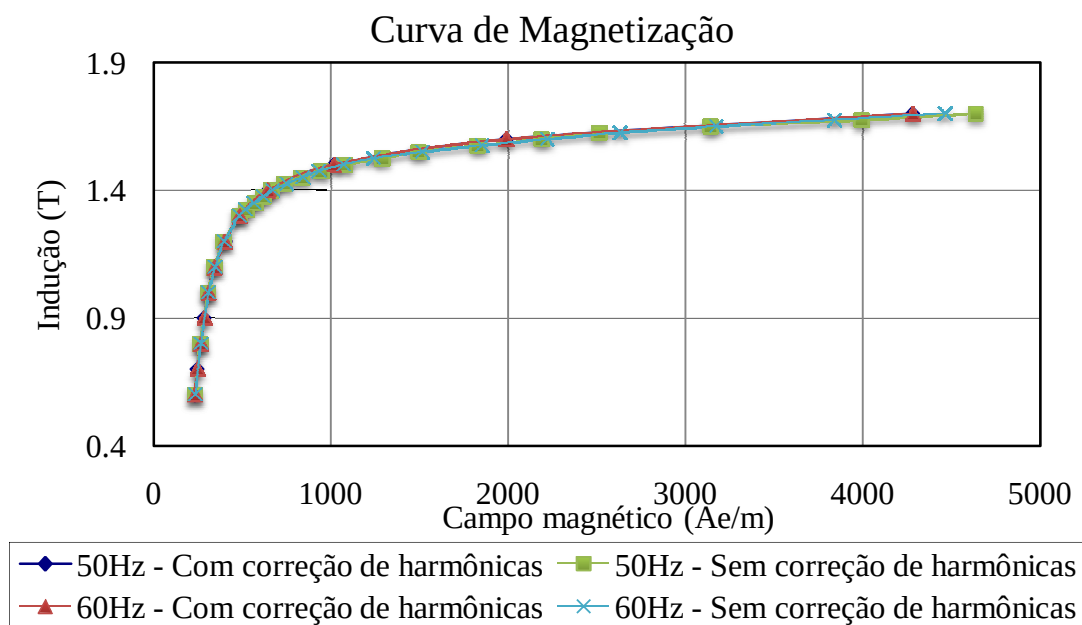
O procedimento para cancelamento de harmônicos e correção da tensão do secundário é detalhado no Capítulo 4, seção 4.2. No entanto, a comparação entre ensaios com e sem correção de harmônicos são apresentados nesta seção. Quando não se utiliza a correção de harmônicos, considera-se as aproximações matemáticas propostas pela norma NBR 6151, detalhada no Capítulo 3, seção 3.2.

Neste ensaio, utiliza-se a amostra 6, sem tratamento térmico, em 50 e 60 Hz, sendo comparados os resultados obtidos com a correção de harmônicas e os resultados sem a correção de harmônicas, conforme mostra a Figura 36 (a) e (b).

Observa-se na Figura 36 (a) que existe uma pequena diferença entre as curvas com e sem correção de harmônicas a partir de 1,5 T. Isto acontece tanto em 50 Hz quando em 60 Hz, justamente na região em que a saturação e a distorção harmônica são maiores, sendo bem observável na região entre 1,6 e 1,7 T. Apesar de o erro ser evidente, não é tão preocupante, pois na grande maioria dos estudos, a região de interesse está antes da saturação. Já na curva de magnetização, representada pela Figura 36 (b), observa-se um comportamento bastante similar, porém com campo magnético um pouco superior nos ensaios sem correção de harmônicos. Trata-se da presença dos harmônicos, os quais provocarem um aumento na corrente e por consequência no campo magnético. Porém, pelo fato de se considerar as perdas em regime senoidal, a estimativa proposta pela norma NBR 6151 acaba gerando uma pequena diferença com relação ao processo de correção de harmônicas.



(a)



(b)

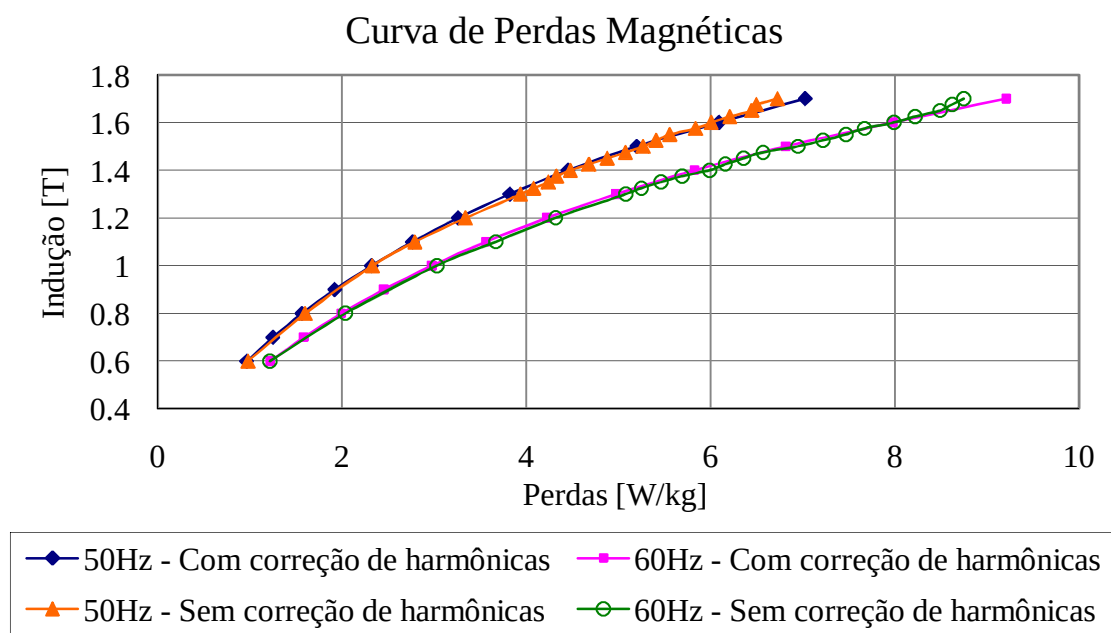
Figura 36. Comparação das perdas magnéticas em ensaio com correção de harmônicos e com correção matemática para amostra 6, sem tratamento térmico. Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.

A Tabela 5 apresenta a diferença percentual encontrada para os ensaios em 50 e 60 Hz em relação às perdas magnéticas e em relação ao campo magnético, tendo como maior diferença percentual nas perdas magnéticas em 1,7 T, com 8,59 % em 50 Hz e 9,19 % em 60 Hz.

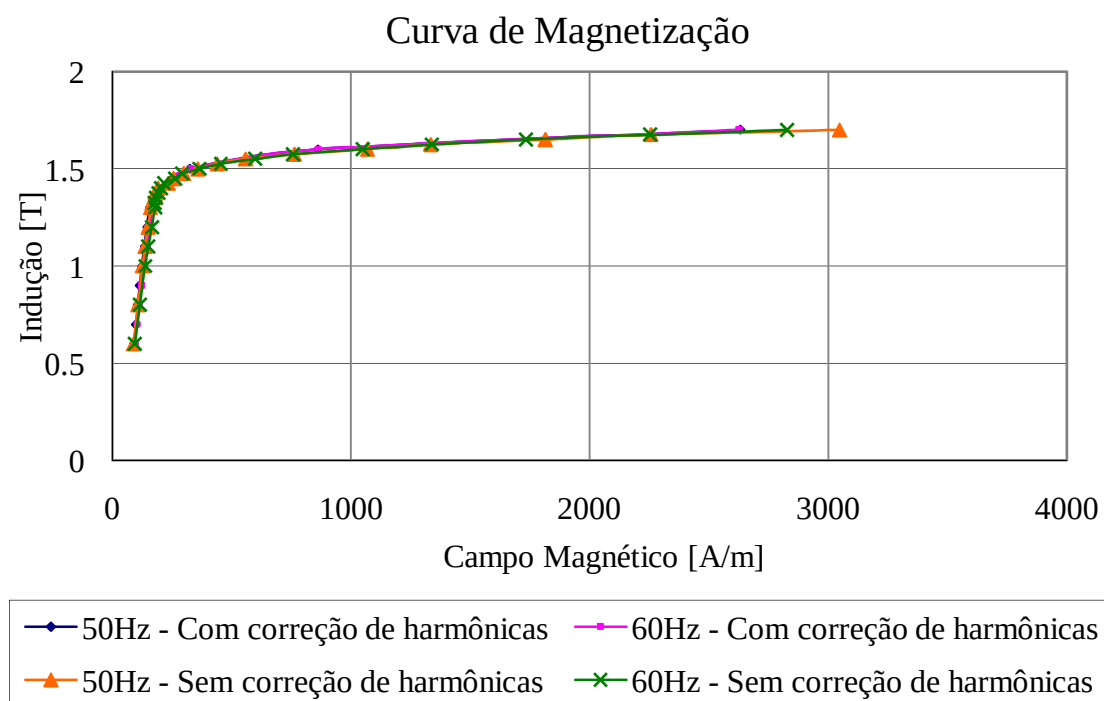
Tabela 5 – Diferença percentual entre ensaios com e sem correção de harmônicas para amostra 6.

Indução (T)	Diferença Perdas em 50 Hz (%)	Diferença Perdas em 60 Hz (%)	Diferença Campo em 50 Hz (%)	Diferença Campo em 60 Hz (%)
0,60	0,03	1,19	-0,42	-0,66
0,80	1,47	1,06	-0,11	-0,19
1,00	0,93	0,81	0,01	-0,23
1,10	1,98	0,87	-0,05	-0,61
1,20	0,90	0,45	1,18	1,09
1,30	2,24	0,47	0,16	0,19
1,40	1,00	1,08	-3,14	-4,05
1,50	2,28	2,44	-6,20	-5,45
1,60	5,36	4,56	-9,97	-11,55
1,70	8,59	9,19	-8,30	-4,25

Por outro lado, fica evidente que tal diferença ocorreu pelo fato de se tratar de uma amostra sem tratamento térmico e com altas perdas magnéticas. Em aços mais eficientes essa diferença é reduzida, como mostra a Figura 37, os resultados do ensaio após a realização do tratamento térmico na amostra 6, no qual se obteve como maior diferença percentual em 1,7 T, apenas 4,99 % em 60 Hz e de 4,2 % em 50 Hz.



(a)



(b)

Figura 37. Comparação da forma de onda de tensão, antes e depois da correção dos harmônicos na amostra 6, após o tratamento térmico. Sendo (a) a curva de perdas e (b) a curva de magnetização.

5.6 Interface com o usuário

Os resultados obtidos durante todos os ensaios são acompanhados e analisados em tempo real. Uma das telas do software desenvolvido é apresentada na Figura 38. Observa-se na primeira curva, a corrente de magnetização, com alto nível de distorção, conforme ilustrado no primeiro gráfico de barras, o qual mostra as componentes harmônicas da corrente, sendo o primeiro termo o nível CC, o qual é zero, seguida pela harmônica fundamental e tendo grandes parcelas da 3ª, 5ª e 7ª harmônicas. Por outro lado, em função da simetria, as componentes pares são nulas.

No segundo gráfico, tem-se a curva de tensão no secundário, no qual se verifica a distorção da forma de onda de tensão, onde se observam no segundo gráfico de barras a harmônica fundamental e pequenas parcelas da 3ª e 5ª harmônicas. É apresentada também a curva $B-H$, para uma indução de 1,7 T calculada instantaneamente em função da corrente e da tensão medidas.

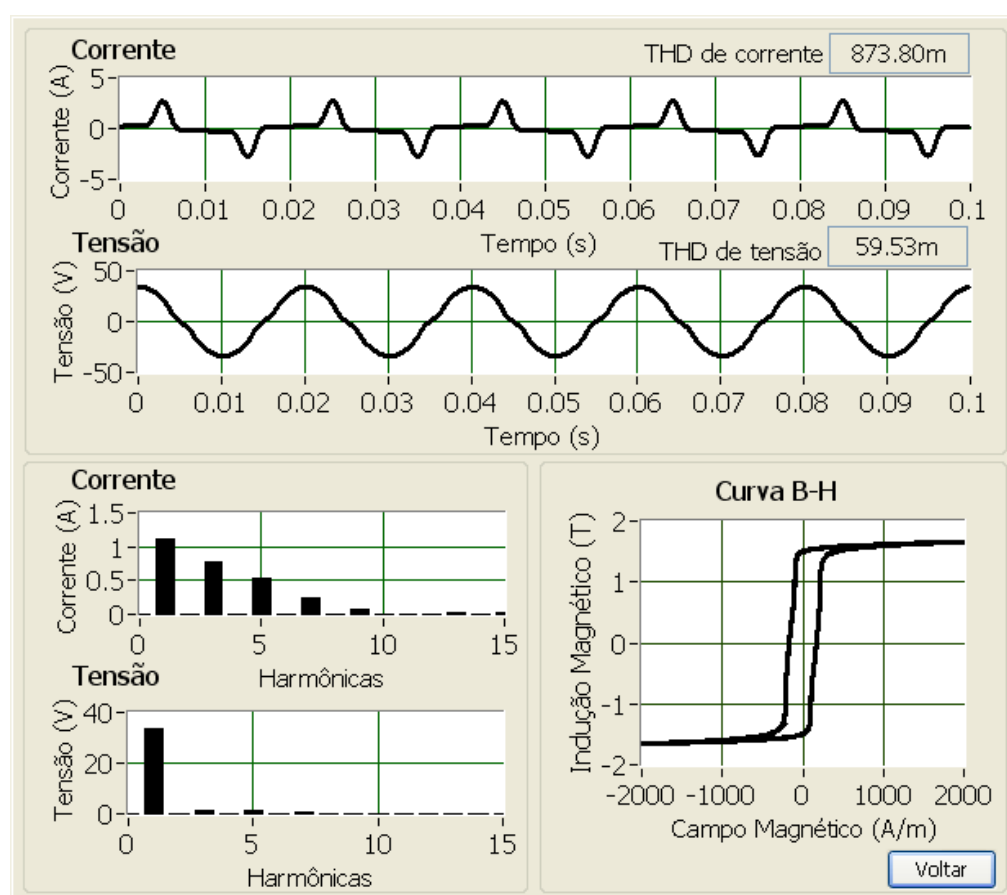
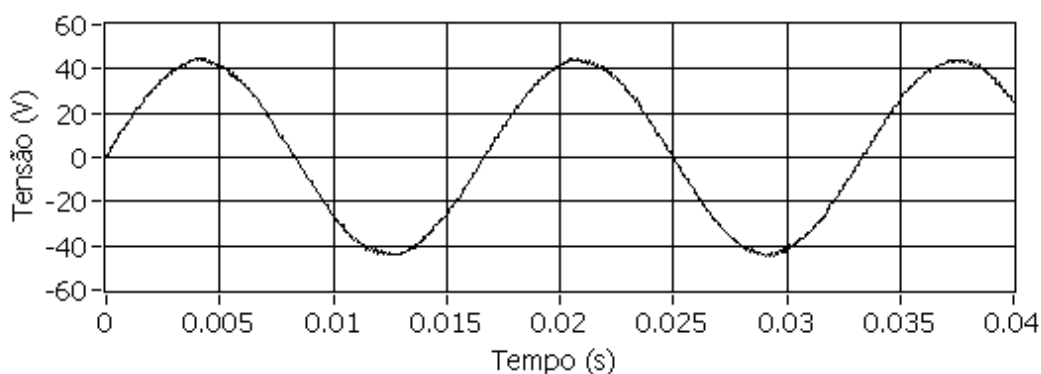
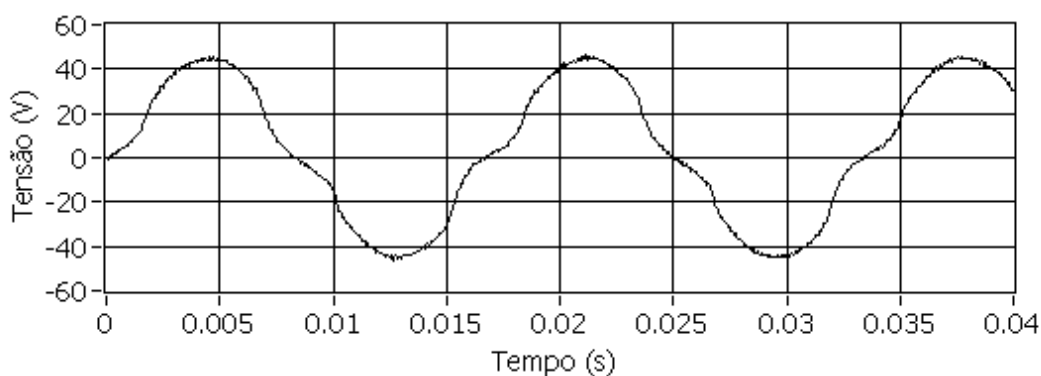


Figura 38. Tela do *software* para acompanhamento de ensaios. Sendo medido na indução de 1,7 T.

Quando aplicado ao primário um sinal de tensão gerado pela fonte CA, com valor em RMS de 31,05 V, apresentado na Figura 39 (a), observa-se o sinal de tensão resultante no secundário, com valor RMS de 30,62 V e THD de 12,76 %, apresentado na Figura 39 (b), antes da correção de harmônicos. Pelo formato da onda no secundário, percebe-se que a saturação é bastante elevada, resultando em aproximadamente 1,75 T de indução.



(a)



(b)

Figura 39. Sinal de tensão gerado pela fonte CA. Sendo (a) a leitura do sinal no primário e (b) o sinal no secundário do quadro de Epstein.

Para se corrigir o sinal de tensão no secundário é necessário estimar as componentes harmônicas, em módulo e fase, conforme apresentadas na Tabela 6, sendo necessário defasá-los em 180° para que o cancelamento seja realizado. Como a fonte CA tem como faixa de frequência 0 a 360° para configuração da fase, deve-se normalizar os valores acima de 360° , conforme apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Decomposição do sinal em módulo e fase.

Harmônicas	Frequência (Hz)	Módulo (Hz)	Fase (graus)	Fase +180°	Fase +180° (normalizado)
3ª	180	4,17	108,84	288,84	288,84
5ª	300	3,25	205,72	385,72	25,72
7ª	420	0,95	-57,15	122,85	122,85
9ª	540	0,63	196,04	376,04	16,04

Após encontrar as componentes harmônicas, defasá-las de 180° e normalizá-las, deve-se acrescentá-las à tensão aplicada ao primário para que o cancelamento seja ocorrido. Dessa forma, percebe-se uma grande mudança na forma de onda de tensão no secundário, conforme Figura 40, sendo a THD reduzida para 2,12 %.

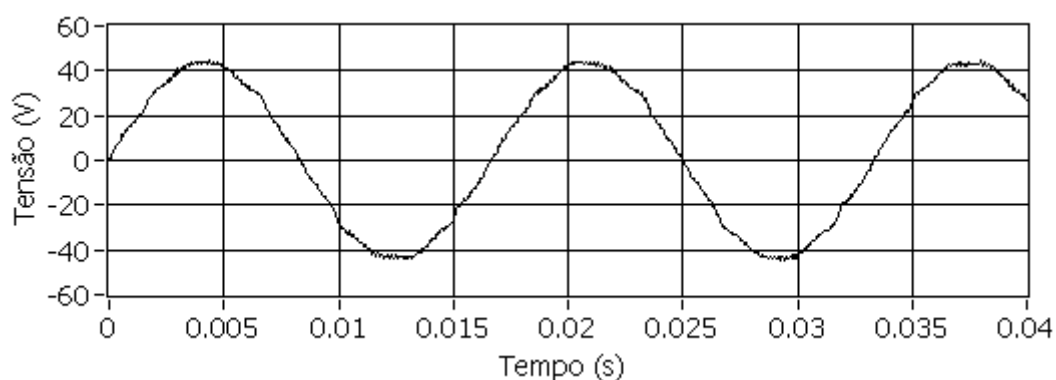
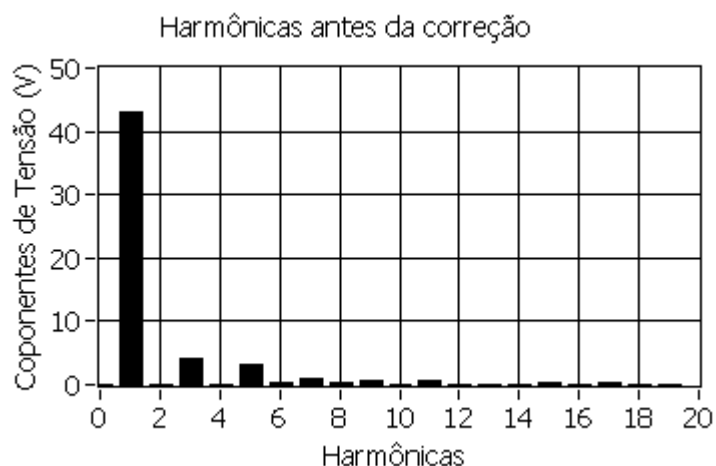
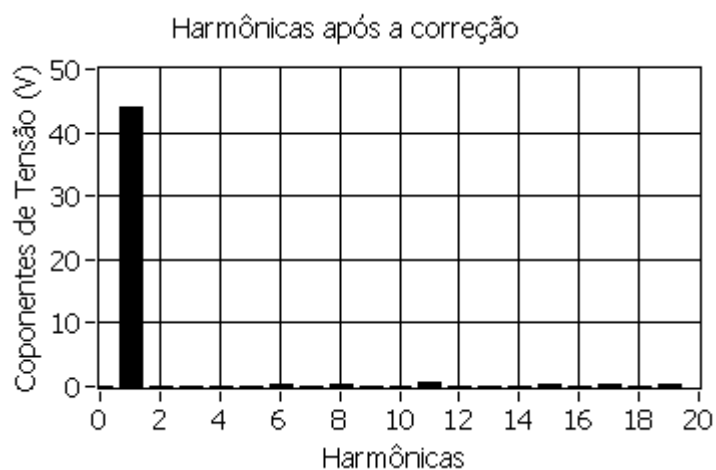


Figura 40. Sinal de tensão do secundário após o cancelamento de harmônicos.

De forma comparativa é apresentado na Figura 41, as componentes harmônicas antes da correção e após dos harmônicos, sendo verificado que as componentes de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem presentes antes da correção, ver Figura 41 (a), tiveram seu efeito reduzido, comprovado na Figura 41 (b), a qual mostra as componentes após o cancelamento de harmônicos.



(a)



(b)

Figura 41. Componentes harmônicas do secundário. Sendo (a) sem cancelamento de harmônicos e (b) após o cancelamento de harmônicos.

Devido as não linearidades do material nessa região de operação, pode ser necessário algumas iterações para que o processo de cancelamento ocorra completamente, pois a harmônica estimada para ser reinserida no primário pode sofrer distorção. O processo de cancelamento de harmônicos deve ser executado até que os limites aceitáveis para a distorção harmônica sejam alcançados.

O processo de avaliação do sinal era feito através da comparação ao fator de forma de uma onda senoidal pura, pois era a forma de lidar com instrumentos antigos, sendo importante avaliar este parâmetro no processo de correção de harmônicos. Ao se calcular o fator de forma obteve-se 1,172 para o sinal sem correção de harmônicos, representado pela Figura 39 (b), e 1,109 após a correção de harmônicos, conforme mostra a Figura 40. Segundo a norma NBR 6151, quando $FF > 1,11 \pm 1 \%$ torna-se necessário a correção através da equação (3.8) para obtenção das perdas magnéticas, sendo ainda melhor que a correção aconteça diretamente no próprio sinal de entrada através de realimentação do sistema. Visto que após a correção de harmônicos obteve-se $FF < 1,11 \pm 1 \%$, o cálculo das perdas pode ser obtido diretamente através da equação (3.7), pois se considera o sinal como senoidal.

5.7 Considerações Finais

Uma série de resultados é discutida neste capítulo. Tendo como resultados importantes, as melhorias que o tratamento térmico pode gerar nas amostras, a forte influência nas perdas magnéticas sofridas pelo aumento da frequência, a possibilidade de eliminar o conteúdo harmônico provocado pela saturação do material, desde que seja realmente necessário e a possibilidade de se realizar um mapeamento para entender o comportamento anisotrópico em materiais de GNO.

As principais conclusões referentes ao estudo são apresentadas neste capítulo, sendo justificados os pontos fortes da pesquisa elaborada e as dificuldades encontradas, que sugerem novas perspectivas para trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A solução proposta apresentou resultados coerentes com padrões do mercado, tendo como vantagens a precisão, repetibilidade, o baixo custo e a grande faixa de variação em frequência. Outro importante resultado é possibilidade de geração das curvas de magnetização, a curva de perdas e o acompanhamento da curva $B-H$ em tempo real, assim como a THD de tensão e a THD de corrente que também podem ser visualizadas, conforme apresentado na Figura 38.

O *software* desenvolvido apresentou boa usabilidade, sendo possível o cadastro de novos modelos de chapas, para reutilização posterior, e a visualização de resultados anteriores. Podem ser realizados ensaios de forma sequencial para uma mesma amostra, no qual é necessário configurar o número de ensaios e a sequência, podendo-se optar por um conjunto de curvas em diferentes frequências ou induções, facilitando a análise da região de interesse.

Uma ferramenta importante, utilizada com muita frequência, consiste em carregar ensaios já realizados, tanto o cadastro quanto os resultados, para uma possível comparação com os novos ensaios. Dessa forma, após finalizar o ensaio, neste conjunto de resultados estão contidos o ensaio atual e o ensaio anterior. Este procedimento foi muito importante para que fossem realizados ensaios comparativos com amostras sem tratamento térmico e, após a realização do tratamento térmico, em amostras com tratamento térmico, sendo aplicado também em análises de envelhecimento. Nesse processo os resultados antigos são anexados aos novos ensaios de forma automática, facilitando sua análise. Este procedimento também permite que os ensaios finalizados possam ser reiniciados em outro dia.

Neste trabalho ficou clara a impotência do tratamento térmico nas amostras, pois além de reduzir as perdas magnéticas, melhoram a eficiência do material em função do aumento da declividade da curva de magnetização e reduzindo o campo magnético de forma expressiva na região que antecede o joelho da curva.

Verificou-se que as amostras de aço silício com GNO são anisotrópicas, e os resultados que apresentaram maior diferença em função do corte das chapas foram os longitudinais, com melhor eficiência, e diagonais, com pior eficiência entre os ensaios realizados.

É importante ressaltar que durante a realização de ensaios em frequências superiores a 60 Hz, a tensão imposta para manter a indução requerida é elevada. Por outro lado, em baixas frequências, a corrente cresce e o limite do quadro necessita ser observado. Desta forma, a instrumentação empregada na aquisição da tensão e da corrente deve ser adequada para toda a faixa de interesse. Neste trabalho, a tensão do secundário ficou limitada ao transdutor de 100 V, apresentando resultados coerentes na faixa de 0 a 1,7 T e 45 a 200 Hz. Optando-se por induções menores, de 0 a 0,8 T, pode-se chegar a variações na frequência de 0 a 400 Hz.

Outro resultado importante foi encontrado durante a comparação entre o método de correção das perdas em função do fator de forma, proposto pela norma NBR 6151 e pelo método de correção das perdas pelo cancelamento de harmônicos. Verificou-se que a partir de 1,5 T a correção pelo fator de forma não é suficiente e que para se analisar com confiança induções maiores que 1,5 T, o cancelamento de harmônicos pode ser importante. Porém para aços eficientes e nas proximidades do joelho da curva, a correção de harmônicos pode ser descartada, quando o nível de distorção for pequeno.

A diferença entre os métodos de cálculo das perdas é maior para amostras sem tratamento térmico, aproximadamente 9 % em 60 Hz, sendo reduzidas para 5 % em amostras com tratamento térmico e por consequência mais eficientes.

Por fim acredita-se que este estudo cumpriu os objetivos formulados no início deste trabalho, envolvendo o desenvolvimento de um sistema para teste de Epstein, a análise em altas frequências e a correção de harmônicas, sendo analisados ao longo dos ensaios anisotropia e o tratamento de térmico em diversas amostras. Acredita-se que por ser um trabalho pioneiro nesta área dentro do grupo de pesquisa nPEE, apresentou algumas limitações, mas por outro lado, pode abrir oportunidades para trabalhos futuros.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma das principais limitações da pesquisa encontra-se no tempo de ensaio, que ainda é muito grande, em torno de cinco minutos por curva. Isto acontece devido à necessidade da malha de realimentação de tensão exigir algumas iterações para o ajuste da tensão do secundário. Por se tratar de uma comunicação com uma fonte CA via protocolo, acredita-se que por mais que melhorias sejam feitas na malha de controle, o protocolo continuaria sendo um limitante. Dessa forma são propostos:

- projetar um controlador de forma a reduzir o número de iterações da malha de controle. Podendo ser analisado a possibilidade de considerar o protocolo de comunicação como atraso, levantando-se planta e resolvendo o problema de atraso através de um Preditor de Smith;
- utilizar uma fonte de tensão como amplificador, de forma que o sinal seja gerado através de uma saída analógica, pela placa de aquisição de dados, tendo como atraso somente o circuito de potência;
- realizar um comparativo entre fabricantes de aços, de forma a identificar os aços com melhor eficiência e qualidade em cada faixa. O levantamento de custo também seria interessante; e
- projetar e construir um quadro de Epstein, devido à grande deficiência do mercado para esse tipo de tecnologia. Apesar da maioria dos quadros de Epstein, existentes no Brasil, terem sido desenvolvidos pela empresa Yokogawa, esta já não fabrica mais este tipo de produto, sendo necessário adquiri-lo de empresas estrangeiras como a Brockhaus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTUS. Inversores de Frequência. **Altus**, 2007. Disponível em: <http://altus.com.br/ftp/Public/Portugues/Altus%20Institucional/Informativo_I&A/I&a63.pdf>. Acesso em: 5 Março 2010.

ASTM-A343. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**. Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter- Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame. [S.l.]: [s.n.]. 1997.

BATISTELA, N. J. **Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

BENEVIDES, D. T. Efeito do Revestimento C-4 na Resistencia a Corrosão do Aço Silício de Grao Não Orientado. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, 2006.

CARDOSO, R. F. D. A. **INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO E DAS ADIÇÕES DE Al E Mn NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO COM 3%Si**. Dissertação (Mestre em Ciência dos Materiais). Rio de Janeiro, INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. 2005.

CASAROTTO FILHO, N. **Gerência de projetos/engenharia simultânea**. São Paulo: Atlas, 1999.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS**. 2ª. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

FUKUHARA, M.; YONAMINE, T.; MISSELL, F. P. REFERENCE MATERIAL FOR MAGNETIC MEASUREMENTS IN EPSTEIN FRAME. **XVIII IMEKO WORLD CONGRESS**, 2006.

IEC404-2. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**. Magnetic Materials - Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame. [S.l.]: [s.n.]. 1996.

JIS-C-2550. **JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD**. Test Methods for Magnetic Steel Sheet and Strip. [S.l.]: [s.n.]. 2000.

KOPRIVICA, B.; MILOVANOVIC, A.; DJEKIC, M. Determination of Characteristics of Ferromagnetic Material using Modern Data Acquisition System. **SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING**, 2009. 451-459.

KRAUSE, P. C.; WASYNEZUK, O. **Eletromechanical Motion Devices**. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1989.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. In: BOTT, I.; RIOS, P.; PARANHOS., R. **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos**. Rio de Janeiro: I. Bott, 2002. p. 109-128.

LEM. Closed Loop Transducers with small footprint up to 100 A nominal. **LEM Electronic Components**, 2001. Disponível em: <http://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1_5_1_industry/NEU_CH99102.pdf>. Acesso em: 20 Novembro 2010.

MENDES, F. B. R. **Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas**. Dissertação (Mestre em Engenharia). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

MEURER, E. J. **ESTUDO DAS PERDAS MAGNÉTICAS INTERLAMINARES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**. Dissertação (Mestre em Engenharia). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

MTHOMBENI, L. T.; PILLAY, P. Core Losses in Motor Laminations Exposed to High-Frequency or Nonsinusoidal Excitation, 40, 2004.

MUSSOI, F. L. R. Fundamentos de Eletromagnetismo. **PORTAL WIKI DO INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA**, 2007. Disponível em: <http://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/8e/Apostila_Eletromagnetismo_CEFET.pdf>. Acesso em: 7 Novembro 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS. Virtual Instrumentation. **NI Developer Zone**, 2009a. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4752>>. Acesso em: 10 junho 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS. NI LabVIEW. **National Instruments**, 2009b. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/>>. Acesso em: 10 Junho 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS. NI DAQ Software Features and Technologies. **NI Developer Zone**, 2009c. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8243>>. Acesso em: 01 Março 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS. SCB-68 User Manual for Advanced Functions. **NI SCB-68 Manuals**, 2009d. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/372551a.pdf>>. Acesso em: 8 Novembro 2010.

NBR NM 71:2000. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Produtos planos de aço para uso elétrico, de grão não orientado, totalmente processados. Rio de Janeiro: ABNT. 2000. p. 13.

NBR-6151. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – verificação das propriedades. Rio de Janeiro: ABNT. 1996.

PAUL, C. R. **Introduction to Eletromagnetic Compatibility**. New Jersey: Wiley, 2006.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **DIGITAL SIGNAL PROCESSING Principles, Algorithms, and Applications**. 3^a. ed. New Jersey: Prentice-Hall International, 1996.

RASHID, M. H. (Ed.). **POWER ELECTRONICS HANDBOOK**. [S.l.]: ACADEMIC PRESS, 2001.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SANTOS, J. P. **Influência do Ângulo de Corte e da Anisotropia nas Propriedades Magnéticas dos Aços Elétricos - O Efeito Textura**. Dissertação (Mestre em Engenharia). Uberlândia, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. 2005.

SINNECKER, J. P. Materiais Magnéticos Duros e Materiais Ferromagnéticos Amorfo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. vol. 22, no. 3. Rio de Janeiro, 2000.

SOARES, M. A. Eletricidade e eletromagnetismo. **MSPC - Artigos e informações técnicas**, 2008. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/elemag>>. Acesso em: 10 Junho 2008.

WEG. Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG. **Weg Equipamentos Elétricos**, 2007. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/2-2207.pdf>>. Acesso em: 05 Março 2010.

ZEID, I. **CAD/CAM theory and practice**. New York: McGraw-Hill, 1991.

Neste anexo são apresentados conceitos introdutórios referentes a grandezas elétricas e magnéticas, que servem como embasamento teórico para as sessões subsequentes. Entre os principais conceitos tem-se, força, campo elétrico, campo magnético, indução magnética e as equações de Maxwell, as quais servem de base para inúmeras aplicações relacionadas ao eletromagnetismo.

A.1 Grandezas elétricas

A lei de Coulomb foi formulada em 1785 pelo francês Charles Augusto Coulomb, tratando da força que uma carga pontual exerce em outra carga pontual. A lei de Coulomb estabelece que a força (F) entre duas cargas pontuais Q_1 e Q_2 é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância R entre elas (SADIKU, 2004), sendo dada por:

$$\vec{F} = \frac{kQ_1Q_2}{R^2} \hat{R}, \quad (\text{A.1})$$

Esta força pode ser de atração (sinais opostos) ou repulsão (sinais iguais) dependendo do sinal das cargas, sendo seu sentido dado pelo vetor $\hat{R}$ de acordo com o sinal das cargas, conforme ilustrado na Figura 42.

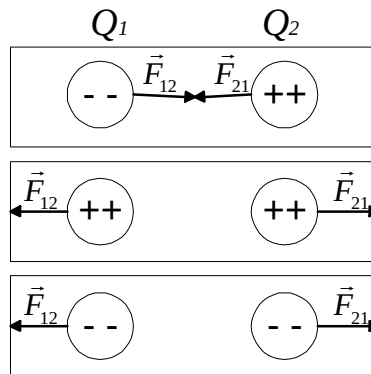


Figura 42 – Sentido e direção das forças que atuam em cargas pontuais (SOARES, 2008).

A intensidade de campo elétrico $\vec{E}$ é uma grandeza vetorial, na mesma direção de $\vec{F}$, sendo dada pela força por unidade de carga imersa nesse campo elétrico (SADIKU, 2004):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}. \quad (\text{A.2})$$

A partir da intensidade de campo elétrico, tem-se a densidade de campo elétrico, definida como (SADIKU, 2004):

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (\text{A.3})$$

Através do cálculo da divergência da densidade de campo elétrico, tem-se a densidade volumétrica de carga ρ_v e primeira equação de Maxwell (SADIKU, 2004) (PAUL, 2006):

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v. \quad (\text{A.4})$$

Outra equação de Maxwell estipula que o rotacional de um campo $\vec{E}$ é nulo, em uma trajetória fechada, implicando que uma carga ao se deslocar em uma superfície fechada não realiza trabalho (SADIKU, 2004; PAUL, 2006):

$$\nabla \times \vec{E} = 0. \quad (\text{A.5})$$

A densidade de corrente em um dado ponto é definida como a corrente que circula através da área unitária normal àquele ponto (SADIKU, 2004), ou seja:

$$\vec{J} = \frac{\Delta \vec{I}}{\Delta S}. \quad (\text{A.6})$$

que resulta na expressão conhecida como forma pontual da lei de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (\text{A.7})$$

A.2 Grandezas Magnéticas

Um campo magnético estático (ou magnetostático) é gerado quando ocorre a movimentação de cargas com velocidade constante, ou seja, um fluxo de corrente constante. A lei de Biot-Savart estabelece que a intensidade do campo $d\vec{H}$ gerada em um ponto P é proporcional ao rotacional do elemento diferencial de corrente $I d\vec{l}$ e o versor $\hat{R}$ e inversamente proporcional à distância ao cubo R^3 (SADIKU, 2004):

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \hat{R}}{4\pi R^3}. \quad (\text{A.8})$$

O sentido do vetor intensidade de campo magnético é dado pela regra da mão direita, na qual o polegar aponta para o sentido da corrente e os dedos dobrados ao redor do fio indicam o sentido da intensidade de campo magnético, conforme Figura 43.

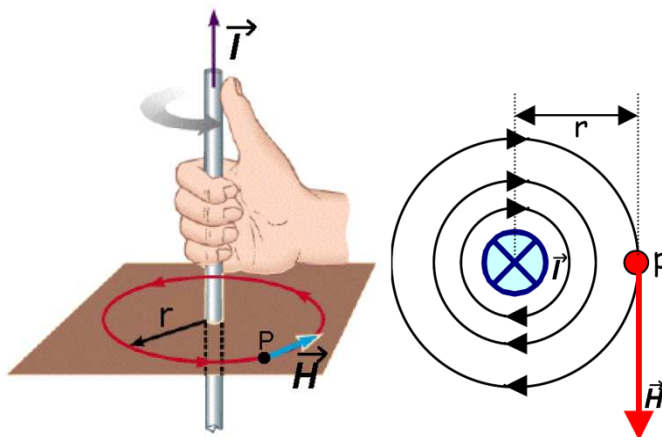


Figura 43 – Regra da mão direita, aplicada para detecção da orientação do campo e em função da corrente em um condutor (MUSSOI, 2007).

Através da lei circuital de Ampère chega-se a outra equação de Maxwell, conhecida como lei de Ampère diferencial (ou pontual) (SADIKU, 2004):

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}. \quad (\text{A.9})$$

Analisando esta equação verifica-se que $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \neq 0$, mostrando que o campo magnetostático não é conservativo.

A densidade de fluxo magnético $\vec{B}$ é similar à densidade de fluxo elétrico. Assim como na equação (A.3), é válida no espaço livre, $\vec{B}$ está relacionado à intensidade de campo magnético $\vec{H}$, de acordo com a equação (SADIKU, 2004; PAUL, 2006):

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \quad (\text{A.10})$$

O fluxo magnético é o caminho na região do campo magnético, em relação ao qual $\vec{B}$ é tangente em cada ponto, podendo ser representado através da integral de superfície (SADIKU, 2004):

$$\Psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (\text{A.11})$$

Porém uma carga magnética, isolada não existe, logo o fluxo de uma superfície fechada em um campo magnético é nulo ($\Psi = 0$). Embora o campo magnetostático não seja conservativo, o fluxo se conserva. O que resulta na equação de Maxwell (SADIKU, 2004; PAUL, 2006):

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (\text{A.12})$$

A lei circuital de Ampère estabelece que a circulação de $\vec{H}$ em torno de um caminho fechado é igual à corrente envolvida pelo caminho. Isto resulta da seguinte equação de Maxwell (SADIKU, 2004; PAUL, 2006):

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}. \quad (\text{A.13})$$

A.3 Efeito Hall

Este efeito ocorre em qualquer condutor que circula uma corrente a qual é submetida a presença de um campo magnético ortogonal (CULLITY e GRAHAM, 2009). Se houver uma corrente I em um condutor em forma de placa (Figura 44), a diferença de potencial nos pontos a e b será nula na ausência de um campo magnético. Quando um campo H atua perpendicularmente à placa, o caminho atual é distorcido, e uma força eletromotriz e_H é gerada entre a e b . A magnitude desta força eletromotriz Hall é proporcional ao produto da corrente e do campo:

$$e_H = R_H \frac{IH}{t}, \quad (\text{A.14})$$

onde t é a espessura da chapa, e R_H , a constante Hall, é uma propriedade do material. O efeito ocorre tanto em metais e semicondutores, mas é muito maior no último. Se I for mantida constante, então e_H é uma medida de intensidade de campo H . Se I é alternada e_H também é alternada e pode ser facilmente amplificado.

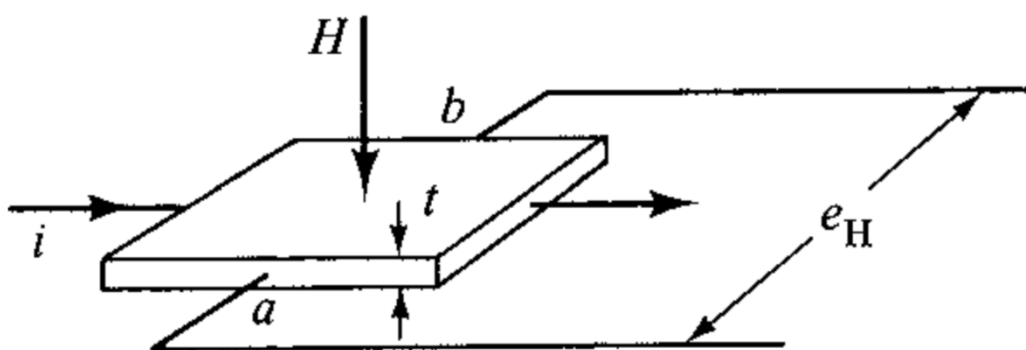


Figura 44 – Elemento Hall e a relação entre a corrente, o campo magnético e a força eletromotriz (CULLITY e GRAHAM, 2009).

O elemento sensor, chamado de sonda Hall, geralmente é o semicondutor InSb (CULLITY e GRAHAM, 2009) nos instrumentos comerciais. A sonda pode ser muito pequena, 1 mm² ou menor, e normalmente é montado na extremidade de uma haste fina conectados por um cabo de diâmetro pequeno para uma unidade de controle contendo a fonte de corrente e o amplificador. Dependendo da orientação do chip semicondutor, o campo de medida pode ser perpendicular à haste (sonda transversal) ou paralelo à haste (sonda axial).

Os sensores de efeito Hall são largamente utilizados na indústria, sendo aplicados principalmente em:

- medidas de campos magnéticos (Densidade de flux magnético);
- medidas de corrente sem potencial (Sensor de corrente);
- emissor de sinais sem contacto;
- aparelhos de medida de espessura de materiais.

A.4 Análise de sinais

Qualquer sinal periódico pode ser descrito por séries funções seno e cosseno, também chamado de séries de Fourier (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996):

$$v(t) = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (V_s \sin(n\omega t) + V_c \cos(n\omega t)), \quad (\text{A.15})$$

Os coeficientes são obtidos por:

$$V_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(n\omega t) d\omega t, \quad (\text{A.16})$$

e

$$V_c = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(n\omega t) d\omega t, \quad (\text{A.17})$$

onde n é um inteiro e $\omega = 2\pi / T$. Sendo T o período da fundamental.

Para sinais discretos, o espectro de frequência pode ser obtido pela transformada discreta de Fourier (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996), definida como:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi n \frac{k}{N}}, \quad (\text{0.18})$$

sendo N o número de amostras no período T , $x(n)$ é a amplitude de cada amostra e $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

A.4.1 Teorema da Amostragem

A amostragem de um sinal contínuo consiste em simplesmente trocar os valores do sinal por um conjunto discreto de pontos. Estes pontos são iguais aos valores do sinal nos chamados instantes de amostragem. O resultado da amostragem é então uma sequência de números.

Durante o processo de amostragem de um sinal analógico, uma consideração importante está em determinar quantas amostras são necessárias para que não se perca nenhuma informação de interesse contida no sinal analógico original. Para preservar toda a informação contida no sinal analógico original é necessário amostrar o sinal com uma taxa da amostragem (TA) ou frequência de amostragem (f_s) superior ao dobro da maior frequência (f_{max}) presente no sinal analógico original (Figura 45). Este teorema, proposto por Nyquist, é conhecido por teorema da amostragem (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996).

$$f_s > 2f_{max}, \quad (A.19)$$

O valor limite correspondente ao dobro da maior frequência do sinal original é conhecido por frequência de Nyquist. Na prática o que se faz é amostrar um sinal com frequência 5 a 20 vezes maior do que a máxima frequência do sinal.

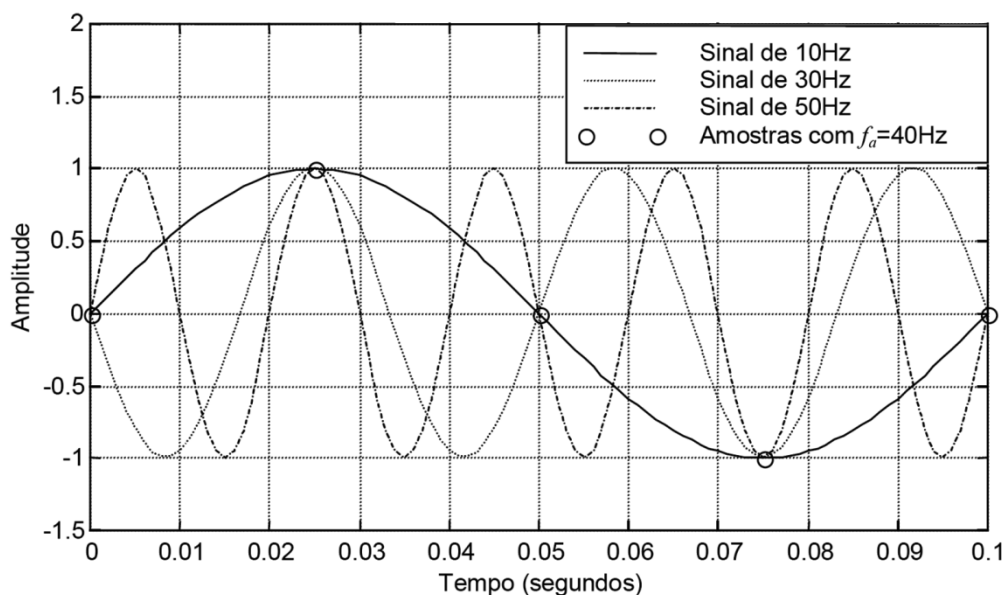


Figura 45 – Comparação de sinais com diferentes frequência para uma taxa de amostragem de 40 Hz.

Observa-se na Figura 45 que apesar de apresentarem diferentes frequências, os sinais de 10, 30 e 50 Hz apresentam as mesmas amostras, para a frequência de amostragem de 40 Hz. No entanto somente o sinal de 10 Hz esta em concordância com o teorema de Nyquist, sendo o único dos três sinais que pode ser reconstruído.

A.4.2 Distorção Harmônica Total

A distorção harmônica é a medida da perturbação do sinal na saída, após este passar por todo equipamento, em relação ao sinal aplicado na entrada do aparelho. A distorção do sinal é gerada pelo acréscimo de frequências múltiplas do sinal fundamental que surgem devido a não-linearidade de alguns componentes presentes no circuito. As cargas não-lineares absorvem uma corrente diferente da forma de onda da tensão que a alimenta, gerando uma perturbação na onda da corrente. A distorção harmônica total de tensão (THD_U) e a distorção harmônica total de corrente (THD_I) são definidas pelas equações (RASHID, 2001):

$$THD_U = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (A.20)$$

e

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (A.21)$$

Sendo U_1 e I_1 a tensão e corrente fundamental em RMS e U_n e I_n são as componentes harmônicas de ordem n de tensão e corrente em RMS respectivamente.

A harmônica é uma componente adicional que possui frequência múltipla da onda senoidal fundamental. Sendo as harmônicas de ordem ímpar que causam maior distorção na onda da corrente.

A distorção harmônica está relacionada diretamente com a amplitude das componentes harmônicas. Para um sinal de 1 Hz senoidal (ver Figura 46), o qual teria como componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem os sinais senoidal de 3 e 5 Hz respectivamente, pode analisar o sinal resultante pela soma destas componentes ao sinal original. Observa-se que ocorreu um aumento na inclinação da curva durante a transição pelo zero, e uma grande distorção no pico.

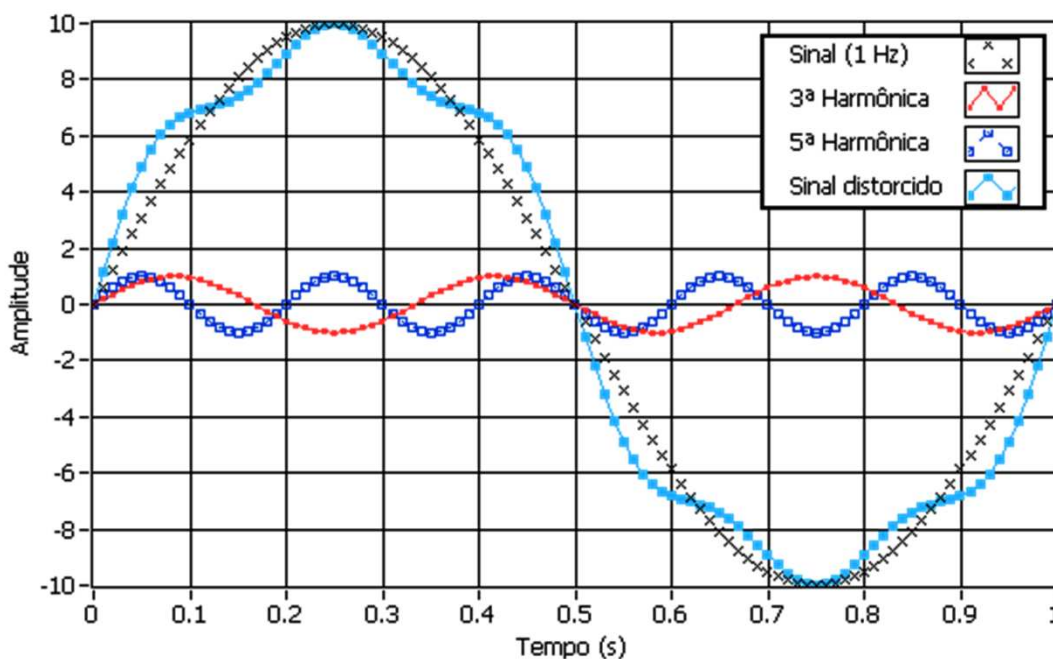


Figura 46 – Sinal de 1 Hz e as componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

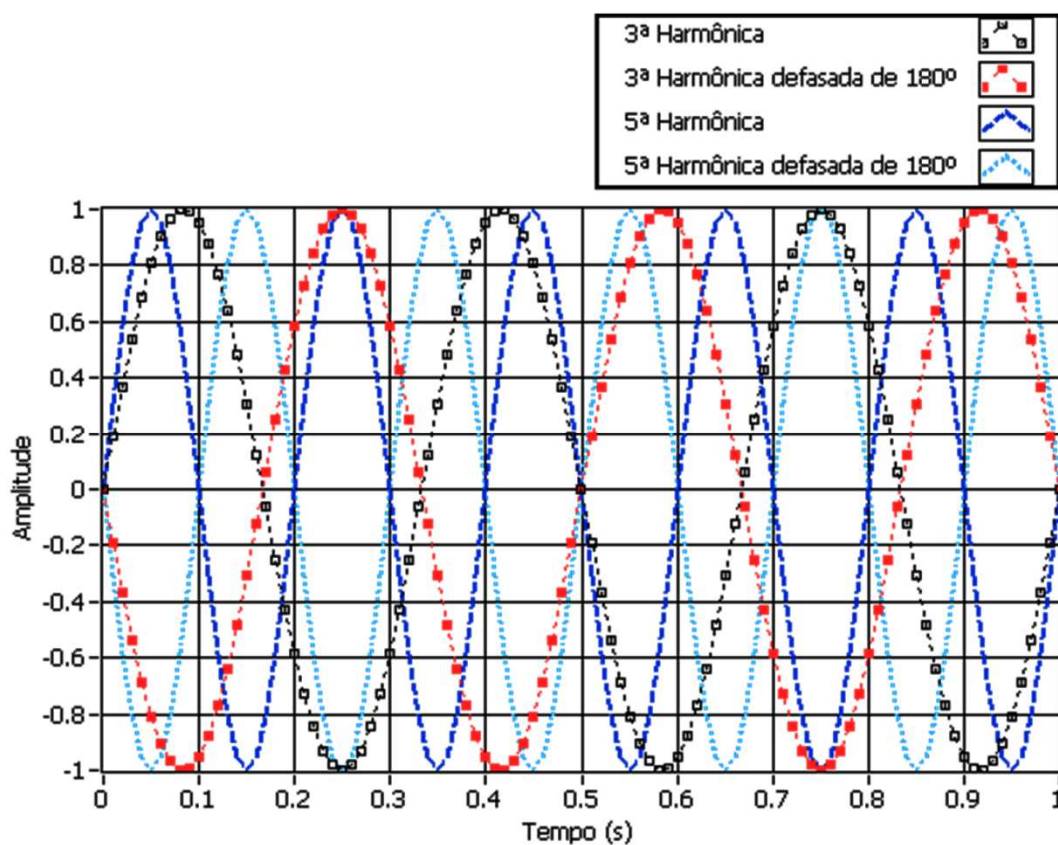
Como o sinal distorcido é a soma do sinal original com as componentes harmônicas é possível através da identificação destas componentes a eliminação do seu efeito. Matematicamente, basta identificar a amplitude e fase da componente harmônica, defasá-la em 180° e somá-la novamente ao sinal distorcido.

Através da análise do sinal distorcido chegou novamente aos respectivos sinais:

Tabela 7 – Sinais detectados após análise harmônica.

Sinal	Frequência (Hz)	Amplitude	Fase (graus)
Sinal original	1	10	0
3ª Harmônica	3	1	0
5ª Harmônica	5	1	0

Aplicando a defasagem de 180° , pode-se eliminar o efeito de cada harmônico individualmente, pois quando se soma o harmônico e o harmônico defasado de 180° o resultado é nulo.

Figura 47 – Harmônicos e harmônicos defasados de 180° .

Na prática nem sempre é possível aplicar o cancelamento de harmônicos, devido a dificuldades de identificação dos harmônicos, devido à impossibilidade de inserir os harmônicos defasados e também devido à necessidade de um controle para que o cancelamento ocorra de forma coerente, pois como já detalhado, o aparecimento de harmônicos surge devido às não-linearidades do circuito. Isto pode provocar erros no processo de cancelamento de harmônicos, necessitando de algumas iterações para que o cancelamento seja efetivamente realizado.

ANEXO B – PUBLICAÇÃO

Ilton A. Pereira Jr.; Marcelo Mezaroba; Sérgio Haffner e Luís Alberto Pereira. “Análise e medição de propriedades magnéticas dos materiais em diferentes frequências e com correção de harmônicos”. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2010*, 2010, Bonito, MS. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2010, 2010. v. 1. p. 2152-2159.

ANÁLISE E MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS E COM CORREÇÃO DE HARMÔNICOS

ILTON A. PEREIRA JR., MARCELLO MEZAROBÁ

Núcleo de Processamento de Energia Elétrica (nPEE)

Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)

Centro de Ciências Tecnológicas (CCT)

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Joinville, SC – Brasil

SÉRGIO HAFFNER, LUÍS ALBERTO PEREIRA

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS – Brasil

*Emails: ilton.pereira@gmail.com, slhaffner@gmail.com,
mezaroba@joinville.udesc.br, lpereira1963@gmail.com*

Abstract— This article presents a study on the influence of frequency variation in the magnetic properties of materials. Tests are performed in the Epstein frame, the measurements are being obtained through a data acquisition system PC-based, which is controlled by software developed in LabVIEW. The results are the curves of magnetization and specific losses for various frequencies preset, and evaluated the current and voltage harmonic distortion during the tests. At the end, it's presented a methodology capable of performing the harmonics cancellation, generated by the steel saturation, through a voltage source with adjustable harmonics.

Keywords— Epstein frame or Epstein square, industrial automation, LabVIEW, magnetic quantities, virtual instruments.

Resumo— Este artigo apresenta um estudo sobre a influência da variação da frequência nas propriedades magnéticas dos materiais. Os ensaios são realizados em quadro de Epstein, sendo as medições obtidas através de um sistema de aquisição de dados baseado em PC, o qual é controlado por um software desenvolvido em LabVIEW. Como resultados têm-se as curvas de magnetização e de perdas específicas para diversas frequências pré-selecionadas, sendo avaliadas as distorções harmônicas de tensão e de corrente, durante os ensaios. Ao final é apresentada uma metodologia capaz de realizar o cancelamento das harmônicas, geradas pela saturação do aço, através de uma fonte de tensão com ajuste de harmônicos.

Palavras-chave— Automação industrial, grandezas magnéticas, instrumentação virtual, LabVIEW, quadro de Epstein.

1 Introdução

A utilização de materiais magnéticos vem aumentando ao longo dos anos em função do crescimento das economias mundiais. Tais materiais são aplicados principalmente na fabricação de motores e transformadores que por sua vez são utilizados na maioria dos aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos de nosso dia a dia.

De forma geral, todo material utilizado no processo de fabricação (Zeid, 1991; Casarotto Filho, 1999) de produtos implica custos diretos ou indiretos para o consumidor. Desta forma, surge a necessidade de se buscar a redução de custos ao longo desse processo. Isto normalmente ocorre com a utilização de materiais mais baratos, mais eficientes e com a própria redução do tamanho dos equipamentos. Quando se trabalha com materiais magnéticos a realidade continua a mesma, sendo realizados diversos estudos para avaliar e melhorar a qualidade das ligas metálicas.

Pode-se obter a curva de magnetização do material e as perdas magnéticas pelo teste de Epstein, pelo Toróide e através do Teste de Lâmina Única (*Single Sheet Tester*, SST). O teste de Epstein é o mais utilizado e o SST é o mais simples operacionalmente (Mthombeni & Pillay, 2004). O

teste de Epstein foi escolhido para a análise aqui apresentada devido à sua grande utilização na indústria e no meio acadêmico.

O procedimento para realização do teste de Epstein é padronizado pela norma brasileira NBR 6151 (NBR 6151, 1996) e conduz a resultados equivalentes às principais normas internacionais: norma americana ASTM A343 (ASTM A343, 1997), japonesa JIS C2550 (JIS C 2550, 2000) e pela norma da comissão eletrotécnica internacional IEC 404-2 (IEC 404-2, 1996), pois se assemelham no processo e também nos cálculos (Mendes, 2004). Esta metodologia é amplamente utilizada na indústria, sendo normalmente realizados ensaios em frequências padrões (50 Hz e 60 Hz), os quais atendem à maioria das aplicações.

No entanto, há uma necessidade crescente do mercado industrial em analisar as propriedades magnéticas dos materiais em frequências diferentes dos padrões. Isto ocorre devido à existência de diversos equipamentos que operam com frequências maiores que 60 Hz. Muitas vezes os parâmetros de projeto são estimados, através de fórmulas aproximadas, com base em ensaios realizados nas frequências padrões. Este procedimento não garante resultados precisos e dificultam as buscas por melhorias em projetos. As principais aplicações da indústria estão relacionadas ao uso de inversores de

frequência no controle dos motores e compressores. Estes equipamentos apresentam melhor eficiência que os convencionais (o pico de corrente de partida dos compressores convencionais é o principal responsável pelo alto consumo de refrigeradores, devido às manobras de liga e desliga, provocando ainda a inserção de harmônicos na rede de energia elétrica), possuindo partida suave, controle de velocidade e garantindo a redução do consumo de energia, pois é capaz de operar em diferentes condições de acordo com a necessidade (Altus, 2007; Weg, 2007).

Este artigo está organizado da seguinte forma. Inicialmente são descritas as características do quadro de Epstein e a metodologia para realização de ensaios. A seguir apresenta-se o sistema utilizado na realização de ensaios. Na seção seguinte são apresentados os resultados do estudo, obtendo as curvas de indução magnética *versus* campo magnético (curva B-H) (Soares, 2008) e de perdas magnéticas *versus* indução magnética para diferentes frequências, além da curva de perdas magnéticas *versus* frequência (para diferentes induções magnéticas). Analisa-se também o comportamento das componentes harmônicas e a distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*, THD) das formas de onda de tensão e corrente ao longo dos ensaios. São apresentados, então, procedimentos para cancelamento dos harmônicos causados pela saturação do material. Para finalizar são apresentadas as conclusões.

2 Ensaios padronizados

A estimativa das características de magnetização dos materiais e obtenção das perdas magnéticas pode ser realizada através do teste de Epstein, procedimento padronizado pela norma brasileira (NBR 6151, 1996). Nesta sessão são apresentados o quadro de Epstein e o procedimento de ensaio.

2.1 O quadro de Epstein

O quadro de Epstein assemelha-se a um transformador constituído por dois enrolamentos: primário e secundário. As amostras de teste formam o núcleo magnético do transformador. O quadro de Epstein apresenta ainda um “indutor mútuo” para compensar o fluxo disperso no interior das bobinas, localizado no centro do espaço formado pelos enrolamentos. Os enrolamentos apresentam um total de 700 espiras e são recomendados para teste num intervalo de frequência de 25 a 400 Hz. Excita-se o enrolamento primário e mede-se a tensão secundária. O comprimento efetivo para o caminho magnético é adotado convencionalmente como 0,94 m, para o quadro de 25 cm (NBR 6151, 1996). A Figura 1 apresenta o quadro de Epstein, fabricado pela empresa Yokogawa, utilizado durante os ensaios.

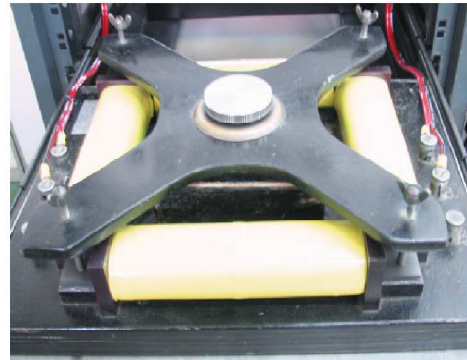


Figura 1. Quadro de Epstein.

2.2 Procedimento para o ensaio

Inicialmente, mede-se a massa da amostra com exatidão de $\pm 0,1\%$ através de uma balança de precisão. Em seguida inserem-se as lâminas no quadro de Epstein formando juntas duplamente sobrepostas nos cantos. Se metade das lâminas for cortada na direção da laminação e as restantes perpendiculares a esta direção, inserem-se as primeiras em dois braços paralelos do quadro de Epstein e as últimas nos braços restantes. É necessário que os braços tenham o mesmo número de lâminas (NBR 6151, 1996; Mendes, 2004).

A fonte de tensão é ajustada de tal modo que o valor de tensão eficaz no secundário esteja de acordo com a equação (1), a qual é deduzida a partir da Lei de Faraday. Assim, a amplitude da indução desejada (ou valor de crista de indução) (Mendes, 2004) pode ser obtida pela aplicação da seguinte expressão:

$$U_2 = 4,44 f N_2 AB, \quad (1)$$

sendo U_2 a tensão eficaz medida no secundário do quadro de Epstein; f a frequência; N_2 o número de espiras; A a área da secção transversal do corpo de prova, B a indução magnética e o fator 4,44 está relacionado com o valor RMS da tensão senoidal.

Para se obter a curva B-H (Sadiku, 2004; Paul, 2006) é necessário o valor instantâneo da indução magnética, dado por:

$$B(t) = \frac{-1}{N_2 A} \int U(t) dt, \quad (2)$$

e o valor instantâneo do campo magnético, originado da aplicação da lei de Ampère,

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l}, \quad (3)$$

onde $I(t)$ é a corrente do primário e l é o comprimento do caminho magnético.

Após ajustada a tensão no secundário, mede-se a tensão no secundário e a corrente no primário. Estes valores são utilizados para o cálculo da tensão eficaz, tensão média, potência, corrente de pico, perdas magnéticas e a permeabilidade (NBR 6151, 1996). Outra relação importante é a razão entre a tensão eficaz e tensão média (válido para sinal senoidal

retificada em onda completa), conhecido como fator de forma (FF), parâmetro utilizado na correção das perdas devido à inserção de harmônicos (NBR 6151, 1996), como mostra a equação (4):

$$FF = \frac{U_2}{U_2}, \quad (4)$$

onde $\bar{U}_2$ é a tensão média medida no secundário. As perdas magnéticas corrigidas do material são dadas por:

$$P_c = \frac{P_t}{K_H + K_P \left(\frac{FF}{1,1107} \right)^2}, \quad (5)$$

sendo P_t as perdas totais, calculadas a partir dos valores medidos de corrente no primário e tensão no secundário, K_H e K_P são coeficientes obtidos no processo de separação das perdas totais em histerésicas e Foucault (NBR 6151, 1996) e 1,1107 corresponde ao fator de forma de uma função senoidal. As perdas específicas (perdas magnéticas) são obtidas dividindo-se as perdas totais da expressão (5) pela massa efetiva da amostra (NBR 6151, 1996).

3 Sistema desenvolvido

O sistema é composto por uma bancada, um painel elétrico, um quadro de Epstein e um computador pessoal (PC), conforme ilustrado na Figura 2. No painel elétrico ficam os transdutores de corrente e de tensão, a fonte de alimentação e o quadro de Epstein. No PC está a placa de aquisição de dados (NI-6220) e o software desenvolvido em LabVIEW (National Instruments, 2009a), o qual faz a aquisição e o processamento dos sinais. Esta arquitetura de aquisição baseada em PC é chamada de instrumentação virtual, tendo como vantagem a flexibilidade e o baixo custo (National Instruments, 2009b).

Durante os ensaios foram utilizadas duas fontes de tensão. A primeira, uma fonte de tensão CA linear

com variação em amplitude e em frequência. A outra, uma fonte CA chaveada com variação em amplitude, frequência e com ajuste de harmônicos.

Podem-se realizar ensaios entre 45 a 400 Hz, para uma tabela de indução previamente configurada, variando de 0 a 1,7 T. Sendo necessário respeitar os limites dos transdutores (corrente – 10 A e tensão – 100 V), e do próprio quadro de Epstein (capacidade de 10 A).

Após o ensaio ser programado, o software configura automaticamente a fonte CA para acionar a saída de tensão de acordo com a equação (1), sendo o sinal realimentado em função da diferença entre a referência e a leitura do transdutor de tensão.

Os parâmetros da aquisição de dados são configurados no software *Measurement and Automation Explore* (MAX) (National Instruments, 2009c), através de canais virtuais, onde são atribuídas ao tipo de sensor as respectivas escalas, a associação dos canais físicos da placa e a forma de leitura dos canais. Sendo utilizados na aplicação dois canais simultâneos, a uma taxa de aquisição de 20.000 amostras por segundo, em modo contínuo e leitura diferencial. O esquemático de ligação entre o transdutor (saída V_s) e a entrada da placa (analog input, AI+ e AI-) é apresentado na Figura 3.

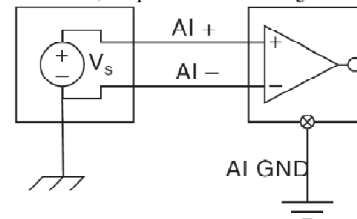


Figura 3. Diagrama esquemático de ligação entre o transdutor e a placa de aquisição.

A aquisição de dados no LabVIEW é realizada através dos VIs (programa ou chamada de função do LabVIEW) da biblioteca DAQMX, os quais executam as tarefas (*Task*) pré-configurada. O

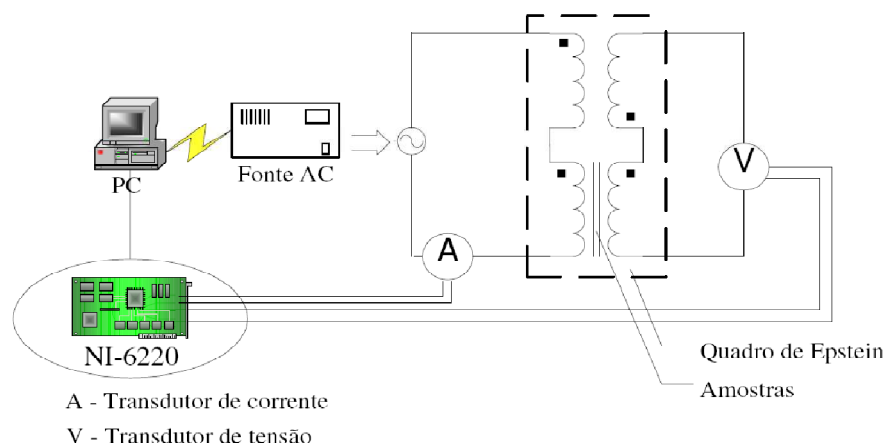


Figura 2. Diagrama esquemático do sistema proposto para teste de Epstein.

processamento destes sinais é feito através dos respectivos VIs:

- *Extract Single Tone Information.vi* – Calcula a frequência da medição de tensão;
- *Basic Averaged DC-RMS.vi* – Cálculo de tensão RMS, corrente RMS e a potência através do nível CC do produto (ponto a ponto) entre corrente e tensão;
- *Waveform Peak Detection.vi* – Detecção de picos, usado no cálculo da corrente de pico, a qual é utilizada para a obtenção do pico de H (equação (3)).
- *Integral $x(t)$.vi* – Utilizado no cálculo de B, em função do sinal de tensão (equação (2)).
- *Harmonic Distortion Analyzer.vi* – Fornece informações dos harmônicos e da THD, para sinais de tensão e corrente.

Dessa forma, podem-se obter os respectivos resultados ao longo do ensaio, pré-configurado com frequências fixas e indução variável:

- Curva B-H;
- Curva de magnetização – formada pelos picos de B e H;
- Curva de perdas específicas – formada pelas perdas em função da B;
- THD de corrente e de tensão.

Outra forma de realização de ensaio é através de variação da frequência para induções fixas ao longo do ensaio, tendo como resultados:

- Curva B-H;
- Curva de H *versus* frequência;
- Curva de perdas específicas *versus* frequência;
- THD de corrente e de tensão.

Sabe-se que durante a saturação do aço, provocado pelo aumento da indução, ocorre a distorção da forma de onda de tensão no secundário. Isto acontece a partir do joelho da curva de magnetização. Dessa forma, o fluxo nas amostras deixa de ser puramente senoidal devido à presença de harmônicos. A norma NBR 6151 recomenda a correção dos harmônicos, quando possível. O estudo apresentado por Batistela (2001) contempla a

correção de harmônicos, realizado através do projeto de inversor de tensão com filtro, incluindo uma malha de realimentação. Apesar das vantagens do projeto proposto, o mesmo não está disponível comercialmente, sendo de difícil implementação e requerendo um conhecimento avançado na área de controle e eletrônica.

Neste artigo é apresentada uma metodologia mais simples que utiliza equipamentos comerciais e se baseia na utilização de uma fonte com variação em amplitude, em frequência e com ajuste de harmônicos. Desta forma, as faixas de indução e de frequência de interesse são necessários para a especificação da fonte de alimentação a ser utilizada. Os sinais são adquiridos, processados e realimentados através da comunicação com a fonte de tensão. O sistema tem como referência uma amplitude e uma frequência a serem seguidas. Quando existe a presença de harmônicos, estes são defasados de 180° e somados a referência, provocando o cancelando de cada harmônica no secundário. Um diagrama esquemático da metodologia de controle proposta é apresentado na

Figura 4.

4 Resultados

Respeitando o limite de indução de 1,7 T, podem-se obter resultados para uma faixa de frequência de 45 a 200 Hz. Observa-se na Figura 5 os resultados de um ensaio realizado de forma sequencial para as frequências de 50, 100, 150 e 180 Hz, utilizando a amostra E230-Acesita, com grão não-orientado e tratamento, corte longitudinal e transversal, densidade de $7,8 \text{ g/cm}^3$, massa de 786,8 g, comprimento de 28 cm e espessura de 0,6 mm. Para estes ensaios foram pré-definidos 12 valores de indução (entre 0,6 e 1,7 T) sendo a fonte de tensão, que alimenta o circuito primário, automaticamente ajustado para obter os valores programados com uma tolerância de $\pm 0,1 \text{ V}$. A Figura 5(a) mostra a tradicional curva de magnetização do material e a Figura 5(b), a curva de perdas específicas, ambas realizadas para diferentes frequências.

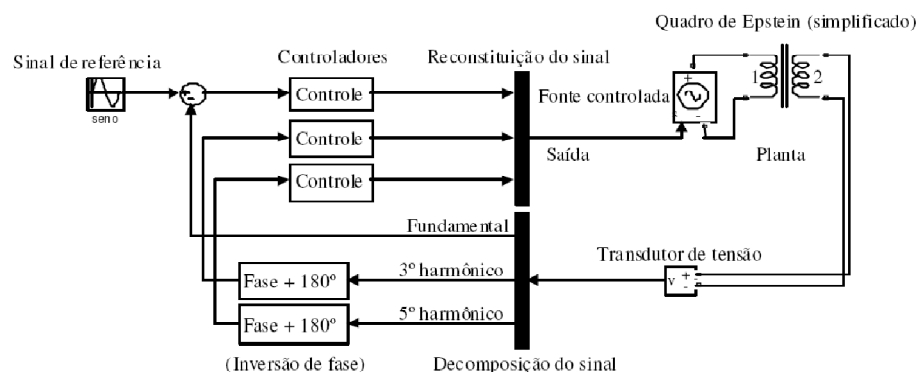


Figura 4. Diagrama da topologia de controle para correção de harmônicos.

Para um mesmo material, observa-se que o comportamento das curvas de magnetização da Figura 5(a) não é alterado de forma significativa com a variação da frequência. Com o aumento da frequência, embora ocorra uma redução na permeabilidade do material (comprovada pela variação na declividade das curvas de magnetização no intervalo de 0 a 500 A/m), verifica-se que ocorre um deslocamento no joelho da curva, fazendo com que a saturação ocorra em valores mais elevados de H e B . Esta característica foi também observada em outras amostras de diferentes materiais ferromagnéticos ensaiadas segundo mesmo procedimento.

No gráfico de perdas específicas, Figura 5(b), é possível verificar o conhecido aumento das perdas com relação variação da indução magnética e também um expressivo aumento das perdas com o crescimento da frequência. Observar que para frequências menores (até 60 Hz), o crescimento é quase linear enquanto que para frequências a partir de 150 Hz assume uma forma aproximadamente quadrática.

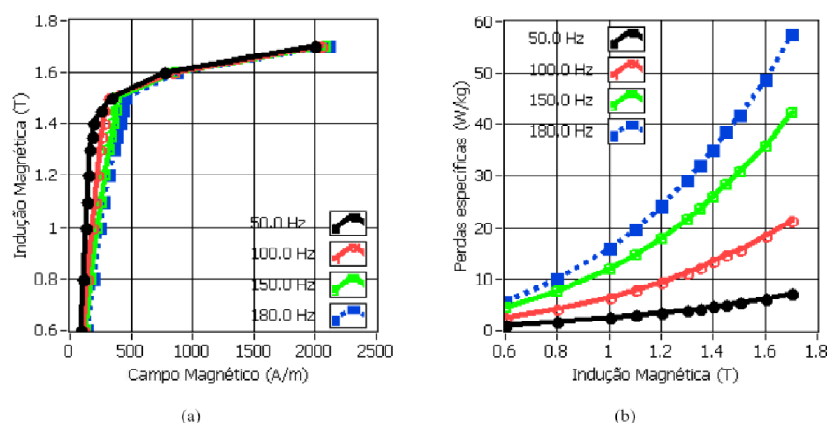


Figura 5. Ensaio sequencial para frequências fixas e induções variáveis. Sendo (a) a curva de magnetização e (b) a curva de perdas específicas.

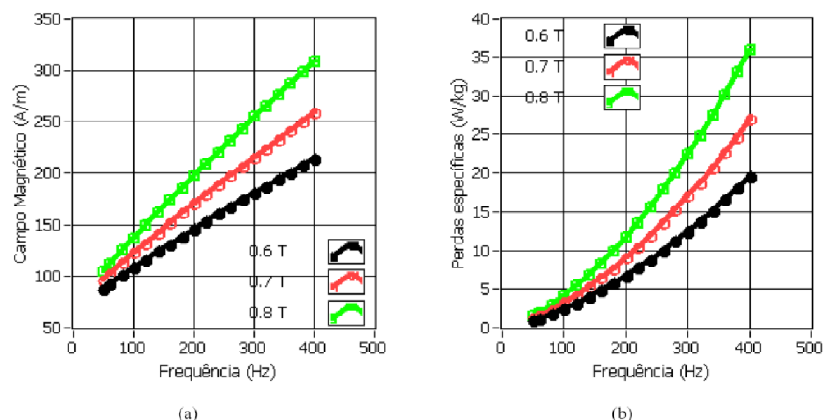


Figura 6. Ensaio sequencial para induções fixas e frequências variáveis ao longo do ensaio. Tendo em (a) H versus frequência e em (b) as perdas específicas versus a frequência.

400 Hz, é necessário um campo de cerca de 310 A/m.

Na Figura 6(b) observa-se de forma bastante explícita o crescimento das perdas específicas com relação ao aumento da frequência, para valores definidos de indução magnética. Nota-se um comportamento polinomial, com expoentes crescentes à medida que a indução aumenta. Observar que as informações apresentadas na Figura 6(b) complementam aquelas mostradas na Figura 5(b), na qual a frequência varia apenas até 180 Hz.

Outro comportamento interessante é a distorção da forma de onda da corrente do primário e da tensão induzida no secundário, provocado pela saturação do material ao longo dos ensaios. A quantificação desta distorção foi realizada através da THD da corrente primária e da tensão secundária, obtidas diretamente pelo processamento dos sinais adquiridos nos ensaios.

A Figura 7 mostra o aumento da THD de corrente e de tensão quando o campo e a indução magnética são variados, sendo mantida a frequência. Observa-se que a THD da corrente de magnetização na Figura 7(a) e 7(b) mostram uma acentuada distorção e que esta apresenta redução com o

aumento da frequência. Por outro lado, a THD da tensão secundária da Figura 7(c) e 7(d) é bastante reduzida, sendo inferior a 6%, mantendo a redução com o aumento da frequência. Ainda, pode ser verificado que existe semelhança entre o comportamento da THD da corrente e da tensão, com relação à variação do campo e da indução.

Verificou-se durante os ensaios que a partir de 1,5 T, conforme já ilustrado na Figura 5(a) no joelho da curva de magnetização, existe a necessidade de corrigir os harmônicos de tensão do secundário. A metodologia proposta segue o diagrama da

Figura 4, tendo como resposta uma grande redução na THD de tensão do secundário. Uma comparação entre os valores calculados para a fonte de tensão sem correção de harmônicos (correção feita através de metodologia proposta pela norma NBR 6151 em função do FF conforme equação (5), sendo válido para sinal senoidal) e os resultados da metodologia que utiliza a fonte com correção de harmônicos (dispensando correções) pode ser observado na Figura 9. Porém tal diferença de valores só se verifica quando há distorção da tensão, do contrário os resultados são idênticos.

A partir dos resultados obtidos na indução de

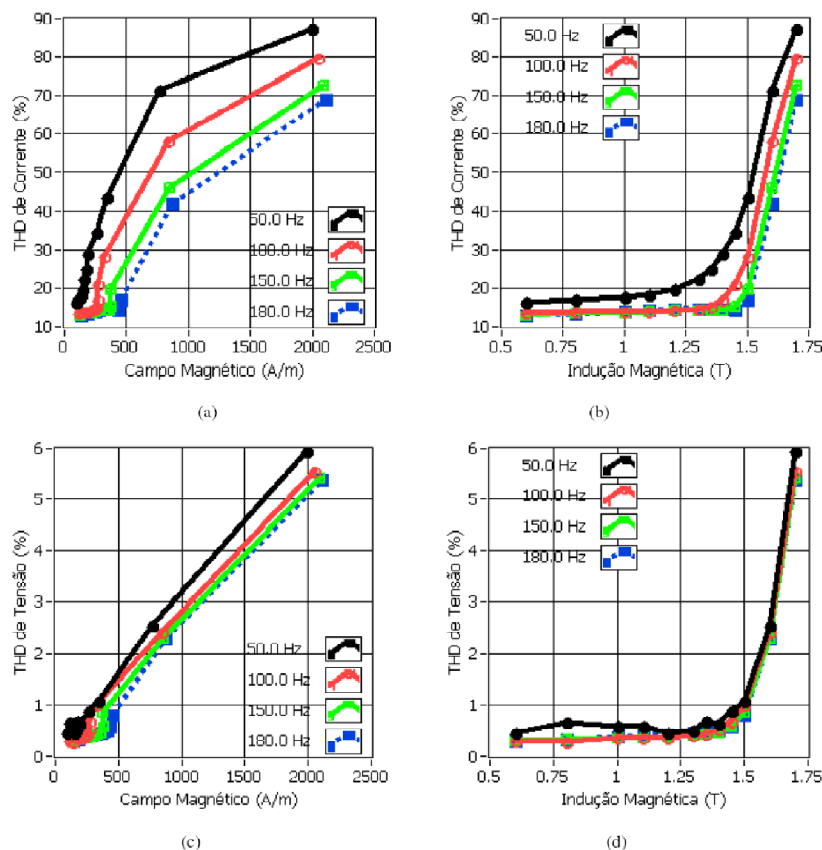


Figura 7. Avaliação da THD ao longo de ensaio sequencial em frequências fixas e induções variáveis. Sendo apresentadas em (a) a THD de corrente *versus* H, em (b) a THD de corrente *versus* B, em (c) a THD de tensão *versus* H e em (d) a THD de tensão *versus* B.

1,7 T, tem-se a THD de tensão igual 8% e para 1,75 T a THD fica em torno de 12%. Depois de aplicada a correção de harmônicos, a THD de tensão ficou abaixo dos 3%, conforme apresentado na Figura 8.

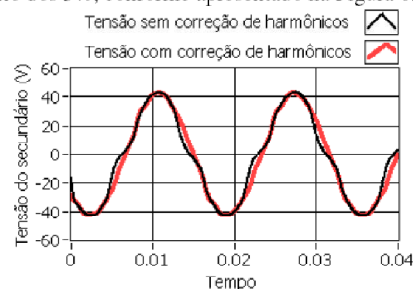


Figura 8. Comparação da forma de onda de tensão, antes e depois da correção dos harmônicos.

Outra abordagem que poderia ser implementada, consiste de calcular as perdas utilizando somente a estimativa da fundamental da tensão do secundário. Dessa forma, supõe-se que há diversas potências na saída, sendo a de interesse a potência gerada pela primeira harmônica. Dessa forma o processo de correção também deixa de ser utilizado. A comparação entre os 3 métodos é apresentada na Figura 9.

De forma a complementar a análise, apresenta-se na Figura 10 o comportamento do fator de forma com o aumento da indução, no qual se verifica que o erro percentual em relação a 1,1107 a partir de 1,5 T.

Observa-se que em 1,5 T (ou abaixo) não há necessidade de correção de harmônicos, o que resulta em resultados idênticos, no entanto a partir de 1,6 T, existe uma diferença considerável entre os resultados. Por exemplo, em 1,7 T a diferença entre as perdas com e sem harmônicos chega a quase 1 W/kg. Pode-se verificar que o método proposto,

através da estimativa da fundamental, apresenta resultados muito próximos do método com correção de harmônicos, mostrando que ambos estão coerentes e que a correção proposta pela norma NBR 6151 não é suficiente para garantir a precisão dos resultados na faixa acima de 1,5 T.

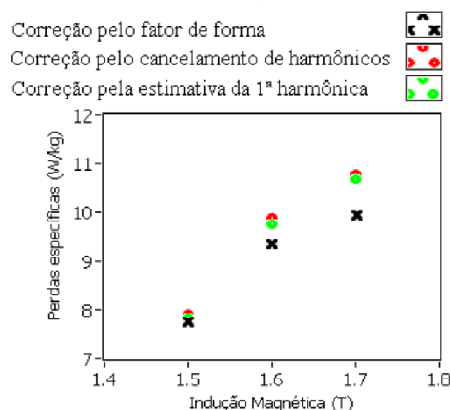


Figura 9. Comparação entre métodos de cálculo das perdas específicas

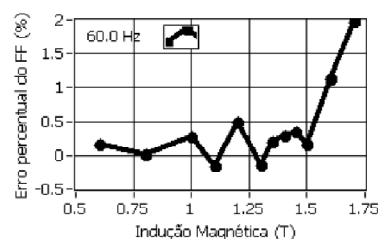


Figura 10. Evolução do erro percentual do FF com o aumento de H.

Os resultados obtidos durante todos os ensaios

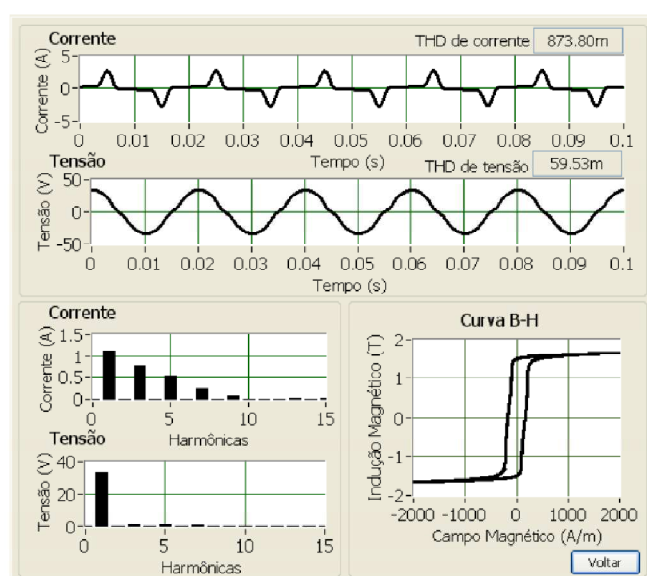


Figura 11. Tela do software para acompanhamento de ensaios. Sendo medido na indução de 1,7 T.

são acompanhados e analisados em tempo real. Uma das telas do software desenvolvido é apresentada na Figura 11. Observa-se na primeira curva, a corrente de magnetização, com alto nível de distorção, conforme ilustrado no primeiro gráfico de barras, o qual mostra as componentes harmônicas da corrente, sendo o primeiro termo o nível CC, o qual é zero, seguida pela harmônica fundamental e tendo grandes parcelas da 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, por outro lado, as componentes pares são nulas. No segundo gráfico, tem-se a curva de tensão no secundário, no qual se verifica a distorção da forma de onda de tensão, onde se observam no segundo gráfico de barras a harmônica fundamental e pequenas parcelas da 3ª e 5ª harmônicas. É apresentada também a curva B-H, para uma indução de 1,7 T calculada instantaneamente em função da corrente e da tensão medidas.

5 Conclusão

A solução proposta apresentou resultados coerentes com padrões do mercado, tendo como vantagem a grande faixa de variação em frequência. Outro importante resultado é possibilidade de geração das curvas de magnetização, a curva de perdas e a curva B-H. Podem ser realizados vários ensaios de forma sequencial para uma mesma amostra, podendo-se optar por um conjunto de curvas em diferentes frequências ou induções, facilitando a análise da região de interesse.

É importante ressaltar que durante a realização de ensaios em frequências superiores a 60 Hz, a tensão imposta para manter a indução requerida é elevada. Por outro lado, em baixas frequências, a corrente cresce e o limite do quadro necessita ser observado. Desta forma, a instrumentação empregada na aquisição da tensão e da corrente deve ser adequada para toda a faixa de interesse. Neste trabalho a tensão do secundário ficou limitada ao transdutor de 100 V, apresentando resultados coerentes na faixa de 0 a 1,7 T e 45 a 200 Hz. Optando-se por induções menores, de 0 a 0,8 T, pode-se chegar a variações na frequência de 0 a 400 Hz.

Outro resultado importante foi encontrado durante a comparação entre o método de correção das perdas em função do fator de forma e pelo método de correção das perdas pelo cancelamento de harmônicos. Verificou-se que a partir de 1,5 T a correção pelo fator de forma não é suficiente e que uma possibilidade para correção seria através do cálculo das perdas pela estimativa da fundamental.

6 Referências Bibliográficas

- Altus. (2007). *Inversores de Frequência*. Fonte: Altus: http://altus.com.br/ftp/Public/Portugues/Altus%20Ins%20titucional/Informativo_I&A/I&A63.pdf
- ASTM A343. (1997). American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter- Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame*.
- Batistela, N. J. (2001). *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Casarotto Filho, N. (1999). *Gerência de projetos/engenharia simultânea*. São Paulo: Atlas.
- IEC 404-2. (1996). International Electrotechnical Commission. *Magnetic Materials - Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame*.
- JIS C 2550. (2000). Japanese Industrial Standard. *Test Methods for Magnetic Steel Sheet and Strip*.
- Mendes, F. B. (2004). *Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas*. Dissertação (Mestre em Engenharia). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Mthombeni, L. T., & Pillay, P. (2004). Core Losses in Motor Laminations Exposed to High-Frequency or Nonsinusoidal Excitation. 40.
- National Instruments. (2009a). *NI LabVIEW*. Acesso em 10 de Junho de 2009, disponível em National Instruments: <http://www.ni.com/labview/>
- National Instrumets. (2009b). *Virtual Instrumentation*. Acesso em 10 de junho de 2009, disponível em NI Developer Zone: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4752>
- National Instruments. (2009c). *NI DAQ Software Features and Technologies*. Acessado em 01 de março de 2010, disponível em NI Developer Zone: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8243>
- NBR 6151. (1996). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – verificação das propriedades*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Paul, C. R. (2006). *Introduction to Eletromagnetic Compatibility*. New Jersey: Wiley.
- Sadiku, M. N. (2004). *Elementos de eletromagnetismo*. Porto Alegre: Bookman.
- Soares, M. A. (2008). *Eleticidade e eletromagnetismo*. Acesso em 10 de Junho de 2008, disponível em MSPC - Artigos e informações técnicas: <http://www.mspc.eng.br/elemag>
- Weg. (2007). *Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG*. Fonte: Weg Equipamentos Elétricos: <http://www.weg.net/files/products/2-2207.pdf>
- Zeid, I. (1991). *CAD/CAM theory and practice*. New York: McGraw-Hill.