

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA ESTIMATIVA DAS PERDAS MAGNÉTICAS EM  
REATORES COM SATURAÇÃO NATURAL**

por

**JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, Ph.D.**

Recife, Outubro de 2006.

© José Carlos de Oliveira, 2006.

**O48e**

**Oliveira, José Carlos de**

Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural / José Carlos de Oliveira. – Recife: O Autor, 2006.

xvii, 153 f., il., gráfs., tabs.

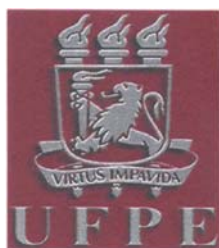
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2006.

Inclui referências bibliográficas.

**1. Engenharia Elétrica. 2. Reator Saturado. 3. Perdas por Foucault. 4. Histerese. 5. Ondas Distorcidas. 6. Harmônicos. 7. Indução Magnética. I. Título.**

**621.3 CDD (22.ed.)**

**BCTG/2007-019**



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em *Engenharia Elétrica*

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
TESE DE MESTRADO ACADÊMICO DE

**JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA**

TÍTULO

**"UMA ESTIMATIVA DAS PERDAS MAGNÉTICAS  
EM REATORES COM SATURAÇÃO NORMAL"**

A comissão examinadora composta pelos professores: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEESP/UFPE, FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES, DEESP/UFPE e JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEESP/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA**

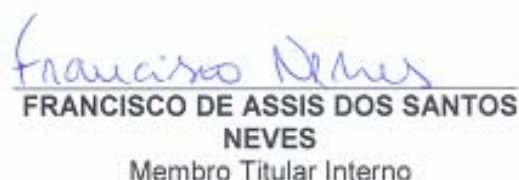
**APROVADO.**

Recife, 23 de outubro de 2006.

  
JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO  
Coordenador do PPGE

  
MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR  
Orientador e Membro Titular Interno

  
JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS  
BEZERRA  
Membro Titular Externo

  
FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS  
NEVES  
Membro Titular Interno

# DEDICATÓRIA

*A Deus, em primeiro lugar;  
aos meus pais, José João e Maria Eusa;  
às minhas irmãs Sônia, Silvana e Suely;  
à minha querida e amada Ana Lúcia e,  
meus queridos sobrinhos Thaís, Lara e Tharso.  
É para vocês que dedico.*

# AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus, pelo privilégio da vida e por todas as graças alcançadas;*

*Aos meus pais, José João e Maria Eusa pelos ensinamentos, pelo amor e pela compreensão de estar tão longe de casa;*

*Às minhas irmãs, Sônia, Silvana por toda a dedicação em ajudar nas horas difíceis, a Suely pelos fins de semana que passamos juntos diminuindo assim a saudade da família;*

*Ao grande amigo e cunhado José Reinaldo que com certeza foi fundamental com sua dedicação e seu incentivo e também pelos momentos alegres;*

*A minha querida Ana Lídia que apareceu justamente no momento mais difícil desta jornada. Obrigado pelo amor, pela dedicação e por estar sempre ao meu lado;*

*Aos meus amigos e companheiros de jornada, Alex, Geane, Otoni e Limongi, pelos sábados de estudo, pela união que criamos;*

*Aos meus novos amigos, Josinaldo, Tibúrcio e Gabriela, pela amizade criada no período final;*

*Ao grande amigo Ricardo Correia que sempre me incentivou e nunca me deixou desistir de continuar;*

*Aos professores Luiz Magnata, Ronaldo Aquino, Pedro Rosas, Marcelo Cabral e Luiz Henrique, pela paciência e pelos ensinamentos para a conclusão deste trabalho;*

*Ao professor Manoel Afonso que pacientemente sempre esteve à disposição e pela confiança depositada.*

*À Valdete, por sempre estar pronta a resolver qualquer problema administrativo;*

*E todos os que não mencionei e que tiveram participação para a conclusão deste trabalho.*

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **UMA ESTIMATIVA DAS PERDAS MAGNÉTICAS EM REATORES COM SATURAÇÃO NATURAL**

**José Carlos de Oliveira**

Outubro/2006

Orientador: Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Palavras-chave: Reator Saturado, Perdas por Foucault, Histerese, Ondas distorcidas, Harmônicos, Indução Magnética.

Número de páginas: 153

**RESUMO:** Este trabalho tem a finalidade de exemplificar uma estimativa de modelagem da potência dissipada em estruturas ferromagnéticas com partes profundamente saturadas, através do comportamento da forma de onda da indução magnética experimentadas em diversas partes da estrutura quando utilizada em reatores saturados. Para cada um dos protótipos de ensaiados, levou-se em consideração a forma de ligação dos enrolamentos primários, a disposição destes enrolamentos nos núcleos e tipo de estrutura ferromagnética utilizada.

Os valores resultantes destas estimativas foram comparados com valores de leitura direta o que comprova ser um método satisfatório.

Os primeiros protótipos a serem estudados foram os protótipos com ligação em série, obtendo as duas parcelas das perdas magnéticas através da modelagem estimada e mostrando as vantagens e desvantagens de cada um. Em seguida o mesmo tratamento foi dado aos protótipos com ligação em paralelo. Por último, foram relatadas as conclusões sobre os resultados e realizações de comparações entre todos os protótipos ensaiados e sugestões para trabalhos futuros.

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

## **AN ESTIMATE OF THE MAGNETIC LOSSES IN REACTORS WITH NATURAL SATURATION**

**José Carlos de Oliveira**

October/2006

Supervisor: Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Area of Concentration: Energy Processing

Keywords: saturated reactor, losses by eddy current, hysteresis, distorted waves, harmonics, magnetic induction.

Number of pages: 153

**ABSTRACT:** This work has the purpose of showing an estimate of the modeling of power dissipated in ferromagnetic structures with profoundly saturated parts, through the behavior of the magnetic induction wave form experimented in many parts of the structure when used in saturated reactors. For each one of the analyzed prototypes, the bonding forms of the primary winding, the disposition of those winding in the core and the type of ferromagnetic structure used we taken into account.

The resulting values of those estimates were compared with the direct reading values; this proves that this is a satisfactory method.

The first prototypes to be studied were the ones with a chain bonding, obtaining the two parts of magnetic losses though estimated modeling and showing the advantages and disadvantages of each one. Later, the same treatment was given to the prototypes of parallel bonding. Lastly, there were the conclusions about the results and comparisons between all the analyzed prototypes as well as suggestions for future works.

# Sumário

Sumário.....	vii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	xiv
Capítulo 1.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Conteúdo do trabalho.....	2
1.3 Sua finalidade.....	3
1.4 O princípio básico.....	4
1.5 A essência dos reatores com saturação natural.....	9
1.6 Ligação paralela dos enrolamentos.....	12
1.7 Ligação série dos enrolamentos.....	14
1.8 Estruturas magnéticas utilizadas nos reatores saturados.....	19
Capítulo 2.....	22
2.1 Dimensionamento dos protótipos.....	22
2.2 Metodologia de ensaio.....	34
2.3 Bancada de ensaios.....	35
2.4 Cálculo de resistências dos enrolamentos.....	36
2.4.1 Método do voltímetro e amperímetro.....	36
2.4.2 O circuito de medidas.....	36
2.5 Procedimento de medição das grandezas.....	42
2.6 Perdas por Foucault.....	45
2.7 O ciclo de histerese.....	50
2.8 O princípio da incerteza.....	56
Capítulo 3.....	62
Estudo do comportamento das perdas magnéticas nos reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série.....	62



3.1	Levantamento da curva característica operacional.....	62
3.2	Perdas por Foucault.....	65
3.3	Perdas por ciclo de histerese .....	88
3.4	Conclusões .....	105
	Capítulo 4.....	107
	Estudo do comportamento das perdas magnéticas nos reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em paralelo .....	107
4.1	Levantamento da curva característica operacional.....	107
4.2	Perdas por Foucault.....	114
4.3	Perdas por histerese.....	132
4.4	Conclusões .....	147
	Conclusões Gerais.....	148
	Sugestões para trabalhos futuros.....	150
	Referências Bibliográficas .....	152

# Lista de figuras

<b>Figura 1.1</b> - Curva $V \times I$ do reator linear e o reator saturado. -----	3
<b>Figura 1.2</b> - Reator saturado elementar.-----	4
<b>Figura 1.3</b> - Característica $\phi_{xi}$ -----	4
<b>Figura 1.4</b> - Característica $\phi_{xi}$ real aproximada -----	5
<b>Figura 1.5</b> - Fluxo percorrido no núcleo. -----	6
<b>Figura 1.6</b> - Forma de onda da tensão. -----	6
<b>Figura 1.7</b> - Arranjo dos enrolamentos de um reator saturado de 6 núcleos. -----	9
<b>Figura 1.8</b> – Distribuição das $\Im mm's$ -----	11
<b>Figura 1.9</b> – Ligação dos enrolamentos em paralelo. -----	12
<b>Figura 1.10</b> – Característica do material do núcleo. -----	13
<b>Figura 1.11</b> – Ligação dos enrolamentos em série. -----	14
<b>Figura 1.12</b> - Curva de magnetização idealizada.-----	15
<b>Figura 1.13</b> – Operação de um núcleo.-----	15
<b>Figura 1.14</b> - Forma de onda da tensão e do fluxo em um núcleo. -----	16
<b>Figura 1.15</b> - Indução magnética no núcleo. -----	17
<b>Figura 1.16</b> – Tensão induzida em um enrolamento. -----	18
<b>Figura 1.17</b> – Tensão induzida na fase A -----	18
<b>Figura 1.18</b> – Estrutura magnética em monobloco. -----	20
<b>Figura 1.19</b> - Unidade trifásica da estrutura magnética. -----	20
<b>Figura 2.1</b> - Estrutura magnética presente nos protótipos PS1, PS2 e PP1. -----	24
<b>Figura 2.2</b> - Estrutura magnética presente no protótipo PP2. -----	25
<b>Figura 2.3</b> - Diagrama do Protótipo PS1. -----	26
<b>Figura 2.4</b> - Seqüência das $\Im mm's$ criada para o protótipo PS1. -----	28
<b>Figura 2.5</b> - Diagrama da ligação no protótipo PP1. -----	29
<b>Figura 2.6</b> - Seqüência das $\Im mm's$ criada para o protótipo PP1.-----	30
<b>Figura 2.7</b> - Diagrama da ligação no protótipo PP2. -----	31
<b>Figura 2.8</b> - Seqüência das $\Im mm's$ criadas pelos núcleos para o protótipo PP2.-----	32

<b>Figura 2.9</b> - Diagrama de ligação imposta ao protótipo PS2. -----	33
<b>Figura 2.10</b> - Seqüência das $\Sigma mm's$ criadas pelos núcleos para o protótipo PS2. -----	34
<b>Figura 2.11</b> - Bobinas de prova instaladas na estrutura magnética. -----	35
<b>Figura 2.12</b> - Bancada utilizada para medição de fluxo magnético e corrente de excitação.-----	36
<b>Figura 2.13</b> - Montagem para medição de resistência por enrolamento.-----	37
<b>Figura 2.14</b> - Circuito por Fase para os protótipos PS1 e PS2. -----	40
<b>Figura 2.15</b> - Circuito por Fase do protótipo PP1. -----	40
<b>Figura 2.16</b> - Circuito por Fase do protótipo PP2.-----	41
<b>Figura 2.17</b> - Linhas de fluxo presentes nos núcleos. -----	43
<b>Figura 2.18</b> - Modelagem em uma lâmina do material. -----	46
<b>Figura 2.19</b> - Ciclo de Histerese.-----	50
<b>Figura 2.20</b> - Circuito magnético existente nas estruturas dos protótipos. -----	53
<b>Figura 3.1</b> – Curva experimental da característica operacional dos protótipos com ligação em série. -----	62
<b>Figura 3.2</b> – Comportamento das perdas totais, no cobre e no ferro para o protótipo PS1.-----	64
<b>Figura 3.3</b> - Curva real da indução magnética nos núcleos dos protótipos série.-----	66
<b>Figura 3.4</b> - Forma de onda das perdas por correntes de Foucault em um núcleo. -----	68
<b>Figura 3.5</b> - Nomeação dos núcleos do protótipo PS1.-----	70
<b>Figura 3.6</b> - Nomeação dos núcleos do protótipo PS2.-----	71
<b>Figura 3.7</b> - Forma de onda da indução magnética presente na travessa 6 da Figura 3.11-----	77
<b>Figura 3.8</b> – Conteúdo Harmônico presente na forma de onda da Figura 3.7a.-----	78
<b>Figura 3.9</b> – Esquema de ligação ensaiado no protótipo PS2. -----	80
<b>Figura 3.10</b> – Mudança de esquema de ligação ensaiado para o protótipo PS2.-----	80
<b>Figura 3.11</b> – Denominação das travessas e retornos do protótipo PS1. -----	81
<b>Figura 3.12</b> – Denominação das travessas e retornos do protótipo PS2.-----	82
<b>Figura 3.13</b> - Curva BxH para o material presente nas estruturas ferromagnéticas dos protótipos, fornecida pelo fabricante. -----	83
<b>Figura 3.14</b> - Curva característica de um material ferromagnético. -----	89
<b>Figura 3.15</b> - Curva característica de um material ferromagnético. -----	90
<b>Figura 3.16</b> – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PS1. ---	96
<b>Figura 3.17</b> – a)Indução magnética no núcleo 1 e b)Indução magnética no núcleo 2.-----	96

<b>Figura 3.18</b> – a)Indução magnética no núcleo 3 e b)Indução magnética no núcleo 4.-----	97
<b>Figura 3.19</b> – a)Indução magnética no núcleo 5 e b)Indução magnética no núcleo 6.-----	97
<b>Figura 3.20</b> – a)Indução magnética no núcleo 7 e b)Indução magnética no núcleo 7.-----	97
<b>Figura 3.21</b> – Indução magnética no núcleo 9.-----	98
<b>Figura 3.22</b> – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PS1.-----	98
<b>Figura 3.23</b> – a)Indução magnética na travessa 1 e b)Indução magnética na travessa 2.--	99
<b>Figura 3.24</b> – a)Indução magnética na travessa 3 e b)Indução magnética na travessa 4.--	99
<b>Figura 3.25</b> – a)Indução magnética na travessa 5 e b)Indução magnética na travessa 6.--	99
<b>Figura 3.26</b> – a)Indução magnética na travessa 7 e b)Indução magnética na travessa 8.-	100
<b>Figura 3.27</b> – a)Indução magnética no retorno 1 e b)Indução magnética no retorno 2.--	100
<b>Figura 3.28</b> – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PS2. --	101
<b>Figura 3.29</b> – a)Indução magnética no núcleo 1 e b)Indução magnética no núcleo 2.----	101
<b>Figura 3.30</b> – a)Indução magnética no núcleo 3 e b)Indução magnética no núcleo 4.----	101
<b>Figura 3.31</b> – a)Indução magnética no núcleo 5 e b)Indução magnética no núcleo 6.----	102
<b>Figura 3.32</b> – a)Indução magnética no núcleo 7 e b)Indução magnética no núcleo 8.----	102
<b>Figura 3.33</b> – Indução magnética no núcleo 9.-----	102
<b>Figura 3.34</b> – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PS2.-----	103
<b>Figura 3.35</b> – a)Indução magnética na travessa 1 e b)Indução magnética na travessa 2.	103
<b>Figura 3.36</b> – a)Indução magnética na travessa 3 e b)Indução magnética na travessa 4.	103
<b>Figura 3.37</b> – a)Indução magnética na travessa 5 e b)Indução magnética na travessa 6.	104
<b>Figura 3.38</b> – a)Indução magnética na travessa 7 e b)Indução magnética na travessa 8.-	104
<b>Figura 3.39</b> – a)Indução magnética no retorno 1 e b)Indução magnética no retorno 2. --	104
<b>Figura 4.1</b> - Curva característica operacional dos protótipos com ligação em paralelo.--	108
<b>Figura 4.2</b> – Curva BxH para o material presente nas estruturas ferromagnéticas dos protótipos, fornecida pelo fabricante. -----	109
<b>Figura 4.3</b> – Estrutura magnética para visualização dos núcleos no protótipo PP1. -----	110
<b>Figura 4.4</b> – Forma de onda da corrente presente nos enrolamentos primários nos núcleos com apenas um enrolamento primário por núcleo. -----	110
<b>Figura 4.5</b> – Forma de onda da corrente no primário e secundário. -----	111

<b>Figura 4.6</b> – Estrutura do protótipo PP2.-----	112
<b>Figura 4.7</b> – Forma de onda da indução magnética e da <i>fmm</i> .-----	113
<b>Figura 4.8</b> – a)Conteúdo Harmônico da <i>fmm</i> dos núcleos presentes nas estruturas 1 e 3do protótipo PP2 e b)Conteúdo Harmônico da <i>fmm</i> dos núcleos presentes na estrutura 2 do protótipo PP2. -----	113
<b>Figura 4.9</b> – Forma de onda do campo magnético criado pela excitação nos núcleos da unidade central do protótipo PP2. -----	114
<b>Figura 4.10</b> – Denominação dos núcleos do protótipo PP1 -----	115
<b>Figura 4.11</b> – Nomeação dos núcleos do protótipo PP2.-----	116
<b>Figura 4.12</b> – Forma de onda da indução magnética encontrada nas partes de fechamento de circuito magnético. -----	123
<b>Figura 4.13</b> – Distorção harmônica da forma de onda da Figura 4.12. -----	123
<b>Figura 4.14</b> – Nomeação das travessas e retorno na estrutura do protótipo PP1. -----	124
<b>Figura 4.15</b> – Forma de onda da indução magnética na travessa 3 do protótipo PP1. ----	125
<b>Figura 4.16</b> – Forma de onda da indução magnética na travessa 6 do protótipo PP1. ----	125
<b>Figura 4.17</b> – Nomeação das travessas e retorno na estrutura do protótipo PP2. -----	126
<b>Figura 4.18</b> – Circuito magnético existente nas estruturas dos protótipos. -----	133
<b>Figura 4.19</b> – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnetica do protótipo PP1. --	138
<b>Figura 4.20</b> - a)Indução magnética no núcleo 1 e b)Indução magnética no núcleo 2. ----	138
<b>Figura 4.21</b> - a)Indução magnética no núcleo 3 e b)Indução magnética no núcleo 4. ----	139
<b>Figura 4.22</b> - a)Indução magnética no núcleo 5 e b)Indução magnética no núcleo 6. ----	139
<b>Figura 4.23</b> - a)Indução magnética no núcleo 7 e b)Indução magnética no núcleo 8. ----	139
<b>Figura 4.24</b> - Indução magnética no núcleo 9. -----	140
<b>Figura 4.25</b> – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnetica do protótipo PP1. -----	140
<b>Figura 4.26</b> - a)Indução magnética na travessa 1 e b)Indução magnética na travessa 2. -	141
<b>Figura 4.27</b> - a)Indução magnética na travessa 3 e b)Indução magnética na travessa 4. -	141
<b>Figura 4.28</b> - a)Indução magnética na travessa 5 e b)Indução magnética na travessa 6. -	141
<b>Figura 4.29</b> - a)Indução magnética na travessa 7 e b)Indução magnética na travessa 8. -	142
<b>Figura 4.30</b> - a)Indução magnética no retorno 1 e b)Indução magnética no retorno 2. --	142

<b>Figura 4.31</b> – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PP2. --	142
<b>Figura 4.32</b> - a)Indução magnética no núcleo 1 e b)Indução magnética no núcleo 2. ----	143
<b>Figura 4.33</b> - a)Indução magnética no núcleo 3 e b)Indução magnética no núcleo 4. ----	143
<b>Figura 4.34</b> - a)Indução magnética no núcleo 5 e b)Indução magnética no núcleo 6. ----	143
<b>Figura 4.35</b> - a)Indução magnética no núcleo 7 e b)Indução magnética no núcleo 8. ----	144
<b>Figura 4.36</b> - Indução magnética no núcleo 9. -----	144
<b>Figura 4.37</b> – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PP1. -----	144
<b>Figura 4.38</b> - a)Indução magnética na travessa 1 e b)Indução magnética na travessa 2.-	145
<b>Figura 4.39</b> - a)Indução magnética na travessa 3 e b)Indução magnética na travessa 4.-	145
<b>Figura 4.40</b> - a)Indução magnética na travessa 5 e b)Indução magnética na travessa 6.-	145
<b>Figura 4.41</b> - a)Indução magnética no retorno 1 e b)Indução magnética no retorno 2. ---	146
<b>Figura 4.42</b> - a)Indução magnética no retorno 3 e b)Indução magnética no retorno 4. ---	146
<b>Figura 4.43</b> - a)Indução magnética no retorno 5 e b)Indução magnética no retorno 6. ---	146

## Lista de tabelas

<b>Tabela 2.1</b> - Dimensões das estruturas magnéticas.-----	25
<b>Tabela 2.2</b> - Número de espiras e secção dos condutores de cada enrolamento para os protótipos PS1 e PS2. -----	26
<b>Tabela 2.3</b> - Número de espiras e secção dos condutores de cada enrolamento para os protótipos PP1 e PP2.-----	26
<b>Tabela 2.4</b> - Valores registrados para a obtenção da resistência média no enrolamento $N_0$ do protótipo PS1. -----	38
<b>Tabela 2.5</b> - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PS1 na temperatura de 25°C.-----	38
<b>Tabela 2.6</b> - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PS2 na temperatura de 25°C.-----	39
<b>Tabela 2.7</b> - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PP1 na temperatura de 25°C.-----	39
<b>Tabela 2.8</b> - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PP2 na temperatura de 25°C.-----	39
<b>Tabela 2.9</b> - Resistência por fase em cada um dos protótipos na temperatura de 25°C ----	41
<b>Tabela 2.10</b> - Pontos definidos para aquisição de dados e os valores rms da corrente. ----	45
<b>Tabela 2.11</b> - Valores de tensão medidos para o cálculo do ganho dos circuitos integradores. -----	57
<b>Tabela 3.1</b> - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS1. -----	71
<b>Tabela 3.2</b> - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS2. -----	72
<b>Tabela 3.3</b> - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos. -----	73
<b>Tabela 3.4</b> - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos. -----	73

<b>Tabela 3.5</b> –Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS1 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos. -----	74
<b>Tabela 3.6</b> - Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS2 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos. -----	74
<b>Tabela 3.7</b> - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos. -----	75
<b>Tabela 3.8</b> - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos. -----	76
<b>Tabela 3.9</b> - Valores máximos de indução magnética instantânea presentes nas travessas e retornos dos protótipos PS1 e PS2, bem como seus erros absolutos. -----	82
<b>Tabela 3.10</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos. -----	84
<b>Tabela 3.11</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos. -----	85
<b>Tabela 3.12</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos. -----	85
<b>Tabela 3.13</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos. -----	86
<b>Tabela 3.14</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos. 86	
<b>Tabela 3.15</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos. 87	
<b>Tabela 3.16</b> - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PS1, bem como o seu erro absoluto.-----	87
<b>Tabela 3.17</b> - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PS2, bem como o seu erro absoluto.-----	88
<b>Tabela 3.18</b> - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PS1.92	
<b>Tabela 3.19</b> - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PS2.92	



<b>Tabela 3.20</b> - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PS1, bem como seus erros absolutos.-----	93
<b>Tabela 3.21</b> - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PS2, bem como seus erros absolutos.-----	93
<b>Tabela 3.22</b> – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PS1. -----	95
<b>Tabela 3.23</b> – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PS2. -----	95
<b>Tabela 4.1</b> - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos. -----	116
<b>Tabela 4.2</b> - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PP2. -----	117
<b>Tabela 4.3</b> - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos. -----	118
<b>Tabela 4.4</b> - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos. -----	118
<b>Tabela 4.5</b> – Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PP1 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos. -----	120
<b>Tabela 4.6</b> – Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PP2 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos. -----	121
<b>Tabela 4.7</b> - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos. -----	122
<b>Tabela 4.8</b> - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos. -----	122
<b>Tabela 4.9</b> - Valores máximos de indução magnética instantânea presente nas travessas e retornos dos protótipos PP1 e PP2, bem como seus erros absolutos. -----	127
<b>Tabela 4.10</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos. -----	128

<b>Tabela 4.11</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos. -----	129
<b>Tabela 4.12</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos. -----	129
<b>Tabela 4.13</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos. -----	130
<b>Tabela 4.14</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos.	130
<b>Tabela 4.15</b> - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos.	131
<b>Tabela 4.16</b> - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PP1, bem como o seu erro absoluto.-----	131
<b>Tabela 4.17</b> - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PP2, bem como o seu erro absoluto.-----	132
<b>Tabela 4.18</b> - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PP1.	134
<b>Tabela 4.19</b> - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PP2.	135
<b>Tabela 4.20</b> - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PP1, bem como seus erros absolutos.-----	135
<b>Tabela 4.21</b> - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PP2, bem como seus erros absolutos.-----	136
<b>Tabela 4.22</b> – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PP1. -----	137
<b>Tabela 4.23</b> – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PP2. -----	137

# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

Devido às poucas soluções para a compensação reativa em linhas de transmissão é que, ao longo dos últimos anos, o LDSP – Laboratório Digital de Sistemas de Potência, sendo este vinculado ao DEESP – Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência da UFPE, vem desenvolvendo trabalhos na linha de pesquisa dos reatores saturados.

Além de se comportarem adequadamente às operações dos sistemas elétricos, qualidades tais como baixo custo de aquisição, durabilidade, alta confiabilidade e baixo custo de manutenção foram outros atrativos para que se insistisse em pesquisas sobre estes equipamentos. Todavia, para assegurar o seu desempenho funcional, foram devidamente projetados e construídos quatro protótipos de reatores saturados para serem submetidos a teste sob regime de baixa tensão.

Mesmo sendo para baixa tensão, seus desempenhos podem ser extrapolados qualitativamente para a um equipamento de maior porte para a compensação em linhas de transmissão de alta tensão.

Diante de tanto investimento nesta linha de pesquisa, uma das metas desta empreitada é justamente se ter uma estimativa no que diz respeito às perdas nos núcleos ferromagnéticos dos reatores saturados que, diante do comportamento dos protótipos e das grandezas envolvidas, possa se chegar a um equacionamento das grandezas de importância.

## 1.2 Conteúdo do trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

Capítulo 1: é composto de um relato sobre o princípio de funcionamento dos reatores saturados, estruturas magnéticas utilizadas e tipos de ligação;

Capítulo 2: apresenta as características construtivas dos protótipos construídos pelo LDSP-DEESP, mostrando dimensões, materiais utilizados e tipos de ligações. Retrata a metodologia de ensaios, formação da bancada de ensaios, equipamentos utilizados, formas de registro. Mostra ainda as parcelas de perdas mensuráveis no material ferromagnético e as suas modelagens e os erros relativos cometidos devido à imprecisão dos instrumentos e suas respectivas propagações ao longo dos resultados;

Capítulo 3: Apresenta a metodologia utilizada para o cálculo das perdas magnéticas nos protótipos que utilizam ligação dos enrolamentos primários em série, sendo analisado o comportamento da indução magnética em todas as partes da estrutura magnética destes protótipos e, determinadas as perdas magnéticas através das equações obtidas no capítulo 2 comparando-as com os valores medidos.

Capítulo 4: tem o mesmo conteúdo do capítulo anterior, com referência aos protótipos com ligação dos enrolamentos primários em paralelo;

Capítulo 5: refere-se a conclusões dos resultados obtidos empregando as equações estabelecidas para a obtenção das perdas magnéticas, através das propriedades do material e da indução magnética de operação, comparando com valores práticos, medidos diretamente sobre o equipamento. São relatadas também, as comparações entre os modelos de reatores saturados com ligação em série com os modelos de reatores saturados com ligação em paralelo, com o intuito de estabelecer vantagens e desvantagens de um sobre os demais.

### 1.3 Sua finalidade

Os reatores lineares e os bancos de capacitores são utilizados como compensadores reativos em sistemas de transmissão e assim controlam a tensão quando ocorre uma subtensão ou uma sobretensão.

Entretanto a manobra destes equipamentos não é tarefa fácil e a sua energização é feita de forma discreta, ou seja, são colocados blocos destes equipamentos. Uma das características mais atraentes dos reatores saturados é que eles cumprem a mesma função descrita acima, quando operando em conjunto com um banco de capacitor, com um desempenho mais adequado e custo bem mais baixo.

Este desempenho mais adequado relaciona um menor consumo de energia que os reatores convencionais, pois eles são projetados para atuar entre uma faixa de tensão estipulada no projeto, por exemplo, de 0,95 a 1,05p.u. Para qualquer valor abaixo de 0,95 o reator saturado estará inoperante, não consumindo praticamente nenhuma energia, apenas as suas perdas no núcleo, além de terem uma manobra suave de forma contínua. Um exemplo bem simples e de fácil entendimento é mostrado na Figura 1.1.

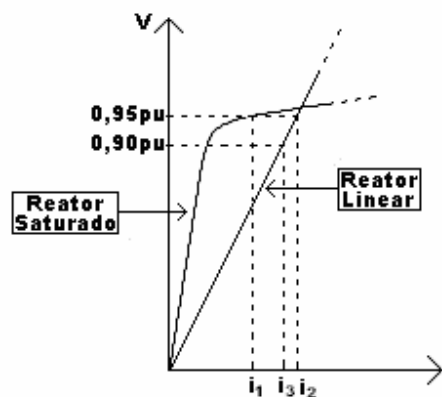


Figura 1.1 - Curva  $V \times I$  do Reator Linear e o Reator Saturado.

Através da Figura 1.1, pode-se observar que, se inicialmente a tensão no barramento for 0,95p.u., o reator saturado necessitará da corrente  $i_1$  enquanto que o reator linear precisará de uma corrente um pouco maior para o mesmo nível de tensão, representada por  $i_2$ . Ao ocorrer um aumento na carga da linha de transmissão (LT) fazendo com que a tensão diminua, o reator saturado entrará em sua região linear fazendo com que o seu consumo de energia seja apenas

para a magnetização do núcleo enquanto que o reator linear terá um valor relativamente alto de corrente ( $i_3$ ) para a mesma situação.

Em situações contrárias, ou seja, para tensões elevadas, o reator saturado é mais efetivo pois a sua reatância é baixa fazendo com que ele possa absorver uma grande quantidade de energia e para o reator linear a inclinação é constante, o que limitará o valor absorvido de energia.

## 1.4 O princípio básico

Para início de estudo, a melhor forma de visualizar um reator saturado é imaginar um transformador com núcleo de ferro e enrolamentos convencionais, porém, possuindo apenas os enrolamentos primários e operando com o núcleo saturado, conforme a Figura 1.2.

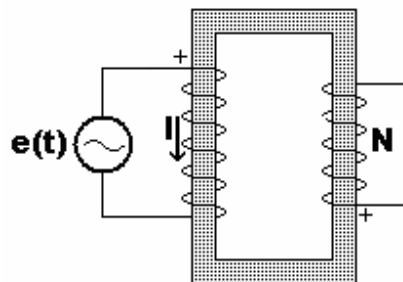


Figura 1.2 - Reator saturado elementar.

A sua característica  $\phi \times i$  do núcleo de forma idealizada é a seguinte:

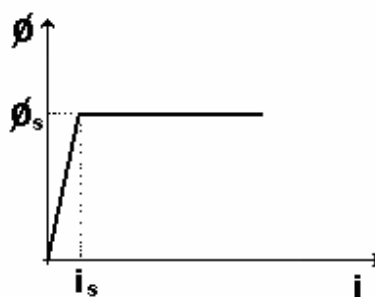


Figura 1.3 - Característica  $\phi \times i$

Através da Figura 1.3 é possível analisar que até um determinado valor de corrente ( $i_s$ ) há uma grande variação de fluxo no núcleo do reator e conseqüentemente uma indutância de magnetização grande. A seguir, têm-se as equações que trarão tal informação [4]:

$$v = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

Esta é a equação da tensão aplicada nos terminais do enrolamento. Dela pode-se verificar que:

$$\begin{aligned} N \frac{d\phi}{dt} &= L \frac{di}{dt} \\ L &= N \frac{d\phi}{di} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Então para uma grande variação de fluxo e uma pequena variação de corrente, tem-se uma indutância muito elevada.

Quando a corrente atinge o valor de  $i_s$ , não há mais variação de fluxo e a equação da indutância acima descrita torna-se zero, o que na prática não ocorre.

Uma curva que se aproxima mais da curva real é mostrada na Figura 1.4.

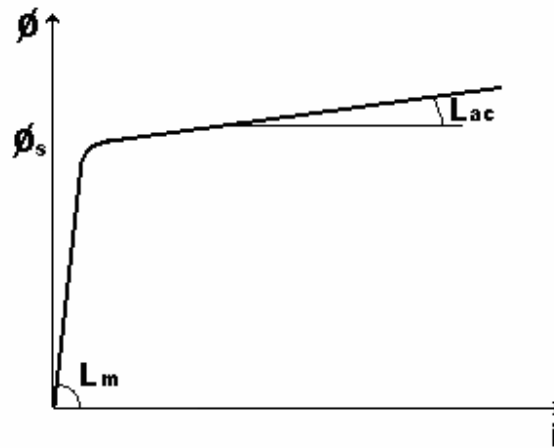


Figura 1.4 - Característica  $\phi$ xi real aproximada

Desta forma, pode-se verificar que a indutância após ter atingido o valor de  $i_s$  não é zero, mas deve-se ter em mente que o ideal seria que isso acontecesse. O que se pode fazer na prática para que este valor se aproxime do zero é a conexão de capacitores em série com o

reator saturado com a intenção de baixar a inclinação da parte saturada na curva, ou seja, o reativo capacitivo anula o reativo indutivo do reator saturado.

Considerando agora que uma corrente puramente senoidal está sendo aplicada aos terminais do enrolamento, de forma que possa saturar o núcleo, as Figuras 1.5 e 1.6 ilustram o que acontece, respectivamente, com as formas de onda das grandezas de fluxo magnético e de tensão.

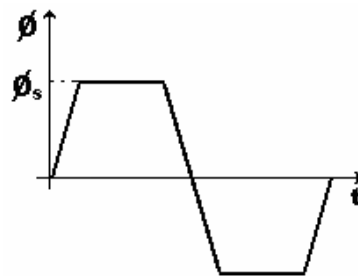


Figura 1.5 - Fluxo percorrido no núcleo.

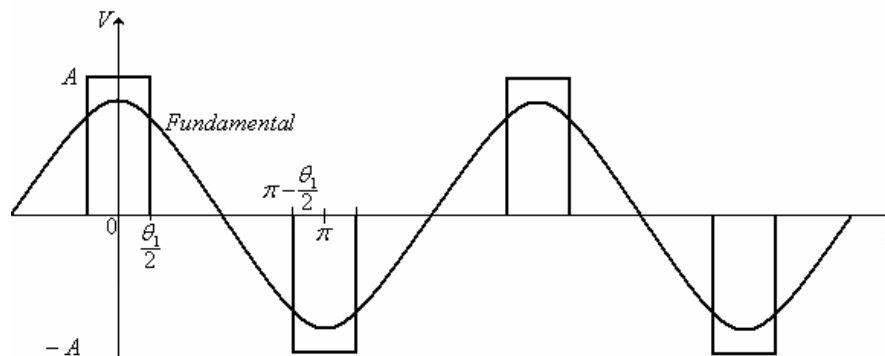


Figura 1.6 - Forma de onda da tensão.

Inicialmente, a taxa de variação de corrente é tão pequena que o traçado da sua curva se aproxima de um segmento de reta e o mesmo princípio pode ser aplicado para a curva do fluxo [1]. Quando a corrente atinge o valor  $i_s$  não há mais variação de fluxo e ele se torna constante. Porém a tensão é definida pela variação de fluxo conforme a expressão abaixo:

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3)$$

Analisando o comportamento da curva do fluxo, pode-se verificar que, durante o tempo em que há variação de fluxo e este por ser praticamente um segmento de reta, a derivada é uma



constante e a tensão um valor fixo. Durante o tempo em que o fluxo é constante o valor de tensão é nulo, pois a derivada de uma constante é zero.

Uma função com essas características é descrita da seguinte forma de Fourier:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \text{sen}(h\omega t)] \quad (1.4)$$

onde  $h = 1, 2, 3, \dots, \infty$ .

Ao considerar uma função par, a função resume-se para a equação:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega t) \quad (1.5)$$

Para se achar o valor de  $a_h$  se tem:

$$a_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos(h\omega t) d\omega t \quad (1.6)$$

Analisando a função na Figura 1.6 é perceptível que:

$$f(t) = \begin{cases} A, & 0 < \theta < \frac{\theta_1}{2} \\ 0, & \frac{\theta_1}{2} < \theta < \pi - \frac{\theta_1}{2} \\ -A, & \pi - \frac{\theta_1}{2} < \theta < \pi \end{cases} \quad (1.7)$$

onde  $A$  é amplitude da tensão.

Separando pelos intervalos aplicados no limite da integral, tem-se:

$$a_h = \frac{2}{\pi} \left[ \int_0^{\frac{\theta_1}{2}} A \cos(h\omega t) d\omega t + \int_{\frac{\theta_1}{2}}^{\pi - \frac{\theta_1}{2}} 0 \cdot \cos(h\omega t) d\omega t + \int_{\pi - \frac{\theta_1}{2}}^{\pi} -A \cos(h\omega t) d\omega t \right] \quad (1.8)$$

Resolvendo as integrais:

$$a_h = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{A}{h} \text{sen}(h\omega t) \Big|_0^{\frac{\theta_1}{2}} - \frac{A}{h} \text{sen}(h\omega t) \Big|_{\pi - \frac{\theta_1}{2}}^{\pi} \right] \quad (1.9)$$

Aplicando os limites:

$$a_h = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{A}{h} \text{sen} \left( h \frac{\theta_1}{2} \right) - \frac{A}{h} \text{sen}(h\pi) + \frac{A}{h} \text{sen} \left[ \left( \pi - \frac{\theta_1}{2} \right) h \right] \right] \quad (1.10)$$

$$a_h = \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) - \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}(h\pi) + \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left[\left(\pi - \frac{\theta_1}{2}\right)h\right] \quad (1.11)$$

Analisando a Equação 1.11, percebe-se que o segundo termo da Equação  $\operatorname{sen}(h\pi)$  sempre será zero para qualquer valor de  $h$  e desenvolvendo o terceiro termo da mesma equação, terá como resultado a seguinte forma:

$$a_h = \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) + \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}(h\pi) \cos\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) - \frac{2A}{\pi h} \cos(h\pi) \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) \quad (1.12)$$

Novamente o segundo termo da Equação 1.12 sempre será zero, simplificando a equação em:

$$a_h = \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) - \frac{2A}{\pi h} \cos(h\pi) \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) \quad (1.13)$$

Para  $h$  par, o termo  $a_h$  da Equação 1.13 terá um valor nulo, pois:

$$\cos(h\pi) = 1 \quad (1.14)$$

Fazendo com que o primeiro e o segundo termo da Equação 1.13 se anulem:

$$a_h = \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) - \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) = 0 \quad (1.15)$$

Para  $h$  ímpar, o termo  $a_h$  será não nulo:

$$\cos(h\pi) = -1 \quad (1.16)$$

que, ao ser substituído na Equação 1.13, o resultado de  $a_h$  é obtido na Equação 1.17:

$$a_h = \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) + \frac{2A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) = \frac{4A}{\pi h} \operatorname{sen}\left(\frac{h\theta_1}{2}\right) \quad (1.17)$$

Desta maneira, desenvolvendo a função da tensão resultante em série de Fourier, verifica-se um grande número de harmônicos ímpares para o modelo de reator saturado ilustrado na Figura 1.2. Isso mostra que se torna inviável o uso de um reator saturado com estas características e, a partir daí, nasceu a idéia de se estudar o seu comportamento quando era inserido mais de um núcleo nos reatores saturados.

## 1.5 A essência dos reatores com saturação natural

É possível obter uma compensação harmônica na corrente e na tensão de alimentação dos reatores saturados, simplesmente com formas, devidamente estudadas, de se acrescentar núcleo. Erich Friedlander estabeleceu com a análise de amplificadores magnéticos, que para se obter a eliminação de todos os harmônicos presentes em um dispositivo composto de  $n$  núcleos saturados, com exceção daqueles de ordem  $2kn \pm 1 \forall k \in \mathbb{N}$ , os enrolamentos do reator saturado deverão estar dispostos em conformidade com o sistema de suprimento utilizado no que tange a seqüência da fase das correntes. Tal adequação exige que as forças magnetomotrizes ( $fmm's$ ) de excitação dos núcleos exibam uma mesma intensidade e defasagem de  $\pi/n$  radianos umas das outras, quando se considera um ciclo completo de tensão de alimentação [1][2].

Para questão de estudo, na análise feita aqui, o reator saturado tem estrutura composta de 6 núcleos, conforme a Figura 1.7:

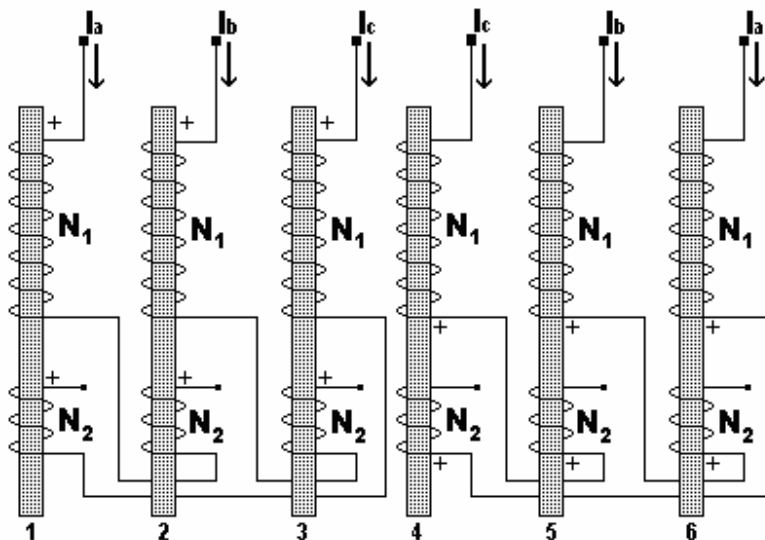


Figura 1.7 - Arranjo dos enrolamentos de um reator saturado de 6 núcleos.

Observa-se que cada um dos núcleos possui dois enrolamentos com  $N_1$  e  $N_2$  espiras, respectivamente. De acordo com Erich Friedlander, a compensação harmônica acontecerá neste caso se, e somente se, as forças magnetomotrizes estiverem defasadas em intervalos de  $\pi/6$  uma das outras.

Para isso, a relação de número de espiras  $N_1/N_2$  e a fase da corrente que circulará em cada um dos enrolamentos deverão ser selecionadas adequadamente [1] [2].

Diante da Figura 1.7 a  $\mathfrak{I}mm$  resultante em cada núcleo ser é:

$$\mathfrak{I}mm_1 = N_1 I_a - N_2 I_c \quad (1.18)$$

$$\mathfrak{I}mm_2 = N_1 I_b - N_2 I_a \quad (1.19)$$

$$\mathfrak{I}mm_3 = N_1 I_c - N_2 I_b \quad (1.20)$$

$$\mathfrak{I}mm_4 = N_1 I_c - N_2 I_a \quad (1.21)$$

$$\mathfrak{I}mm_5 = N_1 I_b - N_2 I_c \quad (1.22)$$

$$\mathfrak{I}mm_6 = N_1 I_a - N_2 I_b \quad (1.23)$$

Adotando-se como relação entre os números de espiras dos enrolamentos, a fração [1]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} \quad (1.24)$$

e, para questão de análise, considerando um sistema trifásico perfeitamente senoidal, tendo suas correntes defasadas de  $120^\circ$  uma das outras, substituindo nas equações das  $\mathfrak{I}mm$ 's, os seguintes resultados serão obtidos:

$$\mathfrak{I}mm_1 = N_1 I_m \text{sen} \omega t - \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) = \sqrt{\frac{3}{2}} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - \pi/12) \quad (1.25)$$

$$\mathfrak{I}mm_2 = N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) - \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} N_1 I_m \text{sen}(\omega t) = \sqrt{\frac{3}{2}} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 3\pi/4) \quad (1.26)$$

$$\mathfrak{I}mm_3 = N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) = \sqrt{\frac{3}{2}} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) \quad (1.27)$$

$$\mathfrak{I}mm_4 = N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} N_1 I_m \text{sen}(\omega t) = \sqrt{\frac{3}{2}} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 15\pi/12) \quad (1.28)$$

$$\mathfrak{I}mm_5 = N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) - \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) = \sqrt{\frac{3}{2}} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 7\pi/12) \quad (1.29)$$

$$\Im m m_6 = N_1 I_m \text{sen} \omega t - \frac{(\sqrt{3}-1)}{2} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) = \sqrt{\frac{3}{2}} N_1 I_m \text{sen}(\omega t - 23\pi/12) \quad (1.30)$$

Todas as  $\Im m m$ 's têm a mesma amplitude e são defasadas em  $\pi/6$  radianos. Vale lembrar que a relação de espiras teve sua escolha proposital, de forma a se obter estes resultados.

Assim, o diagrama fasorial das  $\Im m m$ 's resultantes tem a disposição mostrada na Figura 1.8.

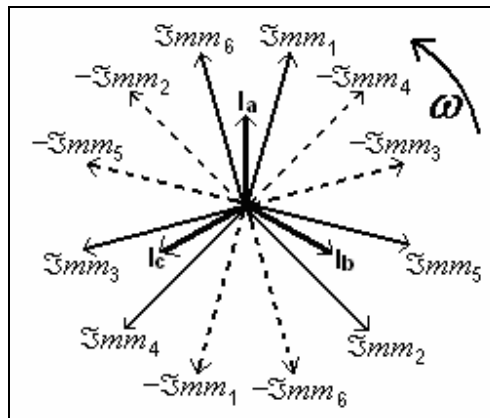


Figura 1.8 – Distribuição das  $\Im m m$ 's

A Figura 1.8 mostra a distribuição das  $\Im m m$ 's no espaço de um ciclo completo da alimentação conforme descrito por Friedlander. Essa disposição das  $\Im m m$ 's no espaço fasorial deverá ser conservada independentemente do número de núcleos que o reator saturado possua, ou seja, sempre defasadas de  $\pi/n$ . Os enrolamentos poderão estar ligados em série ou em paralelo sem que ocorra qualquer desequilíbrio entre as  $\Im m m$ 's. É permitida a mudança da seqüência sem que haja alteração na defasagem.

No Capítulo 2, são mostradas as seqüências utilizadas para fins de ensaios nos protótipos.

## 1.6 Ligação paralela dos enrolamentos

Tendo em vista o mesmo arranjo mostrado na Figura 1.7, os enrolamentos são agora ligados em paralelo de acordo com a Figura 1.9:

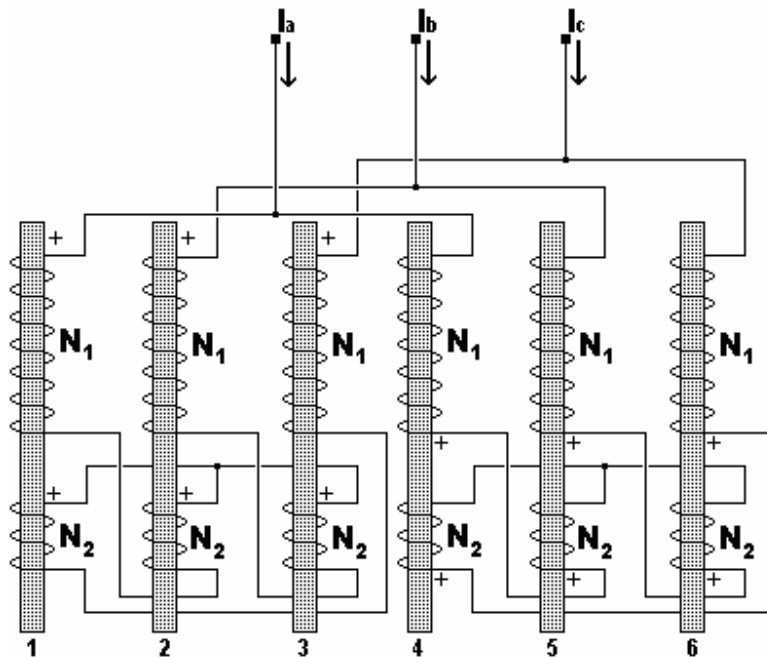


Figura 1.9 – Ligação dos enrolamentos em paralelo.

Assim, o arranjo ficará com duas unidades trifásicas independentes, sendo a primeira constituída pelos núcleos 1,2 e 3 e a segunda com os núcleos 4,5 e 6.

Nesta forma de ligação, no seu funcionamento, apenas um núcleo estará saturado em cada unidade trifásica, a cada semi-ciclo do suprimento. Assim, cada núcleo terá um período de saturação de  $\pi/3$  radianos. Isso está, de acordo com Friedlander segundo o qual, para o caso de estruturas constituídas de 6 núcleos, tem-se uma distribuição de  $\zeta_{mm}$  de  $\pi/6$  radianos, o que forçará a saturação de dois núcleos simultaneamente, sendo um em cada unidade trifásica [1][3].

Sendo este tipo de reator saturado submetido a uma tensão senoidal e considerando o material com uma curva de magnetização idealizada de acordo com a Figura 1.10, é possível verificar que, enquanto a saturação não for alcançada, não existirá indução magnética e, de

acordo com a lei de Ampere  $\mathbf{Hl} = \mathbf{NI}$ , também não se tem corrente e o enrolamento tem um comportamento de uma chave aberta.

Ao se atingir a saturação, de acordo com a característica do material, haverá indução e, conseqüentemente, fluirá corrente pelo enrolamento em forma de um pulso. Mas o que acontece é que esta corrente que circulará pelo enrolamento do núcleo saturado deverá passar por outro enrolamento  $N_2$  de um núcleo isento de saturação. Para que este núcleo fique fora da saturação, a  $\mathfrak{I}mm$  gerada neste enrolamento deverá ser anulada pela tensão induzida no outro enrolamento  $N_1$  do mesmo núcleo.

Assim as correntes nas três fases deverão ser pulsos e sua soma deverá ser zero, pois a ligação em cada unidade é estrela com neutro flutuante.

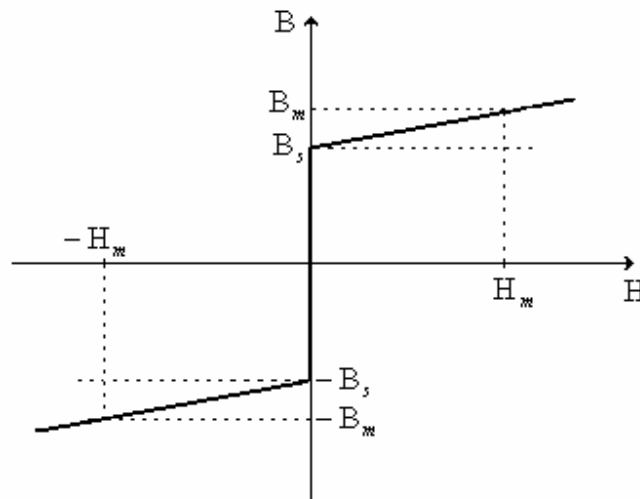


Figura 1.10 – Característica do material do núcleo.

Na análise do fluxo magnético presente em cada núcleo do reator saturado, verifica-se uma distorção na sua forma de onda devido ao que foi descrito anteriormente sobre circulação de corrente em enrolamento de núcleo desprovido de saturação.

A forma senoidal deste fluxo magnético só é alcançada quando é colocado um terceiro conjunto de enrolamentos ligados em delta, de forma a circular corrente neste delta, fazendo com que uma  $\mathfrak{I}mm$  seja criada por este enrolamento para assegurar a anulação da  $\mathfrak{I}mm$  do enrolamento  $N_2$  que está em série com o enrolamento  $N_1$  de um núcleo saturado [1].

Isto é comprovado quando se abre a ligação delta deste terceiro enrolamento, quando volta a distorcer a forma de onda do fluxo magnético [1][3].

## 1.7 Ligação série dos enrolamentos

Esta é a segunda maneira de se obter uma distribuição simétrica das  $\mathfrak{Smm}$ 's no espaço fasorial. A ligação em série dos enrolamentos para o caso do reator saturado de 6 núcleos deverá ter a montagem mostrada na Figura 1.11:

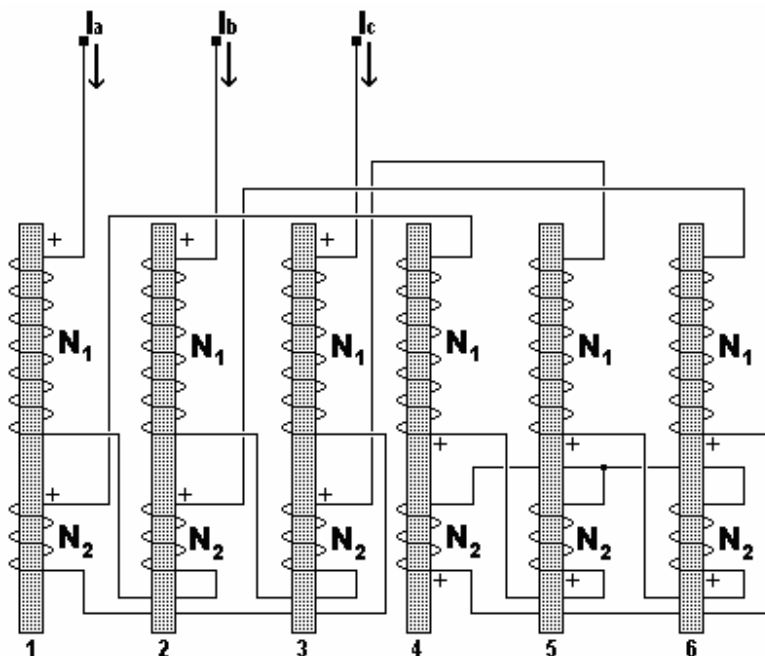


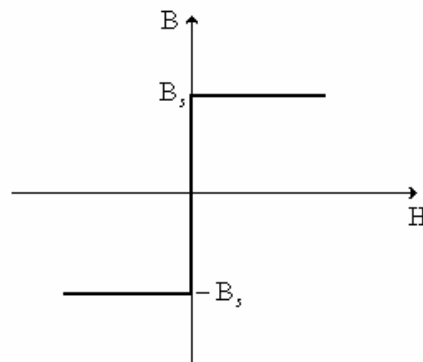
Figura 1.11 – Ligação dos enrolamentos em série.

A idéia neste tipo de montagem é exatamente o contrário da ligação paralela, onde aqui apenas um núcleo estará fora da saturação, em um período de  $\pi/6$  radianos em um semi-ciclo de suprimento [1].

Outra observação importante é que uma fase do reator saturado é constituída por quatro enrolamentos em série, em núcleos diferentes. Neste caso utiliza-se uma curva de magnetização bem simplificada para questões de estudo, conforme a Figura 1.12.



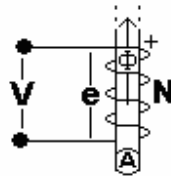
Assim, o quando núcleo estiver dentro da saturação  $B > B_s$ , não haverá variação de fluxo magnético e, conseqüentemente, haverá  $fmm$ . No caso do núcleo estar fora da saturação  $B \leq B_s$ , ocorrerá variação de fluxo magnético enlaçado nos enrolamentos existentes neste núcleo e, conseqüentemente, uma tensão será induzida nos seus terminais, o que dispensa qualquer  $fmm$  para a geração de fluxo magnético [1].



**Figura 1.12** - Curva de magnetização idealizada.

A tensão aplicada na fase A, por exemplo, deverá ser estabelecida entre os enrolamentos  $N_1$  no núcleo 1,  $N_2$  do núcleo 2,  $N_1$  do núcleo 6 e  $N_2$  do núcleo 4 em série, tendo estes a função de equilibrar as tensões existentes no circuito. Como nesta montagem apenas um estará livre de saturação, este enrolamento induzirá uma tensão capaz de estabelecer o tal equilíbrio em um intervalo de tempo definido.

Para analisarmos o comportamento no tempo, em cada enrolamento, na condição acima estabelecida, será utilizada a representação ilustrada na Figura 1.13.



**Figura 1.13** – Operação de um núcleo.

Seja  $N$  o número de espiras do enrolamento,  $A$  a secção transversal do núcleo,  $B$  a indução magnética e  $\Phi$  o fluxo no núcleo. De acordo com a lei de Faraday [4]:

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt} \quad (1.31)$$

$$dB = \left( \frac{1}{NA} \right) v dt \quad (1.32)$$

Considerando que é aplicada uma tensão perfeitamente senoidal:

$$v(t) = V_m \cos \omega t \quad (1.33)$$

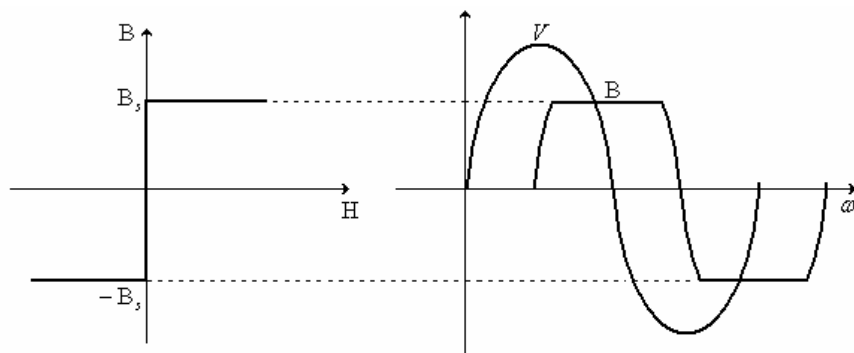
$$B = \left( \frac{V_m}{NA\omega} \right) \text{sen} \omega t = B_m \text{sen} \omega t \quad (1.34)$$

Onde:

$$B_m = \frac{V_m}{NA\omega} \quad (1.35)$$

Assim é possível afirmar que a indução magnética no núcleo terá a mesma forma de onda da tensão aplicada, apenas sendo atrasada de  $\pi/2$  radianos. Vale lembrar que cada núcleo estará na condição de saturação por um intervalo de  $\pi/6$  radiano em cada semi-ciclo.

Por isso, a indução magnética exibirá a forma senoidal somente enquanto estiver neste intervalo, pois estará livre de saturação. Ao entrar na saturação, de acordo com a curva de magnetização, o seu valor ficará constante até que atinja novamente o intervalo de não saturação e conforme a Figura 1.14:



**Figura 1.14** - Forma de onda da tensão e do fluxo em um núcleo.

Quanto mais aumenta o número de núcleos, este intervalo de não saturação vai diminuindo e este trecho da curva vai se aproximando de uma reta, a tal ponto que se pode considerar, satisfatoriamente, uma reta já que o erro é irrisório.

A Figura 1.15 mostra a forma de onda para a indução quando se tem esta consideração:

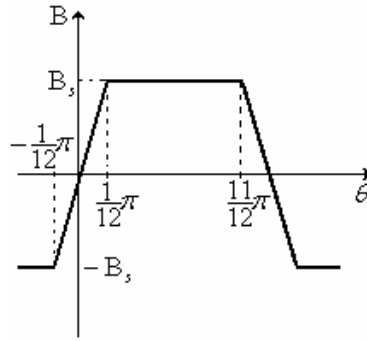


Figura 1.15 - Indução magnética no núcleo.

Dividindo a curva em três intervalos, tem-se que:

$$\begin{aligned} \frac{-1}{12} \pi \leq \theta \leq \frac{1}{12} \pi &\rightarrow B(\theta) = \left( \frac{B_s}{\pi/12} \right) \theta \\ \frac{1}{12} \pi \leq \theta \leq \frac{11}{12} \pi &\rightarrow B(\theta) = B_s \\ \frac{11}{12} \pi \leq \theta \leq \frac{13}{12} \pi &\rightarrow B(\theta) = \left( \frac{B_s}{\pi/12} \right) (\pi - \theta) \end{aligned} \quad (1.36)$$

De acordo com a lei de Faraday, a tensão induzida em um enrolamento de  $N$  espiras, montado em um núcleo com secção transversal  $A$ , será:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt} = NA \frac{dB}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1.37)$$

Como neste caso  $\theta = \omega t$ ,

$$e = NA\omega \frac{dB}{d\theta} \quad (1.38)$$

Com esta expressão, fica fácil de identificar o valor da tensão em cada um dos três trechos de análise da indução magnética.

Assim, os resultados das tensões são respectivamente:

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{12}{\pi} NA\omega B_s \\
 e &= 0 \\
 e &= -\frac{12}{\pi} NA\omega B_s
 \end{aligned}
 \tag{1.39}$$

Os resultados mostram que a forma de onda da tensão será formada por pulsos com intervalos de duração de  $\pi/6$  radianos e separados de  $\pi$  radianos, mostrado na Figura 1.16:

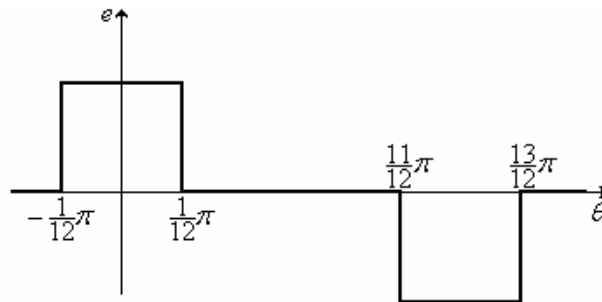


Figura 1.16 – Tensão induzida em um enrolamento.

A Figura 1.16 mostra a tensão induzida em qualquer um dos enrolamentos do reator saturado sendo que a tensão induzida em cada fase será a superposição de cada um dos enrolamentos em série disponíveis para aquela fase, sendo cada um em seu tempo devido.

Esta composição dos pulsos de tensão para o caso da fase A tem o seu comportamento mostrado na Figura 1.17, sendo que as outras fases terão o mesmo comportamento:

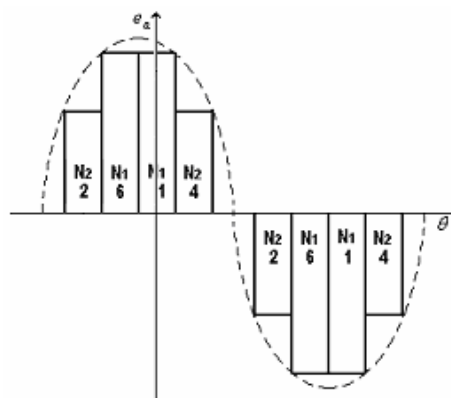


Figura 1.17 – Tensão induzida na fase A

Assim, enquanto qualquer um dos núcleos estiver fora da saturação, a  $\mathfrak{I}mm$  líquida de excitação do mesmo deverá ser nula, pois uma tensão já foi induzida em um enrolamento que é capaz de estabelecer um equilíbrio entre as tensões.

Analisando o caso do núcleo 1 estar na região de não saturação e conseqüentemente os outros cinco na saturação:

Intervalos para essa situação:

$$0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$$

$$180^\circ \leq \theta \leq 210^\circ$$

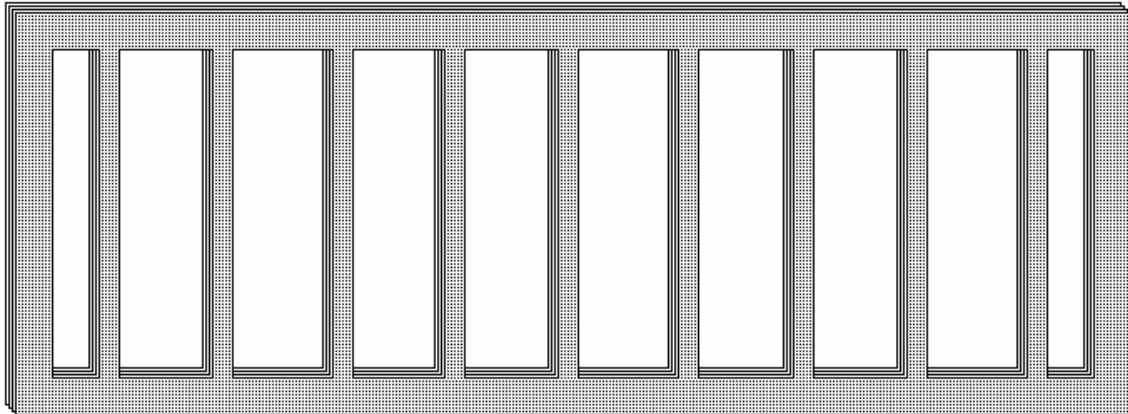
Para estes intervalos, deverá ter a relação:  $N_1 i_a = N_2 i_c$ . Lembrando que pela ligação, a soma das correntes deverá ser zero. Esta relação deverá ser obedecida durante a isenção de saturação e como  $N_1$  e  $N_2$  são grandezas fixas, as correntes terão que permanecer constantes durante este intervalo. Isso comprova que além das tensões, as correntes também serão formadas por pulsos retangulares de idêntica duração.

## 1.8 Estruturas magnéticas utilizadas nos reatores saturados

A princípio, conforme foi descrito anteriormente, um reator com saturação natural poderá dispor de vários núcleos de acordo com a necessidade de se eliminar as componentes harmônicas existentes na sua corrente de alimentação.

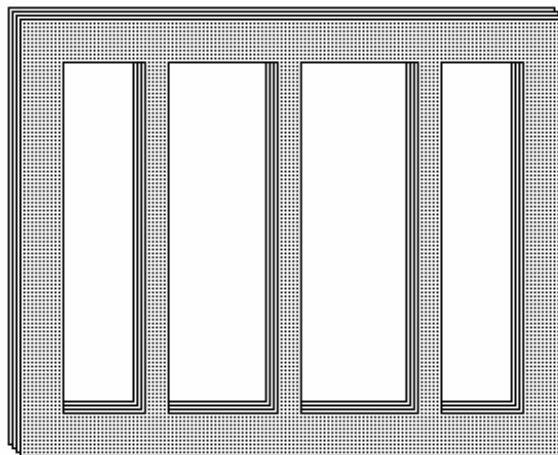
De acordo com a experiência da GEC (General Electric Company) feita por Thanawala, Ainsworth e Williams e de empresas da antiga União Soviética, segundo Jarvik e Tellinen o número de núcleos mais adequado para reatores saturados aplicados em sistemas de potência seria nove [3].

Para se obter um caminho completo de forma a garantir a passagem do fluxo magnético criado pela circulação de corrente nos enrolamentos, Yarvik e Tellinen verificaram que era necessária a inclusão de travessas e retornos, sendo que várias formas geométricas foram estudadas. Conforme Thanawala, Williams e Young e Vladislavlev, Pool, Tellinen e Yarvik tanto a GEC quanto as empresas da antiga União Soviética, a estrutura planar de monobloco é a mais adequada e assim foram construídos pela empresa GEC [3], mostrada na Figura 1.18.



**Figura 1.18** – *Estrutura magnética em monobloco.*

Assim, levantou-se a hipótese de que na fabricação de um reator saturado para ser utilizado em algumas linhas de transmissão de alta tensão, a sua estrutura magnética deveria ter grandes dimensões o que, traria inconvenientes tais como, dificuldade de manuseio, de transporte e de manutenção. Devido a estes inconvenientes causados pelas grandes dimensões que Vladislavlev, Pool, Tellinen e Yarvik, fizeram um estudo com a utilização de unidades trifásicas independentes e estando presente em cada uma, as travessas e os retornos conforme a Figura 1.19 [3].



**Figura 1.19** - *Unidade trifásica da estrutura magnética.*

Diante das duas opções de estruturas mais adequadas, durante o trabalho de tese de doutorado de Fonte [3], foram construídos protótipos de reatores saturados com estruturas tanto

monobloco quanto independente, com o objetivo de comparar os seus desempenhos em operação.

Assim, no capítulo seguinte, é detalhado o projeto dos protótipos de reatores saturados construídos pelo LDSP, mostrando os esquemas de ligações e suas distribuições no espaço fasorial. Mostra-se também como são originadas as correntes induzidas no material ferromagnético e o equacionamento das perdas por Foucault e de magnetização, além de se estabelecer a propagação de erros nos resultados decorrentes de imprecisão de instrumentos e como eles afetam os resultados.

# Capítulo 2

## 2.1 Dimensionamento dos protótipos

Os protótipos foram dimensionados e construídos, para que os seus desempenhos fossem estudados em diversas situações. No entanto, o objetivo deste trabalho é de observar o comportamento das perdas no núcleo ferromagnético dos protótipos em situações que representem carga leve e carga máxima. Desta forma, os ensaios que nos trazem os dados relacionados às grandezas de interesse foram adquiridos com a variação de corrente de alimentação, proporcionando tais situações.

No intuito de verificar o desempenho dos reatores saturados, Leal [2] iniciou o estudo de forma prática com a construção do primeiro protótipo pelo LDSP. Um protótipo de reator saturado com ligação dos enrolamentos primários em paralelo conforme o modelo da GEC. Fonte [3] deu início ao seu trabalho de doutorado, com a construção de dois novos protótipos, sendo um reator saturado com ligação dos seus enrolamentos primários em série, conforme modelo GEC, e o segundo foi dimensionado como um reator saturado com ligação dos enrolamentos primários em paralelo conforme modelo TTU (Tallin Technical University).

Já ao término do seu trabalho, foi construído o último protótipo pelo LDSP o qual apresenta ligação dos enrolamentos primários em série. Estes são os protótipos que foram submetidos a ensaios para o objetivo deste trabalho e, conforme mostra a seguir, tem-se a explicação do princípio em que se baseou a construção dos mesmos.

Nos projetos dos três primeiros protótipos, foi levado em consideração que, as travessas e retornos deveriam ter secção transversal duas vezes maior do que a dos núcleos. Segundo Fonte [3], a indução magnética experimentada por estas partes não excederia valores suficientes para saturar o material ferromagnético em tais partes.

Esta consideração impõe a independência magnética dos núcleos quando submetidos a valores de corrente que levem os protótipos a regimes de operação na saturação. Significa dizer que, o fluxo magnético criado em cada núcleo, não irá influenciar os fluxos magnéticos



adjacentes. Em outras palavras, em todos os núcleos, seus fluxos magnéticos percorrem o caminho fechado formado pelas travessas e retornos.

No entanto, o último protótipo construído, tem a consideração de que, não haveria a necessidade de se ter as travessas e retornos com secção transversal duas vezes maior que a dos núcleos. Esse protótipo parte-se do princípio de que a mesma secção transversal utilizada nos núcleos, era suficiente para se conseguir a independência magnética entre os núcleos por que a indução magnética experimentada por estas partes não seria suficiente para levar o material à saturação.

As características de cada um dos protótipos são [3]:

Protótipo Série 1 (PS1): reator saturado de nove núcleos com ligação dos enrolamentos primários em série e com os enrolamentos secundários ligados em delta. Área da secção transversal das travessas e retornos duas vezes maior que a dos núcleos e estrutura em monobloco. Modelo GEC.

Protótipo Paralelo 1 (PP1): reator saturado de nove núcleos com ligação dos enrolamentos primários em paralelo e com os enrolamentos secundários ligados em delta. Área de secção transversal das travessas e retornos duas vezes maior que a dos núcleos e estrutura em monobloco. Modelo GEC.

Protótipo Paralelo 2 (PP2): reator saturado de nove núcleos com ligação dos enrolamentos primários nos moldes de um autotransformador. Área da secção transversal das travessas e retornos duas vezes maior que a dos núcleos e três estruturas independentes cada uma com três núcleos. Modelo TTU.

Protótipo Série 2 (PS2): reator saturado de nove núcleos com ligação dos enrolamentos primários em série e com os enrolamentos secundários ligados em delta. Área da secção transversal das travessas e retornos iguais a dos núcleos e estrutura em monobloco. Modelo GEC.

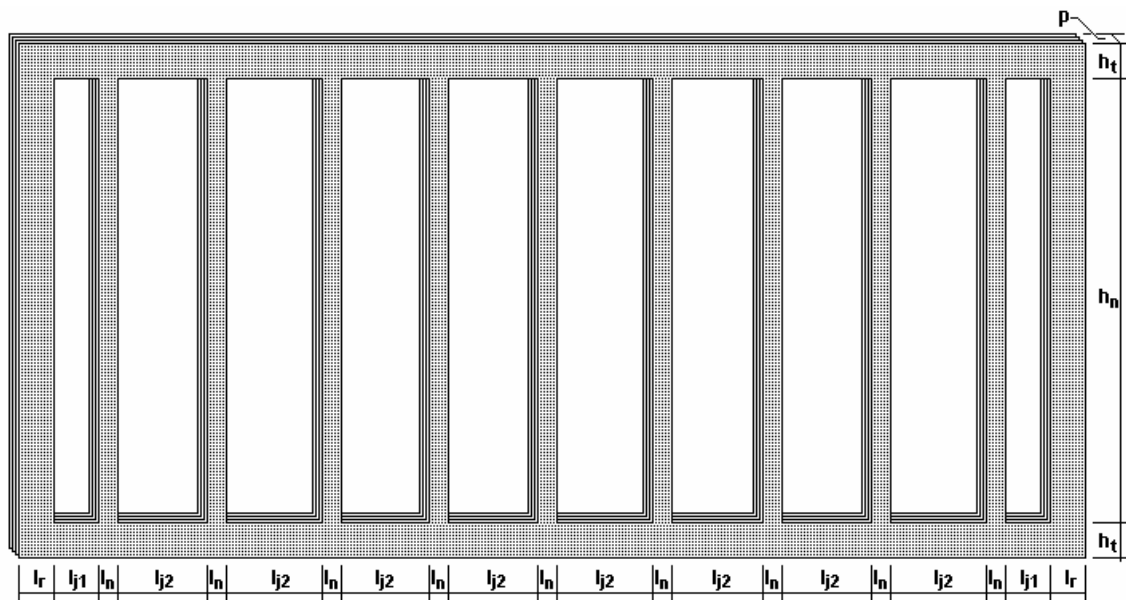
Os protótipos PS1, PP1 e PP2 foram projetados para terem as características operacionais com única especificação entre eles:

- Tensão de início de saturação = 170V;
- Tensão nominal = 228V;
- Potência nominal = 1,25kVA;
- Inclinação da curva característica = 34%.

Entretanto, o protótipo PS2 por ter sido fabricado nos mesmos fundamentos do PS1 e tendo o seu circuito elétrico idêntico, sua intenção foi de estudar o comportamento quando as travessas e retornos fossem de dimensões idênticas aos dos núcleos. Para isso, duas das quatro características operacionais foram modificadas:

- Tensão de início de saturação = 190V;
- Inclinação da curva característica = 20%.

Em todos os protótipos, foi utilizado em seu material ferromagnético, o aço silício de grão não-orientado com o nome comercial de E-170 do fabricante ACESITA com a espessura  $d = 0,5\text{mm}$  e com uma condutividade, conforme mencionado pelo fabricante,  $\sigma = 2,5 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  as Figuras 2.1 e 2.2 mostram as estruturas utilizadas nos protótipos.



**Figura 2.1** - Estrutura magnética presente nos protótipos PS1, PS2 e PPI.

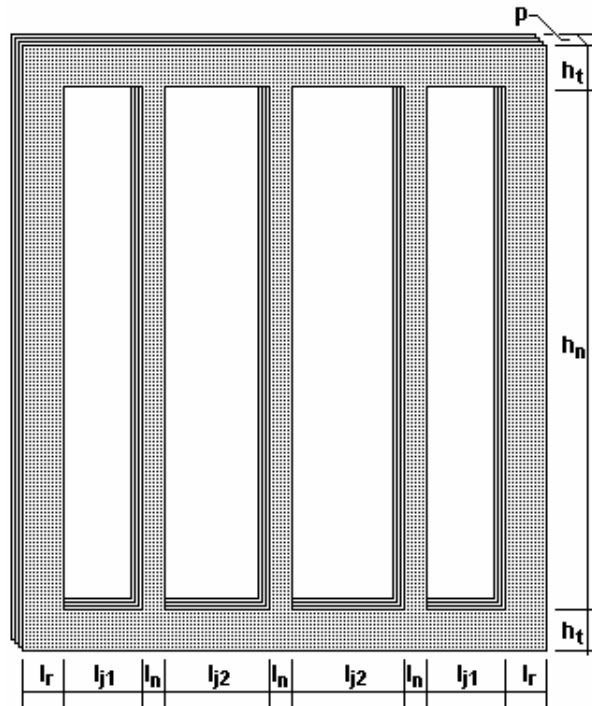


Figura 2.2 - Estrutura magnética presente no protótipo PP2.

As dimensões, referentes às estruturas acima, estão descritas na Tabela 2.1, conforme é mostrado a seguir [3]:

Tabela 2.1 - Dimensões das estruturas magnéticas.

Dimensão	Protótipo			
	PS 1	PS 2	PP 1	PP 2
$l_r(\text{mm})$	20,00	10,00	34,00	25,00
$l_{j1}(\text{mm})$	17,80	17,80	15,60	11,00
$l_{j2}(\text{mm})$	33,80	33,80	29,20	16,00
$l_n(\text{mm})$	10,00	10,00	17,00	17,00
$h_n(\text{mm})$	255,00	255,00	375,00	375,00
$h_t(\text{mm})$	20,00	10,00	34,00	25,00
$p(\text{mm})$	10,00	10,00	17,00	17,00

No que diz respeito aos enrolamentos, a especificação foi feita como mostrada nas Tabelas 2.2 e 2.3 [3]:

Tabela 2.2 - Número de espiras e secção dos condutores de cada enrolamento para os protótipos PS1 e PS2.

Enrolamento		PS1	Secção (mm <sup>2</sup> )	PS2	Secção (mm <sup>2</sup> )
	N0	718	1,65	718	1,65
N1	533	1,65	533	1,65	
N2	284	1,65	284	1,65	
N3	359	0,82	359	0,82	

Estes enrolamentos poderão ser visualizados nas Figuras 2.3 e 2.9, respectivamente, para os protótipos PS1 e PS2.

Tabela 2.3 - Número de espiras e secção dos condutores de cada enrolamento para os protótipos PP1 e PP2.

Enrolamento		PP1	Secção (mm <sup>2</sup> )	PP2	Secção (mm <sup>2</sup> )
	N0	953	0,65	953	0,65
N1	707	0,65	331	0,65	
N2	376	0,65	1130	0,32	
N3	477	1,31	629	0,82	

Estes enrolamentos poderão ser visualizados nas Figuras 2.5 e 2.7, respectivamente, para os protótipos PP1 e PP2.

As Figuras 2.3 a 2.9 mostram as ligações feitas em cada protótipo para fins de ensaios.

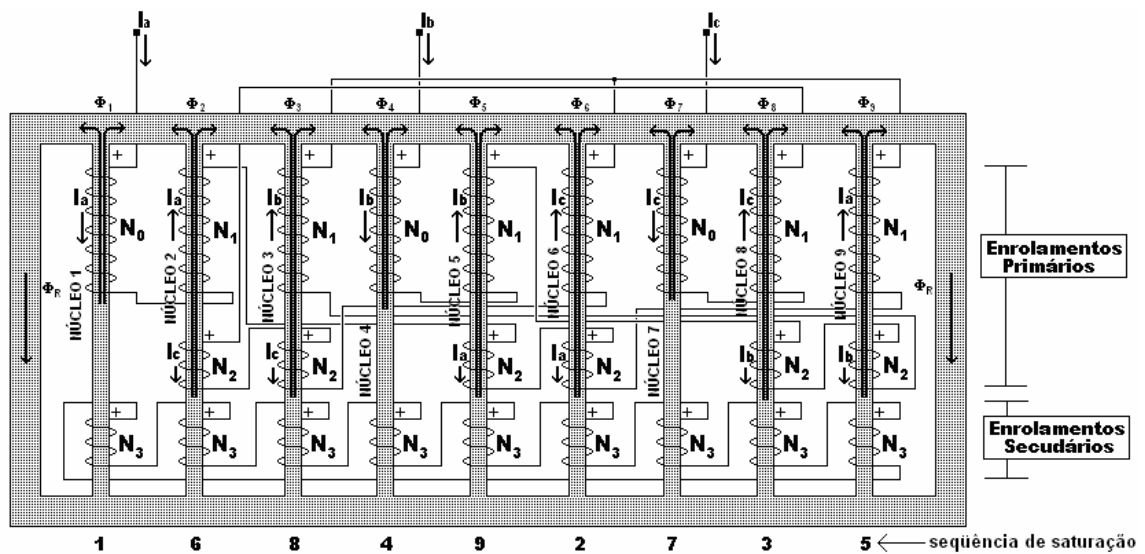


Figura 2.3 - Diagrama do Protótipo PS1.

Neste diagrama, todos os enrolamentos primários conectados em uma mesma fase, experimentarão a mesma intensidade de corrente, já que estão conectados em série e os ramos de cada fase são conectados para dar origem a uma ligação estrela não aterrada.

O sentido da corrente que circula em cada enrolamento é mostrado na Figura 2.3 assim como o sentido do fluxo magnético resultante criado em cada núcleo. A Figura 2.3 também mostra a ordem seqüencial de saturação dos núcleos. Assim, vai existir uma defasagem entre os picos positivos ou os picos negativos de  $2\pi/9$  entre eles.

As expressões em 2.1 mostram como são as  $\Im mm$ 's criadas por cada núcleo.

$$\begin{aligned}
 \Im mm_1 &= N_0 I_a \\
 \Im mm_2 &= N_2 I_c - N_1 I_a \\
 \Im mm_3 &= N_2 I_c - N_1 I_b \\
 \Im mm_4 &= N_0 I_b \\
 \Im mm_5 &= N_2 I_a - N_1 I_b \quad (2.1) \\
 \Im mm_6 &= N_2 I_a - N_1 I_c \\
 \Im mm_7 &= N_0 I_c \\
 \Im mm_8 &= N_2 I_b - N_1 I_c \\
 \Im mm_9 &= N_2 I_b - N_1 I_a
 \end{aligned}$$

Seguindo a seqüência de saturação mostrada na Figura 2.3, as  $\Im mm$ 's criadas nos núcleos terão a distribuição no espaço fasorial segundo Figura 2.4.

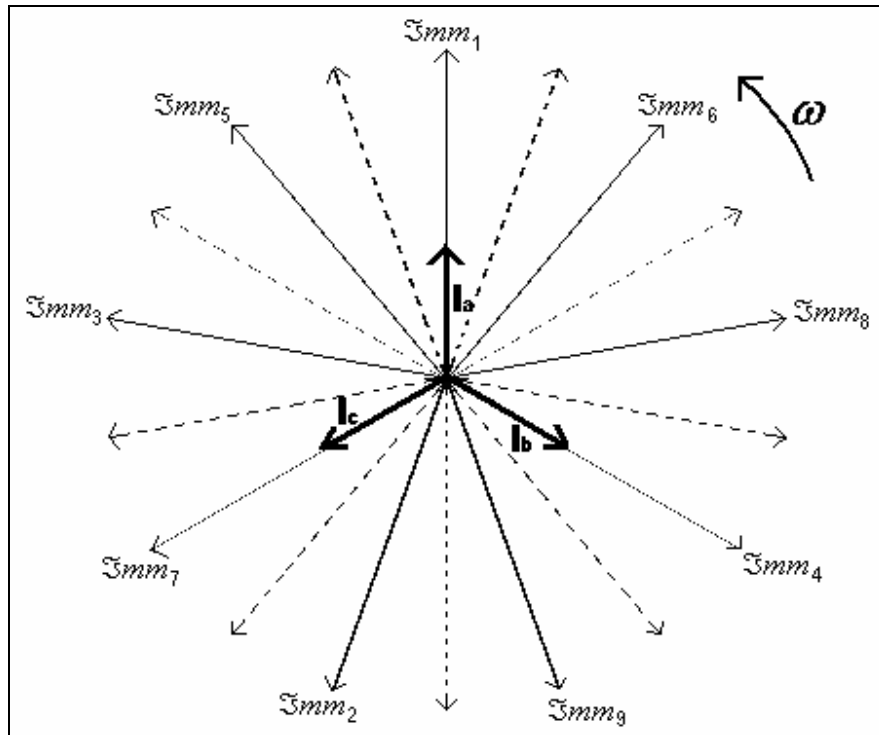


Figura 2.4 - Seqüência das  $\Psi_{mm}$ 's criada para o protótipo PSI.

Na Figura 2.5 pode ser observado o diagrama do esquema de ligação em que se ensaiou o protótipo PP1. Neste tipo de ligação, os núcleos são divididos de forma que se comportem como três unidades distintas onde a primeira é composta pelos núcleos 1, 2 e 3, a segunda pelos núcleos 4, 5 e 6 e a terceira pelos núcleos 7, 8 e 9 e, em cada unidade, os ramos referentes às fases de suprimento, são conectados em ligação estrela não aterrada.

Novamente, é mostrada a seqüência de saturação dos núcleos. Neste arranjo, a corrente em cada fase, deverá ser dividida em unidades iguais, sendo cada uma para uma respectiva unidade. Da mesma forma, é mostrado o sentido das correntes que circulam por cada um dos enrolamentos e também os sentidos dos fluxos magnéticos resultantes nos núcleos.

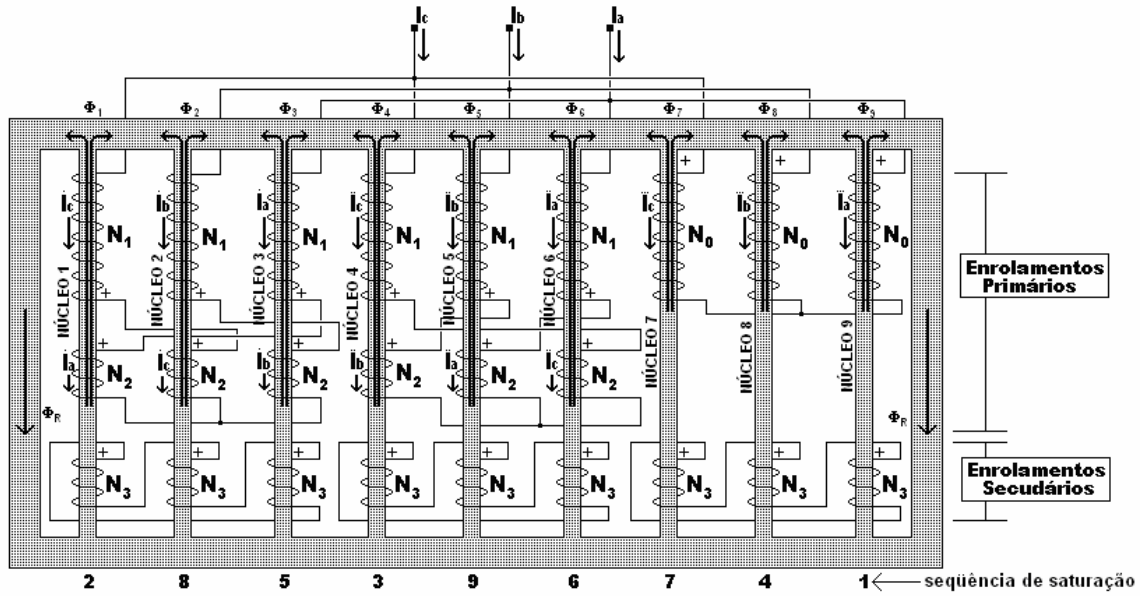


Figura 2.5 - Diagrama da ligação no protótipo PPI.

As expressões das  $\Im mm$ 's produzidas nos núcleos são mostradas em 2.2.

$$\begin{aligned} \Im mm_1 &= N_2 I_a - N_1 I_c \\ \Im mm_2 &= N_2 I_c - N_1 I_b \\ \Im mm_3 &= N_2 I_b - N_1 I_a \\ \Im mm_4 &= N_2 I_b - N_1 I_c \\ \Im mm_5 &= N_2 I_a - N_1 I_b \quad (2.2) \\ \Im mm_6 &= N_2 I_c - N_1 I_a \\ \Im mm_7 &= N_0 I_c \\ \Im mm_8 &= N_0 I_b \\ \Im mm_9 &= N_0 I_a \end{aligned}$$

Estas  $\Im mm$ 's respeitam o espaço fasorial mostrado na Figura 2.6 onde a diferença, em relação ao espaço fasorial do protótipo PS1 é simplesmente, a mudança dos núcleos em relação à estrutura. O núcleo que possui a  $\Im mm = N_2 I_a - N_1 I_c$  continua saturando no mesmo

intervalo, acontecendo apenas a sua mudança física, que no protótipo PS1 estava no núcleo 6 e no PP1 está no núcleo 1.

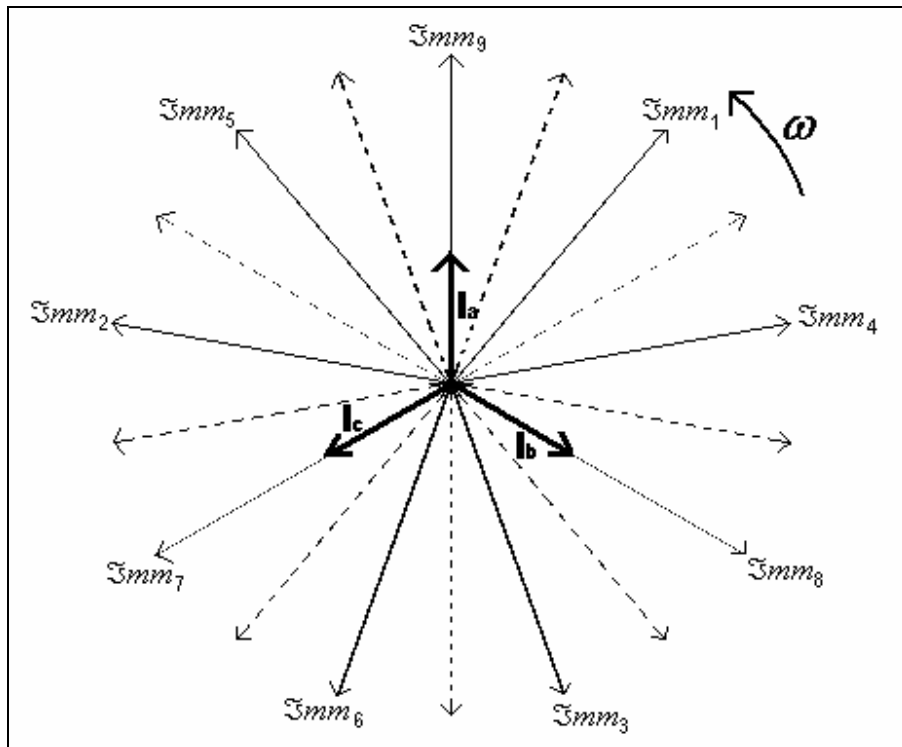


Figura 2.6 - Seqüência das  $\Psi_{mm}$ 's criada para o protótipo PP1.

Outra configuração que foi foco de estudo na linha de pesquisa seguida pelo LDSP em reatores saturados, é o protótipo PP2 que é mostrado na Figura 2.7, onde esta teve o objetivo de reproduzir as ligações similares às de um autotransformador. Foi um modelo de pesquisa da TTU que, tinha a preocupação com as dimensões dos equipamentos.

Portanto, possui 3 unidades independentes de estrutura magnética onde uma delas possui ligação dos ramos de forma estrela não aterrada. As duas seguintes são conectadas da mesma forma que um autotransformador.

Neste modelo, a seqüência de  $\Psi_{mm}$ 's no espaço fasorial difere dos outros modelos estudados. Esta seqüência referente a este protótipo é mostrada na Figura 2.7.



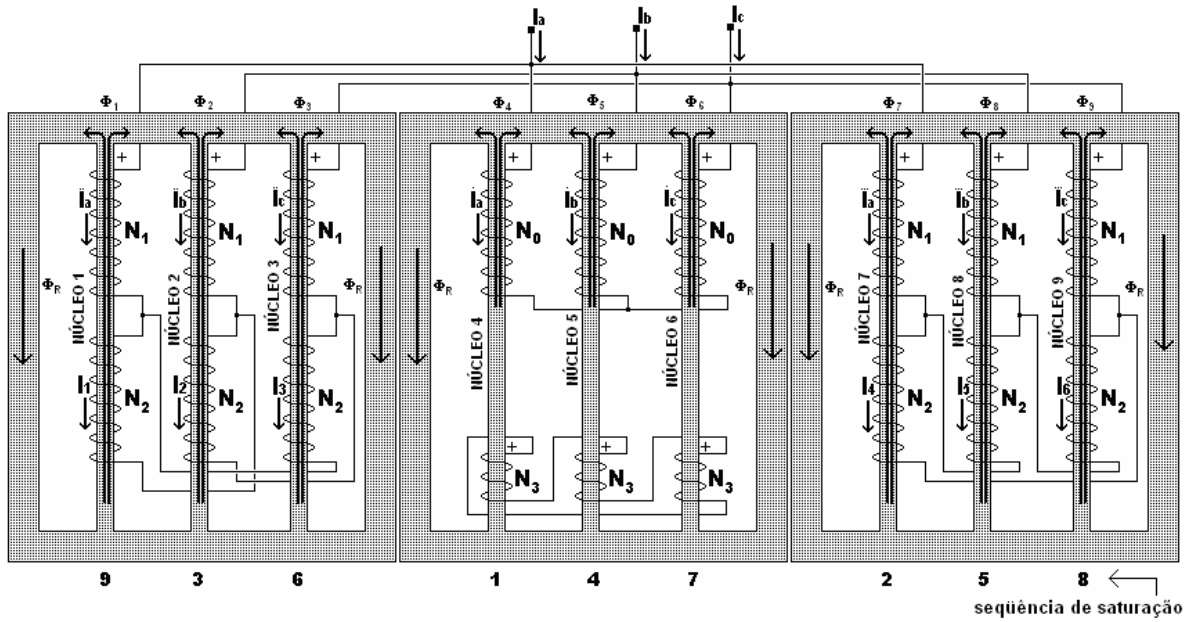


Figura 2.7 - Diagrama da ligação no protótipo PP2.

Devido a este protótipo possuir duas das três unidades com ligações sob molde de um autotransformador, a corrente circulante nos enrolamentos N<sub>2</sub> não são apenas as correntes que circulam nos enrolamentos N<sub>1</sub>. Isto acontece por que eles estão ligados de forma tal que reproduzem uma ligação em delta e esta corrente, considerando o sistema equilibrado, deverá ser igual a  $I_1 = I_a / \sqrt{3}$  com uma defasagem de 30°.

Tendo ciência desta informação, as  $\Im mm$ 's terão suas expressões na forma mostrada em 2.3.

$$\Im mm_1 = N_1 I_a + N_2 I_1$$

$$\Im mm_2 = N_1 I_b + N_2 I_2$$

$$\Im mm_3 = N_1 I_c + N_2 I_3$$

$$\Im mm_4 = N_0 I_a$$

$$\Im mm_5 = N_0 I_b \quad (2.3)$$

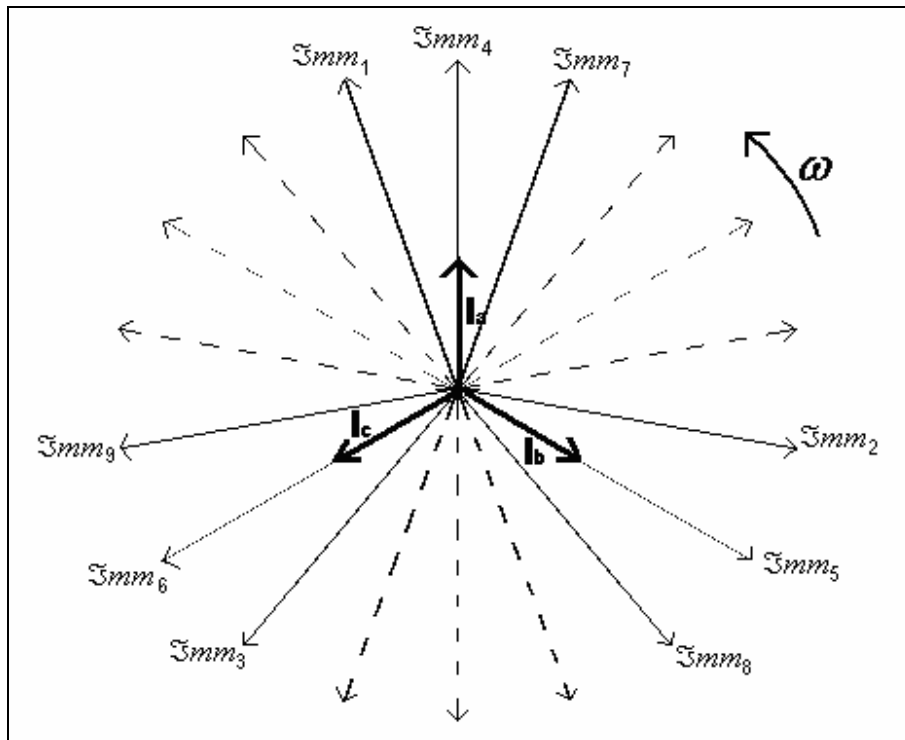
$$\Im mm_6 = N_0 I_c$$

$$\Im mm_7 = N_1 I_a + N_2 I_4$$

$$\mathfrak{I}mm_8 = N_1 I_b + N_2 I_5$$

$$\mathfrak{I}mm_9 = N_1 I_c + N_2 I_6$$

E a sua distribuição das  $\mathfrak{I}mm$ 's nos espaço fasorial, será de acordo com a Figura 2.8.



**Figura 2.8** - Sequência das  $\mathfrak{I}mm$ 's criadas pelos núcleos para o protótipo PP2.

Por último, o protótipo PS2 foi submetido a testes. O diagrama que contém o esquema de ligação imposto para tal finalidade é mostrado na Figura 2.9. Este esquema parte do mesmo princípio do PS1 sob o ponto de vista de ligação.

O modelo é o mesmo do PS1, onde os enrolamentos são arranjados de forma a criarem uma única unidade trifásica, sendo esta submetida à mesma intensidade da corrente alimentada pela fonte.

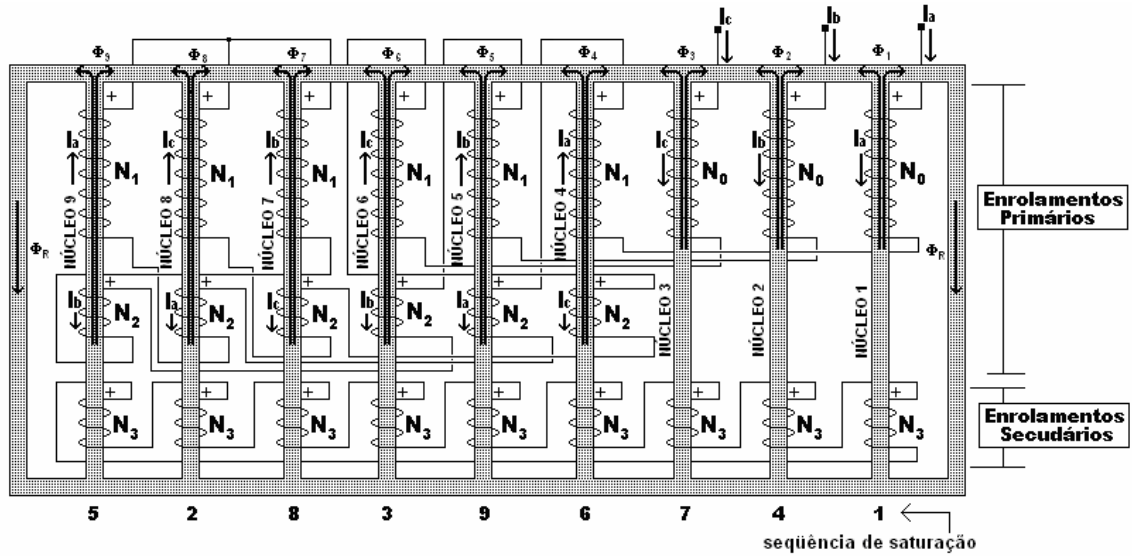


Figura 2.9 - Diagrama de ligação imposta ao protótipo PS2.

Este protótipo tem o mesmo princípio de funcionamento dos reatores saturados quando os enrolamentos primários são ligados em série, o que permite que, ao se estudar suas grandezas, sejam feitas comparações entre este protótipo e o protótipo PS1, além de terem seus dimensionamentos idênticos, diferindo apenas nas secções transversais as travessas e retornos.

Neste protótipo, também foi feita a permutação da ordem de saturação, o que mudará a ordem seqüencial da distribuição das  $\Im mm$ 's no seu espaço fasorial, modificando as expressões para cada um dos seus núcleos, conforme é mostrado em 2.4, quando comparado com os demais protótipos.

$$\begin{aligned} \Im mm_1 &= N_0 I_a \\ \Im mm_2 &= N_0 I_b \\ \Im mm_3 &= N_0 I_c \\ \Im mm_4 &= N_2 I_c - N_1 I_a \\ \Im mm_5 &= N_2 I_a - N_1 I_b \quad (2.4) \end{aligned}$$

$$\Im m_6 = N_2 I_b - N_1 I_c$$

$$\Im m_7 = N_2 I_c - N_1 I_b$$

$$\Im m_8 = N_2 I_a - N_1 I_c$$

$$\Im m_9 = N_2 I_b - N_1 I_a$$

A Figura 2.10 mostra a distribuição das  $\Im m$ 's no espaço fasorial, quando a forma de ligação mostrada na Figura 2.9 é submetida ao regime de operação.

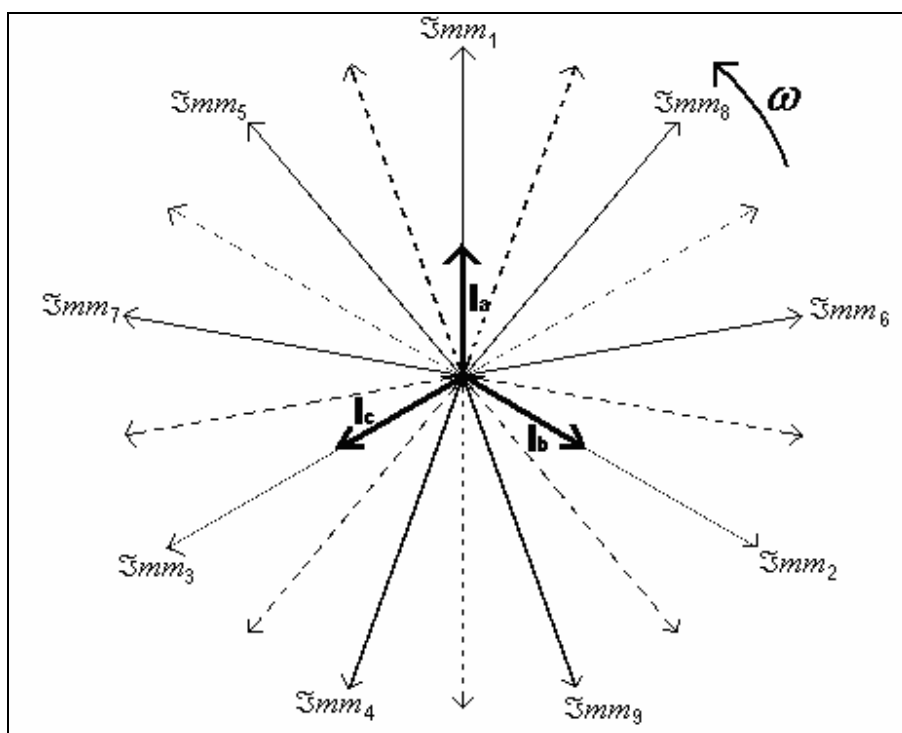


Figura 2.10 - Seqüência das  $\Im m$ 's criadas pelos núcleos para o protótipo PS2.

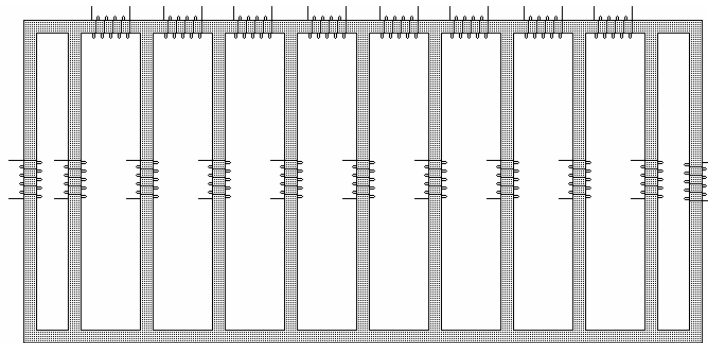
## 2.2 Metodologia de ensaio

Para que se alcance o objetivo desta pesquisa, os protótipos foram previamente arranjados de tal forma que permitissem o monitoramento de algumas grandezas.

Para isso, durante a sua fabricação, foram colocadas bobinas de prova. Um fluxo magnético circula em cada parte magnética existente nos protótipos, o qual fará com que seja induzida uma tensão nessas pequenas bobinas de prova que possuem 30 espiras cada.

Com o auxílio de circuitos integradores, são proporcionadas leituras de fluxo magnético e da indução magnética em cada parte da estrutura.

A Figura 2.11 mostra a disposição das bobinas na estrutura magnética.



**Figura 2.11** - Bobinas de prova instaladas na estrutura magnética.

## 2.3 Bancada de ensaios

Para a captação de dados das grandezas de interesse, uma bancada foi montada adequadamente para que pudesse proporcionar leituras com precisão satisfatória. Nela constavam os seguintes equipamentos:

- 1 variador de tensão trifásico, fabricado pela STP, 220/(0 a 240V) de 4,5kVA;
- 1 transformador trifásico, YY, 380/220V, fabricado pela Sotrafo, de 5kVA;
- 1 registrador de grandezas MARH-21, modelo 993, fabricado pela RMS Eletrônicos;
- 1 osciloscópio digital de quatro canais, fabricado pela Tektronix, modelo TPS2024 200MHz 2GS/s;
- 3 multímetros digitais, modelo ET-232, fabricados pela Minipa;
- 2 alicates amperímetros, fabricados pela Tektronix, modelo A622, 10mV/A:100mV/A, de 0 a 70Arms e 100A de pico;
- 2 pontas de prova, fabricadas pela Tektronix, modelo P2220, de 1M $\Omega$ /95pF;
- 1 microcomputador para colher os dados armazenados tanto no registrador como no osciloscópio;

1 placa com quatro circuitos integradores;

1 fonte cc com saída de +15V e -15V para a alimentação dos circuitos integradores.

A bancada é representada na Figura 2.12.

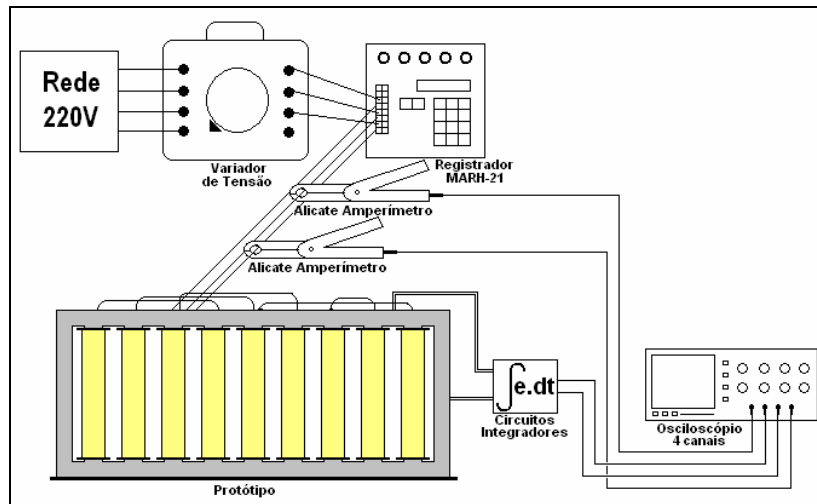


Figura 2.12 - Bancada utilizada para medição de fluxo magnético e corrente de excitação.

## 2.4 Cálculo de resistências dos enrolamentos

### 2.4.1 Método do voltímetro e amperímetro

Este método deve ser aplicado somente se a corrente nominal no enrolamento a ser analisado não for menor que 1A, podendo ser utilizados os voltímetros e amperímetros digitais de boa precisão. Para as leituras de grandezas nos enrolamentos do reator saturado, foram utilizados os multímetros do fabricante Minipa modelo ET-2615 com exatidão de 0,06% para tensão DC, 0,2% para corrente CC e 0,3% para a temperatura [5].

### 2.4.2 O circuito de medidas

As leituras das grandezas de interesse são realizadas com a montagem adequada de acordo com a norma. É colocado em série, o multímetro com a função de amperímetro e, exatamente nos terminais do enrolamento a ser medido, coloca-se outro multímetro com a função de voltímetro.

É introduzida uma resistência em série no valor de  $68,5\Omega$ , a qual propiciou a redução da corrente para valores que não excederam 15% do valor de corrente nominal do enrolamento [5].

O circuito é alimentado com uma fonte de corrente contínua com saída de 15V. Além disso, é necessário obter a leitura da temperatura em que os enrolamentos se encontram. Com este objetivo, fez-se uso de outro multímetro com a função temperatura e com o auxílio de um termopar para registro das temperaturas.

O circuito na Figura 2.13 ilustra o circuito real montado no laboratório.

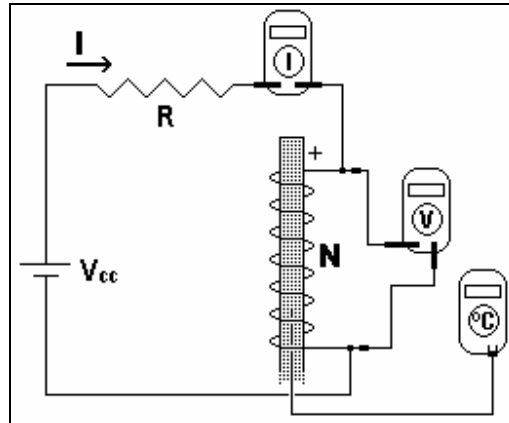


Figura 2.13 - Montagem para medição de resistência por enrolamento.

Houve o cuidado de não inverter as polaridades de magnetização do núcleo durante todas as leituras, caso contrário, introduziria erros nas leituras.

Outro aspecto extremamente importante é no que diz respeito ao intervalo de leituras. Aguardou-se um intervalo de tempo suficiente para que os equipamentos de leituras mostrassem valores estáveis. No presente caso, o intervalo para leituras estáveis foi de 6 minutos.

As leituras foram simultâneas e um conjunto de 5 leituras foi suficiente para cálculo da média das resistências de interesse.

A Tabela 2.4 mostra as medições realizadas para o enrolamento  $N_0$  do PS1 para ilustração de como foi obtido o valor médio de resistência em cada um deles. O mesmo procedimento foi utilizado nos demais enrolamentos de todos os protótipos.

**Tabela 2.4** - Valores registrados para a obtenção da resistência média no enrolamento  $N_0$  do protótipo PSI.

N <sub>0</sub>				
I <sub>cc</sub> (mA)	V <sub>cc</sub> (mV)	R(Ω)	T(°C)	R <sub>25°C</sub> (Ω)
242,46	176,63	0,7285	21	0,7413
242,46	176,63	0,7285	21	0,7413
241,41	176,55	0,7313	21	0,7442
242,36	176,50	0,7283	20	0,7426
242,34	176,45	0,7281	20	0,7424
<b>R<sub>Nom</sub> média(Ω)</b>				<b>0,7424</b>

A variação da resistência com a temperatura é praticamente linear e podendo ser estabelecida para qualquer outra temperatura pela Equação 2.5:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (2.5)$$

Onde  $R_1$  e  $R_2$  são, respectivamente, as resistências do condutor nas temperaturas  $t_1$  e  $t_2$  em graus Celsius, e  $T$  é uma constante que, para o cobre recozido é igual a 234,5.

O efeito pelicular em frequência de até 60Hz é desprezível para condutores de menor secção. Neste caso, para frequências de 60Hz, a secção mínima para que venha sofrer esse efeito é de 33,7285mm<sup>2</sup> e a maior secção transversal utilizada nos enrolamentos dos protótipos foi de 1,6500mm<sup>2</sup> cerca de 20 vezes menor, o que faz garantir que o efeito pelicular seja desprezível [6],[7].

As Tabelas 2.5 a 2.8, mostram os valores registrados em cada uma das leituras, bem como o valor médio da resistência em cada enrolamento primário para todos os protótipos.

**Tabela 2.5** - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PSI na temperatura de 25°C.

N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>
0,7413	0,5125	0,3549
0,7413	0,5125	0,3549
0,7442	0,5124	0,3548
0,7426	0,5124	0,3548
0,7424	0,5124	0,3548
<b>R<sub>Nom</sub>(Ω)</b>	<b>R<sub>N1m</sub>(Ω)</b>	<b>R<sub>N2m</sub>(Ω)</b>
0,7424	0,5125	0,3548



**Tabela 2.6** - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PS2 na temperatura de 25°C.

<b>N0</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>
0,7388	0,5163	0,3649
0,7385	0,5166	0,3649
0,7381	0,5165	0,3648
0,7377	0,5165	0,3647
0,7377	0,5164	0,3647
<b>RN<sub>0m</sub>(Ω)</b>	<b>RN<sub>1m</sub>(Ω)</b>	<b>RN<sub>2m</sub>(Ω)</b>
0,7383	0,5164	0,3648

**Tabela 2.7** - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PP1 na temperatura de 25°C.

<b>N0</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>
2,8547	2,0620	1,2133
2,8549	2,0620	1,2133
2,8550	2,0619	1,2132
2,8547	2,0618	1,2132
2,8550	2,0618	1,2132
<b>RN<sub>0m</sub>(Ω)</b>	<b>RN<sub>1m</sub>(Ω)</b>	<b>RN<sub>2m</sub>(Ω)</b>
2,8548	2,0619	1,2132

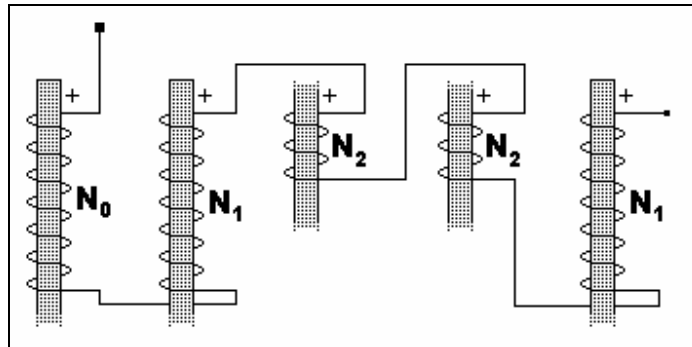
**Tabela 2.8** - Valores de resistência dos enrolamentos primários para o PP2 na temperatura de 25°C.

<b>N0</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>
2,8508	0,9376	5,6217
2,8505	0,9375	5,6219
2,8509	0,9376	5,6221
2,8507	0,9376	5,6130
2,8507	0,9375	5,6223
<b>RN<sub>0m</sub>(Ω)</b>	<b>RN<sub>1m</sub>(Ω)</b>	<b>RN<sub>2m</sub>(Ω)</b>
2,8507	0,9376	5,6202

Com essas informações, fica fácil de obter a resistência por fase. No caso dos protótipos com os enrolamentos primários ligados em série, basta somar todos os enrolamentos conectados

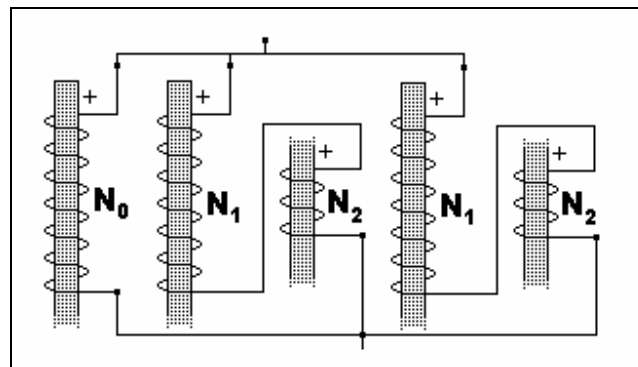
*Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural*

em cada fase e, como pode ser visto através da Figura 2.14, cada fase é constituída de 5 enrolamentos sendo 1  $N_0$ , 2  $N_1$  e 2  $N_2$ .



**Figura 2.14** - Circuito por Fase para os protótipos PSI e PS2.

Para o caso dos protótipos que utilizam os enrolamentos primários ligados em paralelo, o mesmo princípio é utilizado sendo que obviamente, a resistência equivalente é o resultado de um paralelismo de uma mesma fase. Assim, o circuito do protótipo PP1 por fase é representado na Figura 2.15.

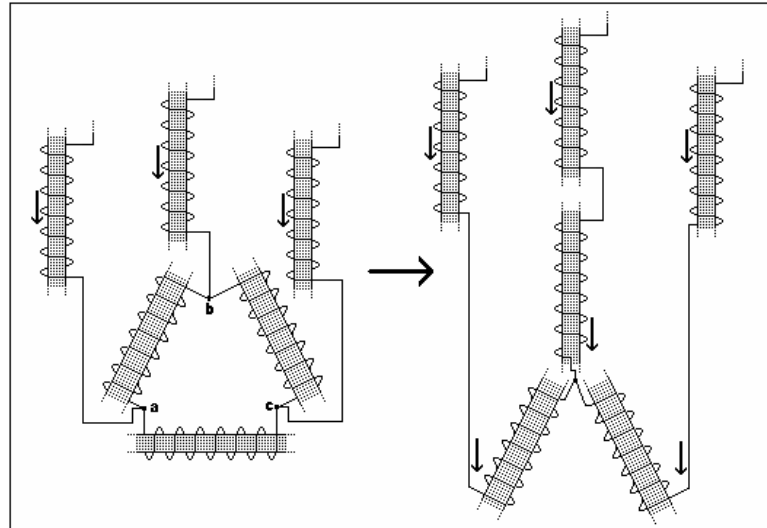


**Figura 2.15** - Circuito por Fase do protótipo PP1.

Já no protótipo PP2 deve-se levar em consideração que, sua ligação é feita de modo similar a um autotransformador.

Assim, para as unidades que possuem dois enrolamentos primários, é preciso a conversão da ligação triângulo dos enrolamentos  $N_2$ , em ligação estrela para fins de obtenção da resistência por fase.

A Figura 2.16 retrata a forma como é obtida a resistência equivalente por fase nas estruturas que possuem dois enrolamentos.



**Figura 2.16** - Circuito por Fase do protótipo PP2.

Como todos os enrolamentos  $N_2$  que fazem parte da ligação triângulo são idênticos, a sua resistência equivalente para uma ligação estrela será obtida pela Equação 2.6 [6]:

$$R_y = \frac{R_\Delta}{3} \quad (2.6)$$

A Tabela 2.9 mostra os resultados obtidos por fase para cada um dos protótipos para uma temperatura de trabalho de 25°C. Encontra-se também nela, o erro absoluto referente à imprecisão dos multímetros utilizados o que terá papel importante para a determinação das perdas no material ferromagnético ensaiado.

**Tabela 2.9** - Resistência por fase em cada um dos protótipos na temperatura de 25°C

Protótipo	Rfase( $\Omega$ )	$\Delta$ Rfase( $\Omega$ )
PS1	2,48	0,01
PS2	2,50	0,01
PP1	1,04	0,02
PP2	1,52	0,03

## 2.5 Procedimento de medição das grandezas

As curvas características “tensão versus corrente” foram levantadas através do registrador MARH-21, programado para fazer aquisições dos valores rms das correntes, tensões e potência ativa.

Foram utilizados métodos diferentes para tais registros devido ao acesso a um ponto de referência que fosse comum para todas as fases. No caso do reator saturado com ligação em série este ponto é perfeitamente acessível enquanto que, no reator saturado com ligações em paralelo, o mesmo não acontece devido à existência de unidades trifásicas independentes.

Os valores das correntes são registrados diretamente no registrador através dos seus TC's internos para os dois tipos de ligação e, para a aquisição dos valores de tensão, nos reatores saturados com ligação em série foram utilizadas as garras de tensão, cada uma em sua devida fase e com a garra N conectada ao neutro acessível da ligação estrela não aterrada dos enrolamentos primários.

Já no caso do reator saturado com ligação em paralelo, utilizou-se a forma de registro trifásica sem o neutro acessível, já que neste caso têm-se três pontos de neutro flutuante não sendo possível um ponto de referência único. Assim, uma fase deve ser uma referência sendo a fase B escolhida para tal objetivo. A rotina de aquisição dos valores das grandezas tinha um intervalo de 1 segundo para uma nova aquisição.

O ensaio teve início com valores de tensões nulos e vagarosamente aumentaram-se estes valores através do variador de tensão existente no laboratório até um valor próximo de duas vezes a corrente nominal dos protótipos, valor este, próximo a 6,5A. Com o auxílio de um multímetro utilizado como um termômetro acompanhou-se a variação da temperatura dos enrolamentos durante as leituras e registrados os seus valores nos pontos de interesse.

A segunda etapa foi concluída com a aquisição das grandezas em cada um dos quatro protótipos ensaiados.

Foi necessário um tratamento a estas grandezas registradas devido às condições de ensaios oferecidas. Observou-se um pequeno desequilíbrio nas tensões no barramento utilizado para alimentar o variador de tensão.

Este desequilíbrio era refletido nas tensões sobre os terminais dos reatores saturados, ocasionando um desequilíbrio nas correntes de alimentação, principalmente na região de

saturação, onde uma pequena variação de tensão causa uma grande variação na corrente, ocasionando assim, uma desigualdade entre os valores registrados.

A solução para o problema foi considerar a média aritmética entre as fases para as grandezas para então, ter valores de referência.

Para o objetivo deste trabalho, as grandezas de extrema importância são as grandezas que estão presentes no material ferromagnético que, através dos seus valores, possa se chegar a uma estimativa com precisão razoável das perdas magnéticas nesta parte no equipamento. São grandezas difíceis de serem mensuradas.

Uma forma encontrada foi a de incluir, durante a fabricação dos protótipos, pequenos enrolamentos de cobre de diâmetro muito pequeno e com um valor definido de espiras que, no caso, foram 30, conforme foi mostrado na Figura 2.11. Estes enrolamentos foram chamados de bobinas de prova.

Durante um ensaio, as correntes de alimentação criarão um fluxo magnético que, diretamente sobre os enrolamentos primários onde circulam estas correntes. É bastante complexa a sua obtenção deste fluxo, pois além da tensão induzida nestes enrolamentos ter valores relativamente altos para uma possível integração, para a determinação do fluxo magnético criado e se fosse possível levaria junto, uma parcela referente ao fluxo magnético disperso nestes enrolamentos, segundo mostrado na Figura 2.17 o que não contribui para perdas nas estruturas ferromagnéticas.

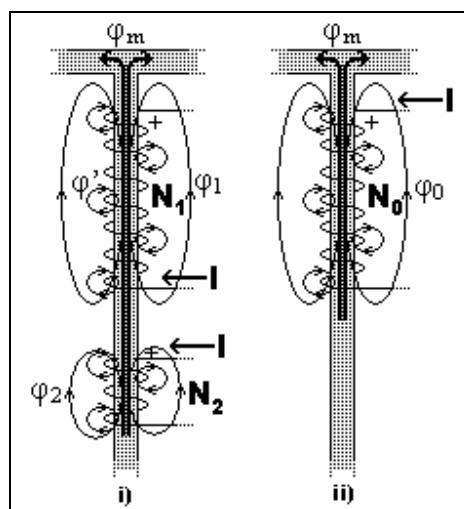


Figura 2.17 - Linhas de fluxo presentes nos núcleos.

Desta forma, a Figura 2.17 mostra as linhas de fluxo magnético criadas pela corrente de alimentação dos protótipos. Conforme pode ser visto, existem fluxos magnéticos próprios dos enrolamentos, designados por  $\phi_0$ ,  $\phi_1$  e  $\phi_2$  para os respectivos enrolamentos  $N_0$ ,  $N_1$  e  $N_2$ .

Além deste fluxo magnético próprio, uma parcela das linhas de fluxo magnético engloba um número de espiras inferior a  $N$ . Para o caso do núcleo com dois enrolamentos,  $\phi_m$  é o fluxo magnético enlaçado por todas as espiras juntas, ou seja,  $N_1$  e  $N_2$  juntas.

Já no caso dos núcleos com apenas um enrolamento presente, o  $\phi_m$  é o próprio  $\phi_0$ . Assim, as bobinas de prova conseguem induzir uma tensão em seus terminais apenas com o fluxo magnético que é percorrido em cada parte onde estão instaladas, com ótima precisão, pois não irá fluir corrente nesta bobina de prova e conseqüentemente, não haverá fluxo magnético disperso de acordo com Equação 2.7.

Com o auxílio de circuitos eletrônicos integradores munidos de amplificadores operacionais, foram possíveis obter as formas de onda de fluxo magnético existente em cada uma das partes da estrutura ferromagnética.

$$\phi = \frac{1}{N} \int e dt \quad (2.7)$$

Onde  $N$  é o número de espiras nas bobinas de prova.

Como não foi possível a aquisição simultânea em cada um dos pontos desejados, os registros foram divididos em conjuntos e para cada um deles, foram adquiridos dez registros de formas de onda destes fluxos magnéticos.

Além dos registros dos fluxos magnéticos, houve a necessidade de se registrar a forma de onda das correntes de alimentação que os originaram, pois, o campo magnético criado na estrutura, é o reflexo desta corrente.

Foram definidos os dez pontos de registro conforme é mostrado na Tabela 2.10. Estes pontos foram escolhidos no intuito de estudar o progresso das perdas magnéticas desde um valor de corrente abaixo do nominal do protótipo, até valores acima do nominal.

**Tabela 2.10** - Pontos definidos para aquisição de dados e os valores rms da corrente.

Leitura	Corrente (A)
L1	0,50
L2	1,00
L3	1,50
L4	2,00
L5	2,40
L6	2,60
L7	3,00
L8	3,50
L9	4,00
L10	4,50

Pela alta sensibilidade de variação de corrente que os reatores saturados apresentam e pelo variador de tensão ser manual, estes valores não foram obtidos com boa precisão. Os valores de corrente escolhidos para as leituras estão divulgados nos capítulos seguintes sendo valores diferentes para cada um dos protótipos.

Este procedimento de registro das grandezas magnéticas foi realizado com o auxílio do osciloscópio, com as duas ponteiros para a captação das formas de onda do fluxo magnético nos terminais das saídas dos circuitos integradores e as duas pontas de corrente para a captação das formas de onda das correntes. As formas de onda foram armazenadas em arquivos de saída, de extensão .xls com todos os valores instantâneos das grandezas a uma taxa de amostragem de  $10^5$  amostras por segundo.

No caso dos protótipos com ligação em série, em que a mesma corrente percorre cinco enrolamentos em diferentes núcleos por fase, e as aquisições das formas de onda da mesma corrente se encontrava em conjuntos diferentes, como no caso do levantamento das curvas características  $V \times I$ , utilizou-se uma média aritmética entre as correntes. Portanto, com a realização de todas essas leituras, chegou-se ao término da parte experimental.

## 2.6 Perdas por Foucault

Sempre que um fluxo magnético varia no tempo em um meio, terá como consequência o surgimento de um campo elétrico no meio. A integral curvilínea deste campo E ao longo de

um caminho fechado que limite a superfície que é atravessada pelo fluxo magnético, pela lei de Faraday, tem-se:

$$\oint_{abcd} E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int B \cdot n \cdot ds \quad (2.8)$$

onde  $abcd$  é o caminho fechado que limita a superfície que se submete à variação do fluxo magnético  $\varphi = \int B \cdot n \cdot ds$  [4].

Quando o meio é um condutor, este caminho é percorrido por uma corrente gerada pela força eletromotriz induzida. Essas correntes são chamadas de correntes de Foucault e sua presença em um determinado material tem o significado de que parte da energia criada pelo campo é dissipada em forma de calor para o meio externo [8],[9].

A indução magnética normalmente é elevada em materiais ferromagnéticos e com resistividade relativamente baixa, o que acarreta em perdas significativas se não forem devidamente tratadas [9].

Para o desenvolvimento da modelagem das perdas por corrente de Foucault, inicialmente considera-se uma lâmina do material ferromagnético conforme é mostrado na Figura 2.18.

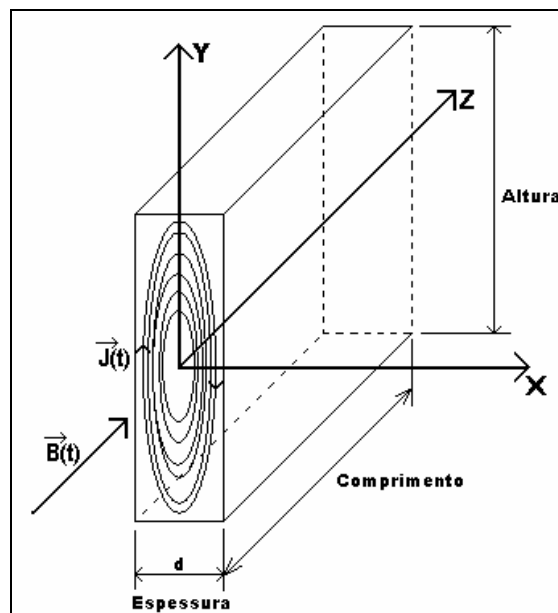


Figura 2.18 - Modelagem em uma lâmina do material.



A lâmina é atravessada por um vetor de indução magnética variável no tempo  $B(t)$  na direção  $z$ . A primeira aproximação na modelagem deste tipo de perda, é que a espessura deverá ser extremamente pequena em relação à altura ( $d \ll y$ ). Desta forma, supõe-se que o vetor densidade de corrente  $J$  só depende da variável na direção  $y$ , devido à sua maior componente estar na direção de  $y$  [4],[7],[9].

Pela Equação 2.9, que representa a lei de Ohm sob forma local, o mesmo acontece com o vetor campo elétrico  $E$ . As equações 2.10 e 2.11 representam, respectivamente, as componentes  $x,y,z$  do campo elétrico e da indução magnética [4],[7],[8],[9].

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

$$\vec{E} = (0, E, 0) \quad (2.10)$$

$$\vec{B} = (0, 0, B) \quad (2.11)$$

Com a Equação de Maxwell na forma vetorial 2.12 ou na forma matricial na Equação 2.13:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\det \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\partial B}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

onde o determinante desta matriz, resulta na Equação 2.14:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.14)$$

assim,

$$E(x) = \frac{\partial B}{\partial t} x + cte \quad (2.15)$$

Da mesma forma que a corrente não é descontínua em um condutor, o campo elétrico também não é, o que leva a crer que não há descontinuidade de corrente no centro da lâmina.

Para isso, quando  $x = 0$ , o campo elétrico deverá ser nulo. Assim, a constante deverá ser nula para garantir a continuidade da corrente [7],[8],[9]:

$$E(x) = \frac{\partial B}{\partial t} x \quad (2.16)$$

Considerando que o material tem uma condutividade  $\sigma$ , a densidade de corrente será dada por:

$$J_x = \sigma E_x \quad (2.17)$$

Substituindo a Equação 2.16 em 2.17 tem-se:

$$J_x = \sigma \frac{\partial B}{\partial t} x \quad (2.18)$$

Para se obter a potência dissipada por efeito Joule, devido a estas correntes induzidas, procede-se da seguinte forma:

$$P_f = J_x^2 \frac{1}{\sigma} = \sigma^2 \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 x^2 \frac{1}{\sigma} \quad (2.19)$$

$$P_f = \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 x^2 \quad (2.20)$$

A potência dissipada no volume total da lâmina é dada por:

$$P_f = \sigma \int_0^z \int_0^y \int_{-d/2}^{d/2} \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 x^2 dx dy dz \quad (2.21)$$

$$P_f = \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 yz \frac{x^3}{3} \Big|_{-d/2}^{d/2} \quad (2.22)$$

$$P_f = \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 yz \frac{d^3}{12} \quad (2.23)$$

O volume da lâmina é dado por:

$$Vol = yzd \quad (2.24)$$

A potência média dissipada por correntes de Foucault por unidade de volume é dada por [7],[9]:

$$\frac{P_f}{Vol} = \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 yz \frac{d^3}{12} \frac{1}{yzd} \quad (2.25)$$

$$P_f = \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 \frac{d^2}{12} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (2.26)$$

Assim, é fácil verificar que a potência dissipada por correntes de Foucault é diretamente proporcional à condutividade  $(\Omega.m)^{-1}$  e ao quadrado da espessura da lâmina do material ferromagnético.

A Equação 2.26 permite aferir a laminação e a presença de impurezas no material a ser estudado. Quanto mais fina a lâmina ou menos condutora, menos potência será dissipada pelo efeito das correntes induzidas.

Para que estas equações tenham validade, é necessário considerar que a condutividade seja constante para qualquer valor de indução, inclusive na saturação. Outro fator que não é levado em consideração é a presença do efeito pelicular na distribuição destas correntes [7],[8].

Desta forma, é considerada uma distribuição uniforme da indução magnética ao longo da superfície normal ao vetor indução. Com essas considerações, os resultados são simples e com precisão suficiente para a finalidade deste trabalho [7],[8].

O tratamento desta componente das perdas totais no ferro é abordado em separado para os dois tipos de ligação nos enrolamentos primários dos reatores saturados, em virtude das formas de onda da indução magnética ser em diferentes e está relatado em seções dos respectivos capítulos referentes às perdas totais no núcleo ferromagnético para os respectivos tipos de ligação.

## 2.7 O ciclo de histerese

O processo de magnetização do material ferromagnético tem duas etapas. A etapa de alinhamento dos domínios magnéticos e a etapa de movimento destes domínios [7],[13],[14].

A curva de histerese relaciona toda a energia envolvida no processo de magnetização do material ferromagnético. Ela mostra o comportamento da indução magnética quando um campo magnético variável é aplicado, conforme ilustrações contidas na Figura 2.19 [4].

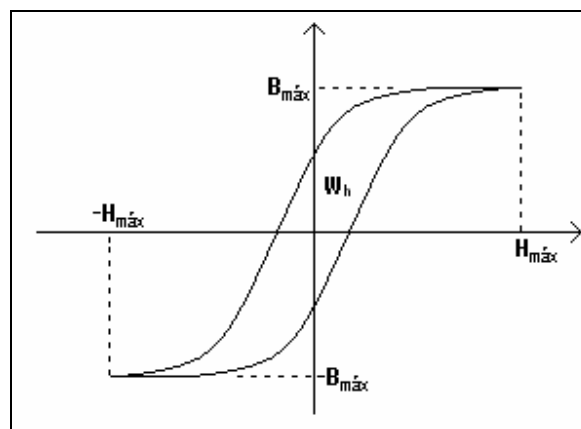


Figura 2.19 - Ciclo de Histerese.

Desta forma, é fácil compreender que, como um campo magnético é o reflexo da corrente que o deu origem, vai existir um ponto de máximo para a indução magnética, pois a saturação será alcançada.

Na região isenta de saturação, há uma grande variação de indução magnética quando o campo magnético aplicado é variado, o que significa dizer que, para tal variação de indução, os domínios magnéticos deverão variar. Em outras palavras, se locomoverão na direção do campo magnético aplicado e, tanto esta locomoção, quanto o alinhamento para a direção do campo magnético requerem energia [7],[13].

Na região de saturação, a indução magnética não mudará com o aumento do campo magnético aplicado, o que significa que não há mais deslocamento dos domínios e somente alinhamento dos domínios. A energia gasta com este alinhamento é conservativo, ou seja, é

devolvida para a sua fonte. Já no caso da locomoção dos domínios, a energia gasta para esta etapa é perdida e não sendo devolvida à fonte [7],[13].

É conclusivo que as perdas em um ciclo de histerese se dão pela energia gasta com o deslocamento dos domínios magnéticos. E como este processo tem sua predominância na região de não saturação então, para um valor de indução magnética máximo fixo quanto mais tempo na região de não saturação o material estiver, mais energia será gasta pelo processo de magnetização.

Para os reatores saturados, cada núcleo é uma fonte geradora de campo magnético, de forma que irá existir um caminho equivalente em toda a estrutura ferromagnética para que o campo magnético criado por cada um dos núcleos seja percorrido por um caminho fechado [17].

Os caminhos magnéticos que surgem para a circulação de campos magnéticos por cada um dos núcleos, não são tão triviais assim.

O primeiro ponto a ser questionado, é que, como os núcleos se dispõem ao longo da estrutura planar do núcleo, os campos magnéticos deverão ter caminhos equivalentes diferentes.

O segundo ponto questionável é que a independência magnética dos núcleos só acontece na região de saturação, donde se conclui que poderá existir uma interferência entre os núcleos, sendo extremamente complexa a sua definição.

Partindo do princípio de que cada fonte geradora de campo magnético produzirá a indução magnética existente nos núcleos, independentemente dos caminhos equivalentes, é possível concluir que, para uma mesma indução máxima de saturação, a região de predominância de movimento dos domínios se dá pela quantidade de núcleos existentes na estrutura, ou seja, como o intervalo de não saturação depende inversamente do número de núcleos  $T/n$ . Quanto mais núcleos a estrutura tiver, o que contrariamente acontece com as perdas por correntes de Foucault, menores serão as perdas no ciclo de histerese.

Estas perdas são consideradas perdas estáticas, pois seu comportamento não varia com o aumento da frequência [13],[14],[16],[18]. Assim, uma opção de se obter as perdas por histerese é de variar o campo magnético que circula no material ferromagnético, a uma

freqüência muito baixa, normalmente 1Hz. Para esta situação, o efeito de correntes induzidas é desprezível [7],[14].

A Equação 2.27 dá a perda por histerese para um material ferromagnético, que é a energia magnética envolvida no processo de magnetização do material durante um intervalo de tempo por unidade de volume [7],[13],[14].

$$W_h = \int_{B_{t=0}}^{B_{t=T}} HdB \text{ [J/m}^3\text{]} \quad (2.27)$$

Um dos métodos mais utilizados para estimar as perdas por histerese é a formula empírica encontrada por Steinmetz em 1892, válida para regimes de formas senoidais, conforme Equação 2.28.

$$W_h = \eta_{st} (B_{\max})^{\alpha_{st}} \quad (2.28)$$

Onde a constante  $\eta_{st}$  é chamada de coeficiente de Steinmetz a qual depende do material e do sistema de unidades utilizados e, o expoente  $\alpha_{st}$  é chamado de expoente de Steinmetz que depende apenas do material [7],[13],[14].

Esta perda pode ser também expressa em potência. Para isso, basta multiplicar  $W_h$  pela freqüência de operação, de acordo com Equação 2.29.

$$P_h = \eta_{st} f (B_{\max})^{\alpha_{st}} \quad (2.29)$$

Pesquisadores chegaram à conclusão que a perda por histerese obedece à expressão empírica de Steinmetz até certos valores de indução magnética, entre 0,2 a 1,2T [7],[14]. Para valores acima deste, o método não é válido para o caso de aço ao silício de grão não orientado. Richter propôs a fórmula [7]:

$$P_h = af(B_{\max}) + bf(B_{\max})^2 \quad (2.30)$$

Esta expressão ficou conhecida como fórmula de Richter. Para induções máximas inferiores a 1,0T, o segundo termo onde a indução é elevada ao quadrado, tem apenas contribuições discretas com o aumento da indução. Já para induções acima de 1,0T, esse termo tem aumentos significativos com o aumento da indução. Os coeficientes a e b são constantes que dependem do material [7],[14].

Contudo, para um aumento de indução magnética, os resultados destas equações tendem sempre a subir o que, de fato não acontece, pois o aumento da indução fará com que o processo de magnetização passe mais tempo alinhando os domínios do que os movimentando, o que faz levantar a hipótese de valor limite de perdas por histerese [7],[13],[14].

Para o caso dos reatores saturados, os valores de indução magnética de trabalho é elevado sendo maior que o limite de validade da Equação de Steinmetz além de, no caso de reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série, a forma de onda é distorcida, o que invalida totalmente o método. A solução aqui encontrada foi de considerar a existência de uma potência magnética.

Em um circuito elétrico onde existem  $n$  fontes de tensão, irão circular correntes por um caminho fechado equivalente do circuito. Da mesma forma, para um circuito magnético onde existam  $n$  fontes de  $\mathfrak{Zmm}$ , irão circular fluxos magnéticos por um caminho fechado equivalente do circuito.

Pelo princípio da dualidade existirá um circuito, para os protótipos PS1, PS2 e PP1 conforme a Figura 2.20 [12]:

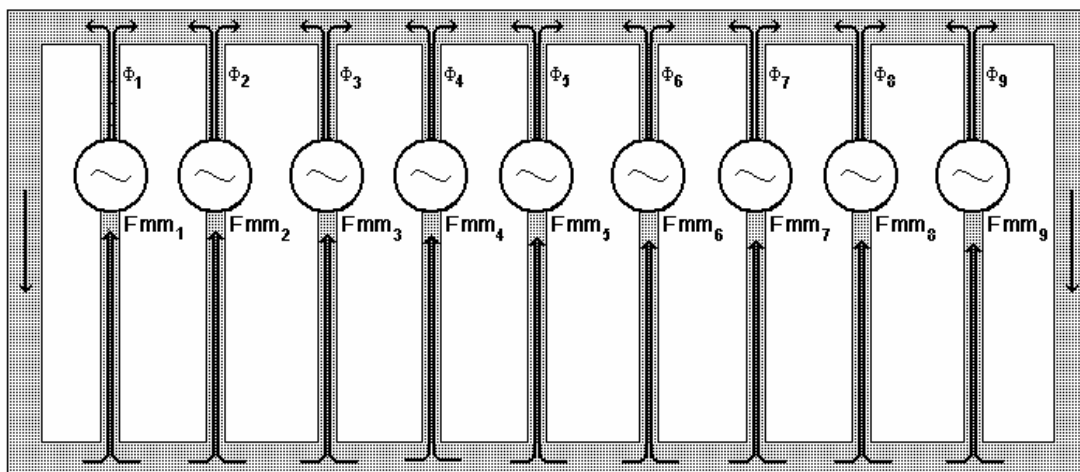


Figura 2.20 - Circuito magnético existente nas estruturas dos protótipos.

Para o caso do PP2 tem-se o mesmo princípio. A única mudança do circuito é que se deve levar em consideração a sua estrutura, pois são três unidades independentes.

Cada fonte desta é responsável tanto pelas perdas por histerese quanto por qualquer outra natureza, durante a região de saturação, já que qualquer perda neste intervalo não é

considerada perdas por histerese, pois não há variação da indução magnética sendo extremamente complicado qualquer tentativa de separação.

Assim, será definida a potência magnética, a qual é dada pela Equação 2.31:

$$P_{mag} = \frac{1}{T} \int_0^T \Im mm(t) \phi(t) dt \quad (2.31)$$

onde:

$$p_{mag}(t) = \Im mm(t) \phi(t) \quad (2.32)$$

que poderá ser decomposta em série de Fourier:

$$p_{mag}(t) = P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (2.33)$$

onde  $h = 1, 2, 3, \dots, \infty$ .

Substituindo na Equação 2.31:

$$P_{mag} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left( P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \right) dt \quad (2.34)$$

$$P_{mag} = P_0 - \frac{2}{T} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{P_h \cos(h\omega t + \varphi_h)}{h\omega} \Big|_0^{T/2} \quad (2.35)$$

$$P_{mag} = P_0 - \frac{2}{T} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{P_h}{h\omega} (\cos(h\pi + \varphi_h) - \cos(0 + \varphi_h)) \quad (2.36)$$

$$P_{mag} = P_0 - \frac{2}{T} \frac{1}{\omega} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{P_h}{h} (\cos(h\pi) \cos(\varphi_h) - \cos(\varphi_h)) \quad (2.37)$$

$$P_{mag} = P_0 - \frac{1}{\pi} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{P_h}{h} \cos(\varphi_h) (\cos(h\pi) - 1) \quad (2.38)$$

Analisando a Equação 2.38 com a variação de h tem-se que, quando h for um número par:



$$\cos(h\pi) = 1 \quad (2.39), e$$

$$\frac{P_h}{h} \cos(\varphi_h)(1-1) = 0 \quad (2.40)$$

Logo, não haverá contribuição alguma destes harmônicos para a perda total magnética. Quando h for um número ímpar:

$$\cos(h\pi) = -1 \quad (2.41), e$$

$$\frac{P_h}{h} \cos(\varphi_h)(-1-1) = -2 \frac{P_h}{h} \cos(\varphi_h) \quad (2.42)$$

Assim, a equação geral das perdas magnéticas será expressa da seguinte forma:

$$P_{mag} = P_0 + \frac{2}{\pi} \sum_{h=0}^{\infty} \frac{P_{2h+1}}{2h+1} \cos(\varphi_{2h+1}) \quad [W] \quad (2.43)$$

Portanto, cada núcleo contribuirá para as perdas totais com o resultado extraído da Equação 2.43.

As perdas totais serão consideradas compostas por três componentes. Uma referente às perdas por correntes de Foucault, outra referente às perdas da potência de magnetização e uma terceira chamadas de perdas por excesso.

Estas perdas por excesso são perdas de difícil equacionamento já que, conforme pode ser visto, são perdas que não possuem um comportamento estável dos seus valores, o que complica uma dedução [15],[18].

A solução aplicada foi a mesma utilizada por Jhoe [7],[14] que simplesmente subtrai das perdas totais, as parcelas referentes perdas por Foucault e histerese.

Nos capítulos seguintes, são relatados os resultados obtidos com as expressões estimadas aqui, para os protótipos ensaiados e fazendo uma comparação entre os modelos, respeitando as suas respectivas ligações dos enrolamentos primários.

## 2.8 O princípio da incerteza

Qualquer medida tem agregado ao valor estimado, um erro. Assim sendo, as medidas deverão possuir a forma mostrada em 2.44 [20].

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (2.44)$$

Portanto, para qualquer medida que tenha sua origem em um equipamento de medição, deve-se considerar a precisão do mesmo para tal finalidade. No caso do osciloscópio da Tektronix modelo 2024 que foi utilizado, para as aquisições de amostra da forma de onda do fluxo magnético, da indução magnética e das correntes, a sua precisão, segundo o fabricante, é de 3%.

Deve-se levar em consideração a precisão das pontas de provas e dos alicates amperímetros. Para as pontas de prova com atenuação de 1:1, a precisão é de  $\pm 2\%$  e para os alicates amperímetros é de  $\pm 3\%$  com relação de 100mV/A. com isso, a precisão final para as grandezas de tensão e corrente tem a relação mostrada em 2.45.

$$\Delta v = 5\% * \text{leitura} \quad \Delta I = 6\% * \text{leitura} \quad (2.45)$$

Este erro é considerado erro absoluto. Ele deverá possuir apenas um algarismo significativo e é ele que define quantas casas decimais a grandeza deverá possuir [20].

Em um primeiro passo se pretende achar o erro absoluto do ganho dos circuitos integradores da placa de aquisição. Para tal finalidade, colocou-se um sinal de tensão puramente senoidal na sua entrada e observou-se a saída do mesmo para fim de comparação entre o valor teórico e o que realmente apareceu na sua saída.

Com o auxílio do osciloscópio, verificaram-se os valores máximos da entrada e da saída. A Tabela 2.11 mostra os valores obtidos, para as entradas e saídas reais dos três circuitos utilizados para aquisição, as saídas ideais que deveriam ser caso não houvesse amplificadores, o ganho de um circuito integrador e o seu erro absoluto.

Como os circuitos são integradores, a saída tem o seguinte comportamento:

$$v_e(t) = \bar{e} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.46)$$

$$v_s(t) = \int \bar{e} \cdot \text{sen}(\omega t) dt = \bar{e} / \omega \cos(\omega t) \quad (2.47)$$

Assim, o módulo da amplitude da saída ideal será dado pela relação:

$$\overline{S_{ideal}} = \frac{\overline{e}}{\omega} \quad (2.48)$$

O que nos dará um erro relativo de:

$$\frac{\Delta S_{ideal}}{\overline{S_{ideal}}} = \frac{\Delta e}{\overline{e}} = 5\% \quad (2.49)$$

O ganho é dado pela Equação 2.50:

$$\overline{Ganho} = \frac{\overline{S_{real}}}{\overline{S_{ideal}}} \quad (2.50)$$

E o seu erro relativo é dado pela expressão a seguir:

$$\frac{\Delta Ganho}{\overline{Ganho}} = \frac{\Delta S_{real}}{\overline{S_{real}}} + \frac{\Delta S_{ideal}}{\overline{S_{ideal}}} = 5\% + 5\% = 10\% \quad (2.51)$$

E os seus valores estão expressos na Tabela 2.11.

**Tabela 2.11** - Valores de tensão medidos para o cálculo do ganho dos circuitos integradores.

	<b>Circuito 1</b>	<b>Circuito 2</b>	<b>Circuito 3</b>
$\overline{e(V)}$	2,14	2,16	2,16
$\Delta e$	0,07	0,07	0,07
$\overline{S_{real}(mV)}$	154	162	128
$\Delta S_{real}$	6	6	5
$\overline{S_{ideal}(mV)}$	5,7	5,7	5,7
$\Delta S_{ideal}$	0,2	0,2	0,2
$\overline{Ganho}$	27	28	23
$\Delta Ganho$	2	2	2

O ganho deverá ser expresso por:

$$Ganho = \overline{Ganho} \pm \Delta Ganho \quad (2.52)$$

Como o sinal lido nas saídas dos circuitos integradores são sinais correspondentes ao fluxo sendo apenas amplificados, pode-se utilizar a expressão 2.53 para a sua determinação.

$$\phi = \frac{S_{real}}{NGanho} \quad (2.53)$$

E o seu erro relativo é obtido conforme 2.54:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta S_{real}}{S_{real}} + \frac{\Delta Ganho}{Ganho} = 5\% + 10\% = 15\% \quad (2.54)$$

Vale ressaltar que foi considerado um valor exato de espiras nas bobinas de prova o que torna o seu erro relativo igual a zero.

Da mesma forma, a única relação entre o fluxo magnético e a indução magnética é a área, pois,

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2.55)$$

Pode-se expressar o seu erro relativo como é mostrado em 2.56:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta\phi}{\phi} + \frac{\Delta A}{A} = 15\% + 1,03\% = 16,03\% \quad (2.56)$$

Toda e qualquer medida quando não especificada sua incerteza, deverá considerar como erro, uma unidade do seu algarismo duvidoso [20]. Como no caso das bobinas de provas, em que se considerou um número exato de espiras, o mesmo será considerado com os enrolamentos  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  e  $N_3$ , sendo estes valores exatos mostrados nas Tabelas 2.2 e 2.3, o que faz com que não exista erro relativo.

Para o caso de dimensões físicas, foi levado em conta apenas o erro absoluto no fator de preenchimento das áreas das secções transversais nas partes dos protótipos. Assim, tomando como exemplo o protótipo PS1, para as áreas dos quadrados, referente aos núcleos, e dos retângulos, referentes aos retornos e travessas, seus valores e suas incertezas deverão ser, respectivamente,

$$A_{10 \times 10} = (0.97 \pm 0.01) \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.57)$$

$$A_{20 \times 10} = (0.97 \pm 0.01) \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

O que independentemente da área o seu erro relativo será sempre 1,03%, conforme é mostrado na expressão 2.56 para a obtenção do erro relativo da indução magnética.

Para o caso das perdas por correntes de Foucault, em watts/m<sup>3</sup>, a expressão seguinte, mostra o erro relativo para tal, presentes nos núcleos e nas travessas e retornos.

$$\frac{\Delta P_f}{P_f} = \frac{2\Delta B_{\max}}{B_{\max}} = 2 \times 16,03\% = 32,06\% \quad (2.58)$$

E para o seu cálculo em watts deve-se levar em consideração o erro relativo para o volume em cada peça.

Como a potência de magnetização é dada por  $fmmx\phi$  o seu erro relativo é obtido através da soma dos erros relativos de  $fmm$  e  $\phi$ . O erro relativo absoluto da  $\Im mm$  poderá ser obtido de duas formas, conforme a quantidade de enrolamentos primários existentes em cada um.

Para os núcleos que possuem apenas um enrolamento primário, a expressão que deduz o erro relativo é da forma como segue:

$$\frac{\Delta \Im mm}{\Im mm} = \frac{\Delta I}{I} = 6\% \quad (2.59)$$

Para os núcleos que possuem dois enrolamentos primários, a expressão é:

$$\frac{\Delta \Im mm}{\Im mm} = \left[ \left( \frac{\Delta I}{I} \right) (N_2 I) + \left( \frac{\Delta I}{I} \right) (N_1 I) \right] / \Im mm = 6\% \quad (2.60)$$

O que nos dará um erro relativo para a potência de magnetização de:

$$\frac{\Delta P_{\text{mag}}}{P_{\text{mag}}} = \frac{\Delta \Im mm}{\Im mm} + \frac{\Delta \phi}{\phi} = 6\% + 15\% = 21\% \quad (2.61)$$

Estas deduções são essenciais para os resultados finais, para fins de comparação entre os valores calculados com as equações aqui estimadas, com os valores obtidos experimentalmente através do registrador MARH-21 tendo estes, o mesmo tratamento onde aqui é considerada a classe de exatidão do equipamento.

Para correntes e tensões a classe de exatidão é 0,5;

Para potência ativa a classe de exatidão é 1,0.

Assim, para qualquer leitura de corrente e tensão, o erro relativo máximo é de 0,5% e para a potência ativa, é de 1,0% e deverá ser sempre considerado.

A potência ativa registrada corresponde às perdas nos enrolamentos e perdas no material ferromagnético e esta por sua vez, é dividida nas parcelas de correntes por Foucault, de magnetização e excesso.

As perdas nos enrolamentos são calculadas através da Equação 2.62:

$$P_{cu} = rI^2 \quad (2.62)$$

E o seu erro relativo é dado por:

$$\frac{\Delta P_{cu}}{P_{cu}} = \frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta I}{I} \quad (2.63)$$

O valor das perdas no ferro é o resultado da subtração entre o valor da potência ativa registrada e o valor da potência nos enrolamentos, conforme a Equação 2.64.

$$\overline{P}_{fe} = \overline{P}_{ativa} - \overline{P}_{enrol} \quad (2.64)$$

e o seu erro absoluto é dado da forma:

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_{ativa} + \Delta P_{enrol} \quad (2.65)$$

As perdas no ferro são expressas conforme a Equação 2.66:

$$P_{fe} = \overline{P}_{fe} \pm \Delta P_{fe} \quad (2.66)$$

Os valores obtidos através da equação acima, serão comparados com os valores encontrados com os cálculos das equações 2.26 e 2.43 das perdas existentes no ferro em cada um dos protótipos.

Neste Capítulo, foram apresentadas as formas de ligação para a realização dos ensaios em cada um dos protótipos e as representações das  $fmm'$ s nos diagramas fasoriais para cada um deles. Relatou-se a maneira pela qual foram feitos os ensaios e a modelagem das parcelas das perdas mensuráveis no material ferromagnético em perdas por Foucault e perdas por magnetização.

No Capítulo 3 será detalhado o comportamento destas parcelas no caso específico dos protótipos com os enrolamentos primários ligados em série e realização de comparações dos valores oriundos destas equações com os valores medidos, de forma direta, das perdas totais no material ferromagnético e a obtenção dos erros encontrados para cada uma destas parcelas.

No Capítulo 4 será feito o mesmo estudo contido no Capítulo 3, sendo apenas relacionado aos protótipos com os enrolamentos primários ligados em paralelo.

## Capítulo 3

### Estudo do comportamento das perdas magnéticas nos reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série.

#### 3.1 Levantamento da curva característica operacional

Conforme foi descrito no capítulo 2, os protótipos foram projetados para uma curva que apresentasse uma inclinação de 34%. No entanto, é possível estimar as inclinações de cada um deles, através das curvas características de cada um. A Figura 3.1 mostra as curvas experimentais para os protótipos PS1 e PS2.

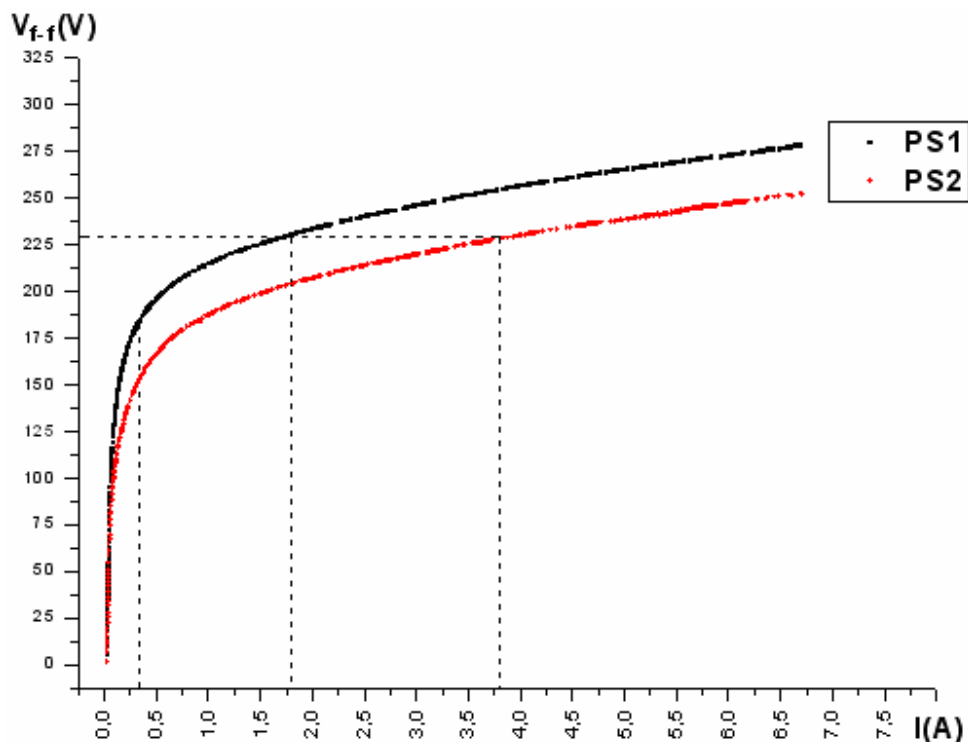


Figura 3.1 – Curva experimental da característica operacional dos protótipos com ligação em série.



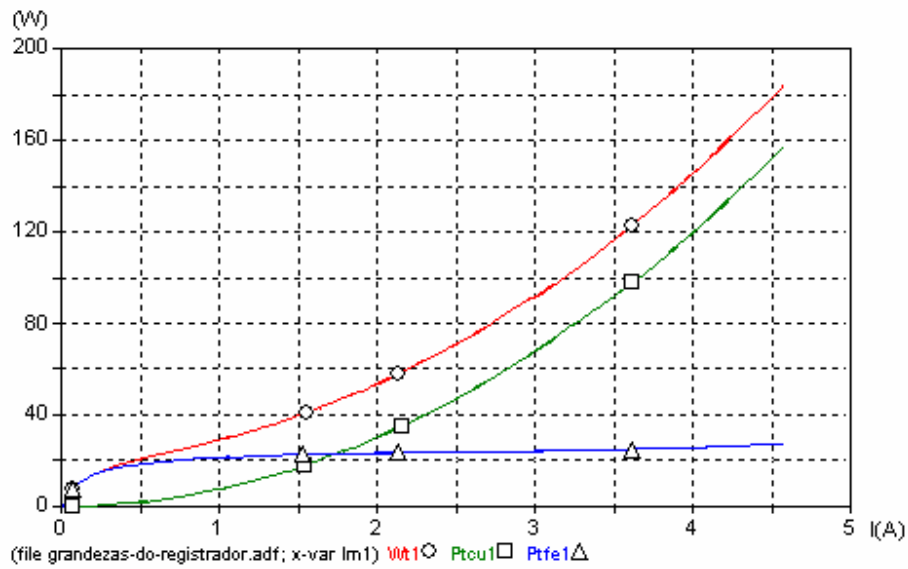
Pelas curvas representadas na Figura 3.1 observa-se que, o protótipo PS1 apresenta um joelho mais acentuado que o PS2. Para um valor de corrente de 0,34A, o qual é o valor de início de saturação no projeto [3], o protótipo PS1 terá em seus terminais, um valor de tensão aproximadamente igual a 185V entre fases. Já para o protótipo PS2, nos seus terminais apresentará um valor de tensão aproximadamente igual a 154V entre fases.

Esta diferença significa que, seja qual for o nível de tensão estabelecido para que ambos operem, o PS1 terá a vantagem de solicitar menos corrente e que, conseqüentemente, acarretará em menos perdas que o PS2.

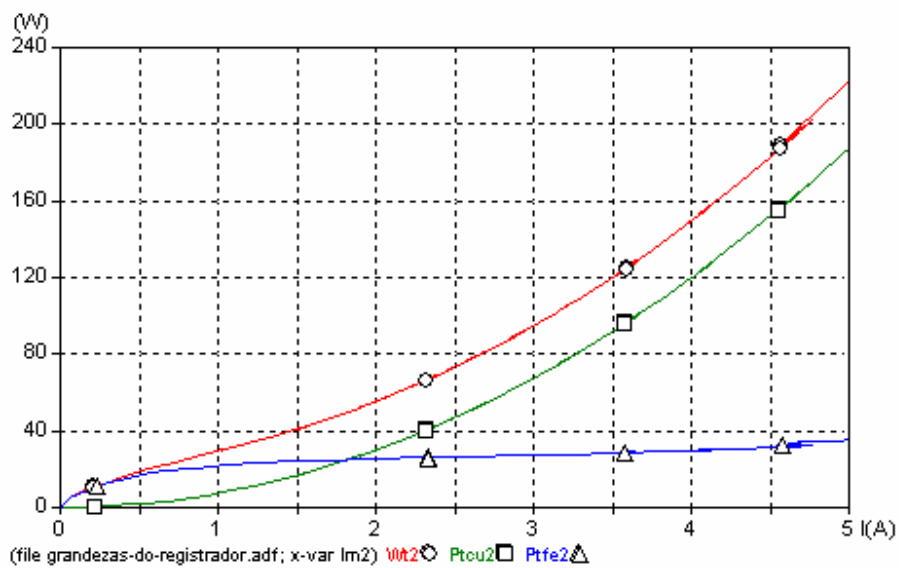
Por outro lado, considerando que a saturação se dá quando a corrente atinge o valor de 0,34A, as inclinações de cada um deles será de 34% para o PS1 e 20% para o PS2, fazendo com que este leve vantagem no quesito de operação, pois consegue estabelecer um valor de tensão mais próximo do desejado.

Com o mesmo propósito comparativo, as Figuras 3.2a e 3.2b mostram o comportamento das perdas totais, perdas no cobre e perdas no núcleo medidas, respectivamente, dos protótipos PS1 e PS2. Através delas, pode-se observar que a diferença de corrente para uma determinada tensão de operação, ocasionará um aumento mais significativo para as perdas no cobre, pois, elas são proporcionais ao quadrado da corrente  $ri^2$ , o que não acontece com as perdas no ferro, pois o seu aumento é mais lento pelo fato de que estas perdas são relacionadas ao valor máximo de indução em que se encontra o material.

Como o material estará na saturação a partir de uma corrente de, aproximadamente, 0,34A, para operação com correntes acima deste valor, o material ferromagnético se encontra na região de saturação, o que fará com que o valor máximo de indução magnética no material ferromagnético tenha uma variação extremamente pequena.



**Figura 3.2 – a)** Comportamento das perdas totais, no cobre e no ferro para o protótipo PS1. Im1): Corrente de alimentação do protótipo PS1; Wt1○: Perda total do Protótipo PS1; Ptcu1□: Perda no cobre do Protótipo PS1; Ptfel1 △: Perda no ferro do Protótipo PS1.



**Figura 3.2 – b)** Comportamento das perdas totais, no cobre e no ferro para o protótipo PS2. Im2): Corrente de alimentação do protótipo PS2; Wt2○: Perda total do Protótipo PS2; Ptcu2□: Perda no cobre do Protótipo PS2; Ptfel2 △: Perda no ferro do Protótipo PS2.

A principal característica que esse tipo de reator saturado, no caso os protótipos PS1 e PS2, pode fornecer para o estudo do comportamento das suas perdas magnéticas é a forma de onda da indução magnética nos seus núcleos.

Conforme foi visto no Capítulo 2, ela tem forma trapezoidal e é limitada pelo valor de saturação. No entanto, na literatura atual, um tratamento especial é dado aos dispositivos eletromagnéticos que trabalham com formas de onda de indução magnética distorcida devido à sua complexidade e sua composição repleta de harmônicos, sem grandes sucessos quando o valor da indução magnética de trabalho é elevado [14].

Estes harmônicos fazem com que as perdas cresçam quando comparadas a situações de indução puramente senoidal, pois as perdas aumentam com o aumento da frequência. As perdas por correntes parasitas criadas em estruturas magnéticas destes tipos de reatores foram estimadas de duas formas diferentes, sendo uma para os núcleos e outra para as partes de fechamento de circuito magnético, ou seja, os retornos e as travessas.

As perdas por histerese, no entanto, não puderam ser adequadamente quantificadas devido a fatores como, por exemplo, a definição dos caminhos fechados de circulação de campo magnético, fazendo com que seja considerada uma potência de magnetização que, além das perdas por histerese, inclui contribuições de outras fontes de perdas que aqui não serão descritas.

Nos tópicos seguintes, é detalhada toda a metodologia e todos os cálculos para que se pudesse chegar a uma estimativa de tais perdas.

## 3.2 Perdas por Foucault

Sabe-se que para os reatores saturados com ligação em série, cada núcleo fica isento de saturação em  $\pi/n$  em cada semi-ciclo de operação, onde  $n$  é o número de núcleos, o que significa que cada núcleo fica fora da saturação em  $T/2n$  nas extremidades dos semi-ciclos, sendo  $T$  o período de operação.

No caso dos protótipos PS1 e PS2, o período de operação é 16,67ms dando um valor para  $T/2n$  de 0,926ms. Isto significa que esse é o intervalo em que a indução magnética nestas peças tem um comportamento linear.

Na Figura 3.3a é mostrada uma das leituras para visualização do comportamento real da curva da indução magnética e na Figura 3.3b é mostrada a curva da indução magnética que será utilizada para o desenvolvimento das perdas magnéticas. A curva da Figura 3.3b foi obtida com um tratamento feito na curva real na região de saturação. Foi utilizada uma média aritmética dos valores instantâneos encontrados durante este intervalo. No intervalo isento de saturação, não houve a necessidade de qualquer tipo de tratamento.

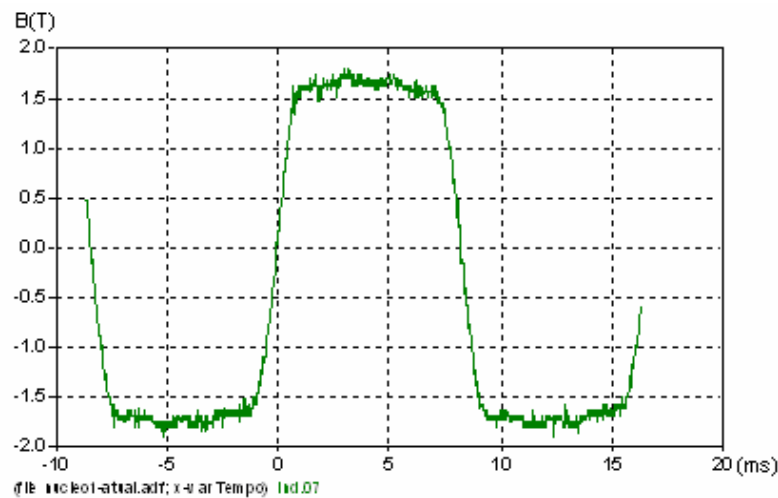


Figura 3.3 - (a) curva real da indução magnética nos núcleos dos protótipos série.

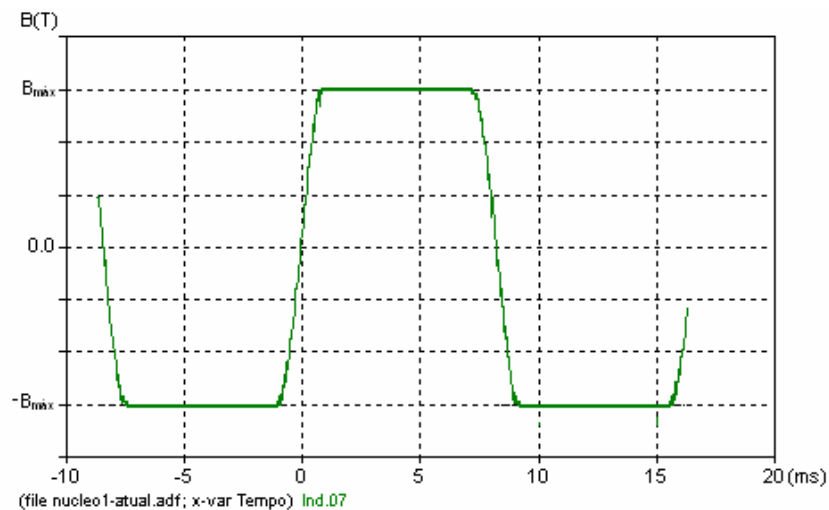


Figura 3.3 - (b) curva da indução magnética obtida para a estimativa das perdas nos núcleos dos protótipos série.

Daqui em diante, os desenvolvimentos serão baseados em curvas com o comportamento idêntico ao da Figura 3.3b, que considera um único valor para a região de saturação.

Esta curva, para estudo, pode ser dividida em quatro intervalos. Dois referentes às duas regiões de saturação e os outros dois, às regiões isentas de saturação. Tendo o ponto (0,0) como origem da curva, pode-se dividi-la nos intervalos como segue:

Para o intervalo 1:

$$\frac{-T}{4n} \leq t \leq \frac{T}{4n} \rightarrow \frac{-T}{36} \leq t \leq \frac{T}{36} \quad (3.1)$$

as condições de contorno são:

$$\text{i) } B\left(\frac{-T}{36}\right) = -B_{\text{máx}} \quad (3.2)$$

$$\text{ii) } B(0) = (0) \quad (3.3)$$

$$\text{iii) } B\left(\frac{T}{36}\right) = B_{\text{máx}} \quad (3.4)$$

o que resulta na equação:

$$B(t) = \frac{36}{T} B_{\text{máx}} \cdot t \quad (3.5)$$

Para o intervalo 2:

$$\frac{T}{4n} \leq t \leq \frac{(2n-1)T}{4n} \rightarrow \frac{T}{36} \leq t \leq \frac{17T}{36} \quad (3.6)$$

a condição de contorno é:

$$B(t) = B_{\text{máx}} \quad (3.7)$$

Para o intervalo 3:

$$\frac{(2n-1)T}{4n} \leq t \leq \frac{(2n+1)T}{4n} \rightarrow \frac{17T}{36} \leq t \leq \frac{19T}{36} \quad (3.8)$$

as condições de contorno são:

$$\text{i) } B\left(\frac{17T}{36}\right) = B_{\text{máx}} \quad (3.9)$$

$$\text{ii) } B\left(\frac{T}{2}\right) = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{iii) } B\left(\frac{19T}{36}\right) = -B_{\text{máx}} \quad (3.11)$$

o que resulta na equação:

$$B(t) = -\frac{36}{T} B_{\text{máx}} \cdot t + 18B_{\text{máx}} \quad (3.12)$$

Para o intervalo 4:

$$\frac{(2n+1)T}{4n} \leq t \leq \frac{(4n-1)T}{4n} \rightarrow \frac{19T}{36} \leq t \leq \frac{35T}{36} \quad (3.13)$$

a condição de contorno é:

$$B(t) = -B_{\text{máx}} \quad (3.14)$$

Calculando a derivada de cada uma destas equações e, substituindo na Equação 2.20 resulta em:

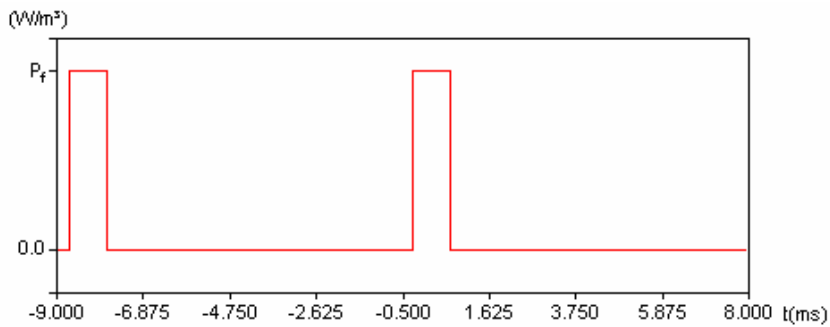
$$\frac{\partial B_1}{\partial t} = \frac{36}{T} B_{\text{máx}} \rightarrow P_f = \sigma \frac{d^2}{12} \left( \frac{36}{T} B_{\text{máx}} \right)^2 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial B_2}{\partial t} = 0 \rightarrow P_f = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial B_3}{\partial t} = \frac{36}{T} B_{\text{máx}} \rightarrow P_f = \sigma \frac{d^2}{12} \left( \frac{36}{T} B_{\text{máx}} \right)^2 \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial B_4}{\partial t} = 0 \rightarrow P_f = 0 \quad (3.18)$$

Desta forma, a curva de perdas por correntes de Foucault é constituída de pulsos com largura de  $T/18$  conforme é mostrado na Figura 3.4:



**Figura 3.4** - Forma de onda das perdas por correntes de Foucault em um núcleo.

Assim, para obter a potência média dissipada por correntes de Foucault, basta dividir a área da curva pelo seu período:

$$P_f = \sigma \frac{d^2}{12} \left( \frac{36}{T} B_{\max} \right)^2 \frac{T/18}{T/2} \quad (3.19)$$

$$P_f = \sigma \frac{d^2}{12} \left( \frac{36}{T} B_{\max} \right)^2 \frac{1}{9} \quad (3.20)$$

$$P_f = 12\sigma d^2 f^2 B_{\max}^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (3.21)$$

Esta é a equação final para o cálculo de perdas por correntes de Foucault nos núcleos do reator saturado com ligação série.

A vantagem de utilizar a equação acima vem de que não há necessidade de se decompor a forma de onda da indução magnética em série de Fourier, pois o único dado da forma de onda necessário para o cálculo acima, é o valor de pico da onda.

O termo  $36/T$  da equação acima, conforme foi visto anteriormente, é exatamente a metade do tempo em que o núcleo fica isento de saturação a cada semi-ciclo. Portanto, para um caso geral, esse termo deverá ter a relação  $4n/T$  onde  $n$  é o número de núcleos existentes em um reator saturado. Para uma expressão geral, tem-se que:

$$P_f = \sigma \frac{d^2}{12} \left( \frac{4n}{T} B_{\max} \right)^2 \frac{T/2n}{T/2} \quad (3.22)$$

ou seja:

$$P_f = \sigma \frac{4d^2 f^2 n B_{\max}^2}{3}. \quad (3.23)$$

Como se pode observar, as perdas por correntes de Foucault, em cada núcleo, são diretamente proporcionais ao número de núcleos existentes em um reator saturado.

Considerando um reator saturado construído exatamente igual ao que foi dimensionado e operando em perfeitas condições, o valor máximo da indução magnética experimentada por cada núcleo, deverá ser a mesma, o que significa dizer que esta equação quando multiplicada pelo número de núcleos, fornecerá as perdas por correntes de Foucault totais nos núcleos de um reator saturado por unidade de volume.

$$P_f = \sigma \frac{4d^2 f^2 n^2 B_{\max}^2}{3} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (3.24)$$

A Equação 3.24 é a expressão final para as perdas por correntes de Foucault nos núcleos dos reatores saturados. Fica fácil verificar que estas perdas aumentam com o quadrado do número de núcleos.

Conforme foi relatado no Capítulo 1, o aumento do número de núcleos em um reator saturado faz com que diminua o número de harmônicos existentes nas correntes de alimentação, bem como em suas tensões.

Porém esse aumento de núcleos poderá comprometer o rendimento do equipamento, pois uma parcela de energia deverá ser consumida pela existência destas correntes de Foucault nos núcleos.

Para uma melhor compreensão, considere-se a Figura 3.5 onde nela estão nomeados os núcleos referidos nas Tabelas 3.1 e 3.5.

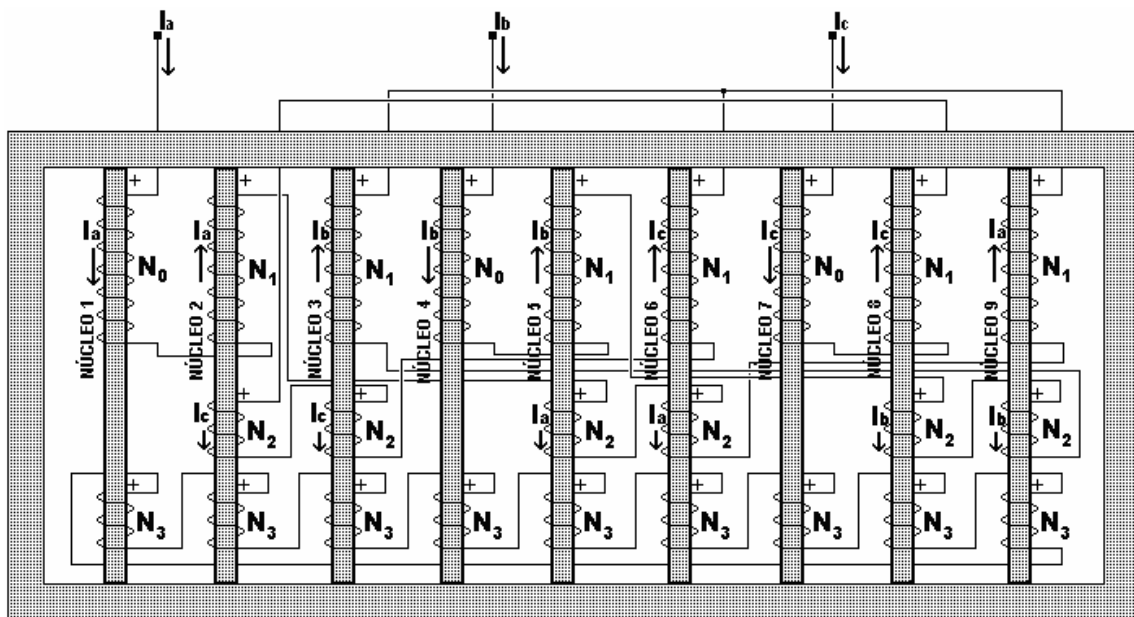


Figura 3.5 - Nomeação dos núcleos do protótipo PS1.

A Tabela 3.1 mostra os valores de indução magnética máxima  $B_{\max}(T)$  e o erro absoluto  $\Delta B_{\max}(T)$  encontrados nos núcleos do protótipo PS1, para cada um dos pontos escolhidos de variação de corrente de alimentação  $I_m(A)$ , assim como o seu erro absoluto  $\Delta I_m(A)$ .

*Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural*



Tabela 3.1 - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PSI.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$
L1	0,52	0,03	1,3	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L2	1,03	0,06	1,4	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L3	1,58	0,09	1,5	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2
L4	2,1	0,1	1,6	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L5	2,5	0,2	1,6	0,3	1,4	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L6	2,7	0,2	1,6	0,3	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L7	3,2	0,2	1,6	0,3	1,5	0,2	1,6	0,3	1,5	0,2
L8	3,7	0,2	1,6	0,3	1,5	0,2	1,6	0,3	1,6	0,2
L9	4,2	0,3	1,7	0,3	1,5	0,2	1,6	0,3	1,6	0,3
L10	4,8	0,3	1,7	0,3	1,5	0,2	1,6	0,3	1,6	0,3

Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$
L1	1,3	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L2	1,4	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L3	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2
L4	1,5	0,2	1,6	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L5	1,6	0,3	1,6	0,3	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L6	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,2	1,5	0,2	1,6	0,2
L7	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,5	0,2	1,6	0,3
L8	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3
L9	1,7	0,3	1,7	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3
L10	1,7	0,3	1,7	0,3	1,7	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3

Da mesma forma, a Figura 3.6 tem o intuito de identificar os núcleos nos quais são baseadas as Tabelas 3.2 e 3.6.

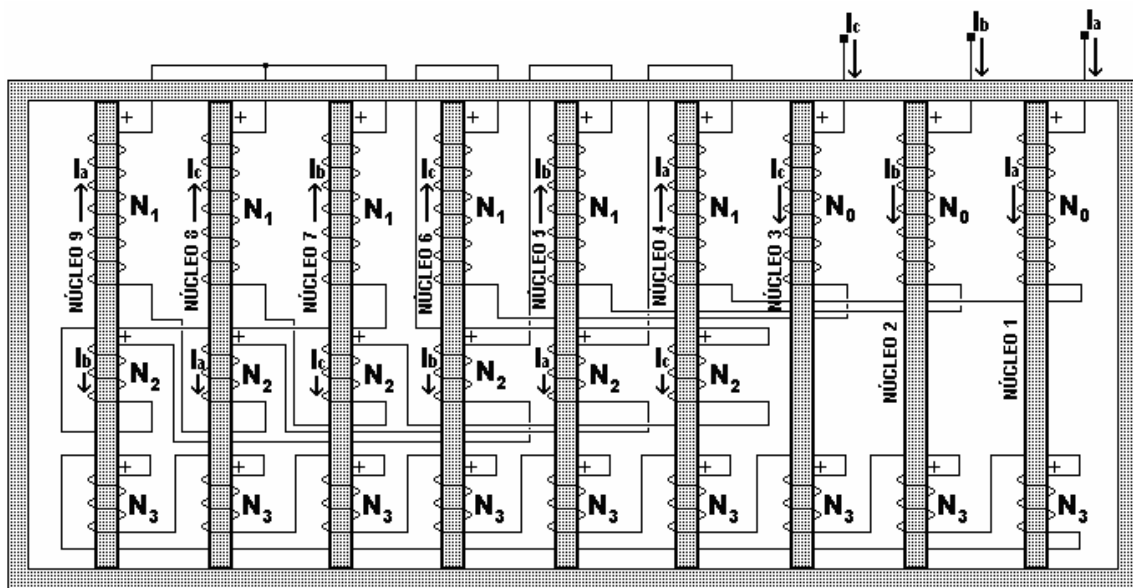


Figura 3.6 - Nomeação dos núcleos do protótipo PS2.

A Tabela 3.2 mostra os valores de indução magnética máxima  $B_{\text{máx}}(\text{T})$  e o erro absoluto  $\Delta B_{\text{máx}}(\text{T})$  encontrados nos núcleos do protótipo PS2, para cada um dos pontos escolhidos de variação de corrente de alimentação  $I_m(\text{A})$ , assim como o seu erro absoluto  $\Delta I_m(\text{A})$ .

**Tabela 3.2** - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS2.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$
L1	0,54	0,03	1,3	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2
L2	1,05	0,06	1,4	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L3	1,56	0,09	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L4	2,1	0,1	1,5	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L5	2,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L6	2,7	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L7	3,2	0,2	1,6	0,3	1,6	0,3	1,5	0,2	1,5	0,2
L8	3,7	0,2	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,2	1,6	0,2
L9	4,2	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3
L10	4,8	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$
L1	1,2	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2
L2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2
L3	1,4	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L4	1,4	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2
L5	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L6	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2
L7	1,5	0,2	1,5	0,2	1,6	0,3	1,5	0,2	1,5	0,2
L8	1,5	0,2	1,6	0,3	1,6	0,3	1,5	0,2	1,6	0,3
L9	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,2	1,6	0,3
L10	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3	1,6	0,3

Para um valor único de indução magnética experimentada pelos núcleos dos protótipos, deve-se considerar uma média aritmética dos valores encontrados em todos os núcleos para cada um dos protótipos, significando que quando construídos e ensaiados de forma ideal, os núcleos passariam a experimentar valores idênticos de indução magnética em todos os núcleos da estrutura.

Assim, as Tabelas 3.3 e 3.4 mostram os valores médios de indução magnética,  $B_{\text{máx}}(\text{T})$  e o seu erro absoluto  $\Delta B_{\text{máx}}(\text{T})$  e os valores de corrente  $I_m(\text{A})$  e seu erro absoluto  $\Delta I_m(\text{A})$  para tal situação.

**Tabela 3.3** - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Médio	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$
L1	0,52	0,03	1,3	0,2
L2	1,03	0,06	1,4	0,2
L3	1,58	0,09	1,5	0,2
L4	2,1	0,1	1,5	0,2
L5	2,5	0,2	1,5	0,2
L6	2,7	0,2	1,5	0,2
L7	3,2	0,2	1,6	0,3
L8	3,7	0,2	1,6	0,3
L9	4,2	0,3	1,6	0,3
L10	4,8	0,3	1,6	0,3

**Tabela 3.4** - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Médio	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$
L1	0,54	0,03	1,2	0,2
L2	1,05	0,06	1,3	0,2
L3	1,56	0,09	1,4	0,2
L4	2,1	0,1	1,5	0,2
L5	2,5	0,2	1,5	0,2
L6	2,7	0,2	1,5	0,2
L7	3,2	0,2	1,5	0,2
L8	3,7	0,2	1,6	0,3
L9	4,2	0,3	1,6	0,3
L10	4,8	0,3	1,6	0,3

Com os valores expostos nas Tabelas 3.1 e 3.2, sendo utilizados na Equação 3.11, considerando o volume dos núcleos, foram calculados os valores das perdas por Foucault, em watts,  $P_{\text{fouc}}(\text{W})$  e o erro absoluto  $\Delta P_{\text{fouc}}(\text{W})$ , sendo estes mostrados nas Tabelas 3.5 e 3.6, respectivamente, para os protótipos PS1 e PS2, para a variação de corrente de alimentação em cada um deles.

**Tabela 3.5** – Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS1 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,52	0,03	1,2	0,4	1,0	0,3	1,2	0,4	1,1	0,3
L2	1,03	0,06	1,4	0,5	1,2	0,4	1,3	0,4	1,2	0,4
L3	1,58	0,09	1,5	0,5	1,3	0,4	1,4	0,5	1,4	0,4
L4	2,1	0,1	1,6	0,5	1,4	0,4	1,5	0,5	1,4	0,5
L5	2,5	0,2	1,7	0,5	1,4	0,4	1,6	0,5	1,5	0,5
L6	2,7	0,2	1,7	0,6	1,4	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5
L7	3,2	0,2	1,8	0,6	1,5	0,5	1,7	0,5	1,6	0,5
L8	3,7	0,2	1,8	0,6	1,5	0,5	1,7	0,6	1,6	0,5
L9	4,2	0,3	1,9	0,6	1,6	0,5	1,8	0,6	1,7	0,5
L10	4,8	0,3	1,9	0,6	1,6	0,5	1,8	0,6	1,7	0,6
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	1,2	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4	1,1	0,4	1,1	0,4
L2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3	0,4	1,3	0,4	1,3	0,4
L3	1,5	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,4	0,4	1,4	0,5
L4	1,6	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5
L5	1,7	0,5	1,7	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,6	0,5
L6	1,7	0,5	1,7	0,6	1,6	0,5	1,6	0,5	1,6	0,5
L7	1,8	0,6	1,8	0,6	1,7	0,5	1,6	0,5	1,7	0,5
L8	1,8	0,6	1,8	0,6	1,7	0,6	1,7	0,5	1,7	0,6
L9	1,9	0,6	1,9	0,6	1,8	0,6	1,7	0,5	1,8	0,6
L10	1,9	0,6	1,9	0,6	1,9	0,6	1,7	0,6	1,8	0,6

**Tabela 3.6** - Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS2 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,54	0,03	1,1	0,3	1,1	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3
L2	1,05	0,06	1,3	0,4	1,3	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4
L3	1,56	0,09	1,4	0,4	1,4	0,4	1,3	0,4	1,3	0,4
L4	2,1	0,1	1,5	0,5	1,5	0,5	1,4	0,5	1,4	0,5
L5	2,5	0,2	1,6	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5
L6	2,7	0,2	1,6	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5
L7	3,2	0,2	1,6	0,5	1,7	0,5	1,6	0,5	1,6	0,5
L8	3,7	0,2	1,7	0,5	1,7	0,6	1,6	0,5	1,6	0,5
L9	4,2	0,3	1,8	0,6	1,8	0,6	1,7	0,5	1,7	0,5
L10	4,8	0,3	1,8	0,6	1,8	0,6	1,7	0,6	1,7	0,6

Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{\text{fouc}}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{\text{fouc}}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{\text{fouc}}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{\text{fouc}}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{\text{fouc}}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	1,0	0,3	1,1	0,3	1,1	0,4	1,0	0,3	1,1	0,3
L2	1,2	0,4	1,2	0,4	1,3	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4
L3	1,3	0,4	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3	0,4	1,4	0,4
L4	1,4	0,4	1,5	0,5	1,5	0,5	1,4	0,4	1,4	0,5
L5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,6	0,5	1,4	0,5	1,5	0,5
L6	1,5	0,5	1,5	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5
L7	1,5	0,5	1,6	0,5	1,6	0,5	1,5	0,5	1,6	0,5
L8	1,6	0,5	1,6	0,5	1,7	0,5	1,6	0,5	1,6	0,5
L9	1,6	0,5	1,7	0,5	1,7	0,6	1,6	0,5	1,7	0,5
L10	1,7	0,5	1,7	0,6	1,8	0,6	1,7	0,5	1,8	0,6

Observando os valores presentes nas Tabelas acima, verifica-se uma diferença de valores devido à existência de um desequilíbrio de alimentação causado por conta da tensão no barramento de alimentação da bancada de ensaio ou talvez por algum eventual aspecto construtivo dos protótipos.

As perdas totais calculadas por correntes de Foucault dissipadas por todos os núcleos da estrutura de cada um dos protótipos é igual à soma das parcelas de cada um dos núcleos.

As Tabelas 3.7 e 3.8 mostram os valores de corrente, indução magnética média nos núcleos e as perdas totais calculadas por correntes de Foucault nos núcleos dos protótipos PS1 e PS2, respectivamente:

**Tabela 3.7** - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Indução média		Perdas por Foucault total nos núcleos	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$B_{\text{máx}}(T)$	$\Delta B(T)$	$P_{\text{fouc}}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,52	0,03	1,3	0,2	10	3
L2	1,03	0,06	1,4	0,2	12	4
L3	1,58	0,09	1,5	0,2	13	4
L4	2,1	0,1	1,5	0,2	14	4
L5	2,5	0,2	1,5	0,2	14	5
L6	2,7	0,2	1,5	0,2	15	5
L7	3,2	0,2	1,6	0,3	15	5
L8	3,7	0,2	1,6	0,3	15	5
L9	4,2	0,3	1,6	0,3	16	5
L10	4,8	0,3	1,6	0,3	16	5

**Tabela 3.8** - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Indução média		Perdas por Foucault total nos núcleos	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,54	0,03	1,2	0,2	9	3
L2	1,05	0,06	1,3	0,2	11	4
L3	1,56	0,09	1,4	0,2	12	4
L4	2,1	0,1	1,5	0,2	13	4
L5	2,5	0,2	1,5	0,2	14	4
L6	2,7	0,2	1,5	0,2	14	4
L7	3,2	0,2	1,5	0,2	14	5
L8	3,7	0,2	1,6	0,3	15	5
L9	4,2	0,3	1,6	0,3	15	5
L10	4,8	0,3	1,6	0,3	16	5

Da mesma forma que nas travessas e retornos, poder-se-ia utilizar o princípio da decomposição harmônica para o caso dos núcleos, pois mesmo tendo um comportamento estável durante o seu período de operação, é uma onda distorcida e qualquer onda distorcida pode ser decomposta em ondas de frequências múltiplas da fundamental.

A não utilização deste método nos núcleos tem a finalidade de obter equações mais próximas da realidade da operação, já que a curva da Figura 3.3a foi obtida através dos valores instantâneos de indução magnética, ou seja, os valores que realmente estão sendo experimentados por parte do material ferromagnético e, uma decomposição harmônica transforma esta curva em uma série de curvas virtuais que se sobrepõem.

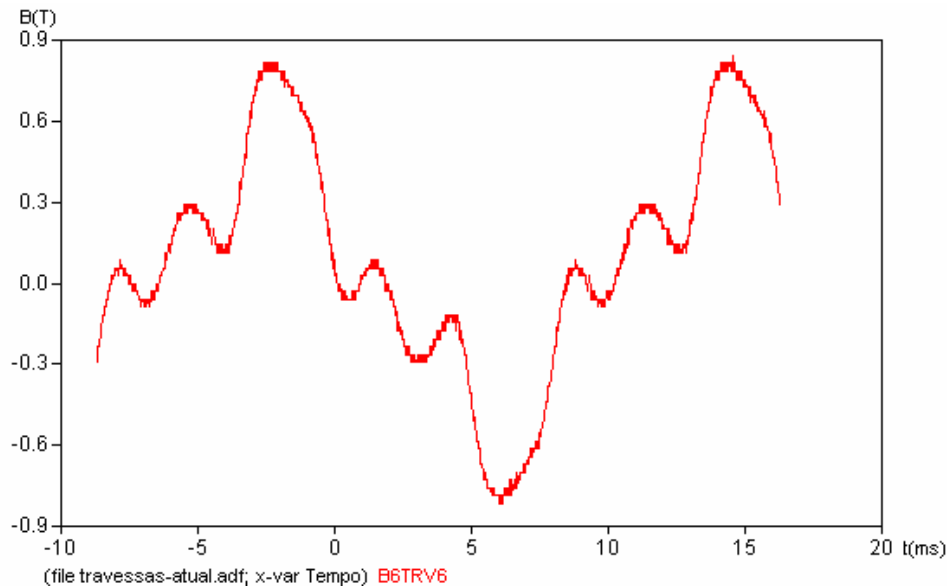
Então a proposta aqui é de se utilizar o menos possível a decomposição harmônica, o que de fato só acontecerá em situações inevitáveis, como é o caso das induções magnéticas presentes nas travessas e retornos que possuem um comportamento difícil de equacioná-lo no seu intervalo de operação e sendo obtidas através da Equação 3.17.

Além dos núcleos, as partes de fechamento do circuito magnético, as travessas e retornos, para o caso dos reatores saturados com ligação em série, são grandes fontes geradoras de perdas por correntes de Foucault.

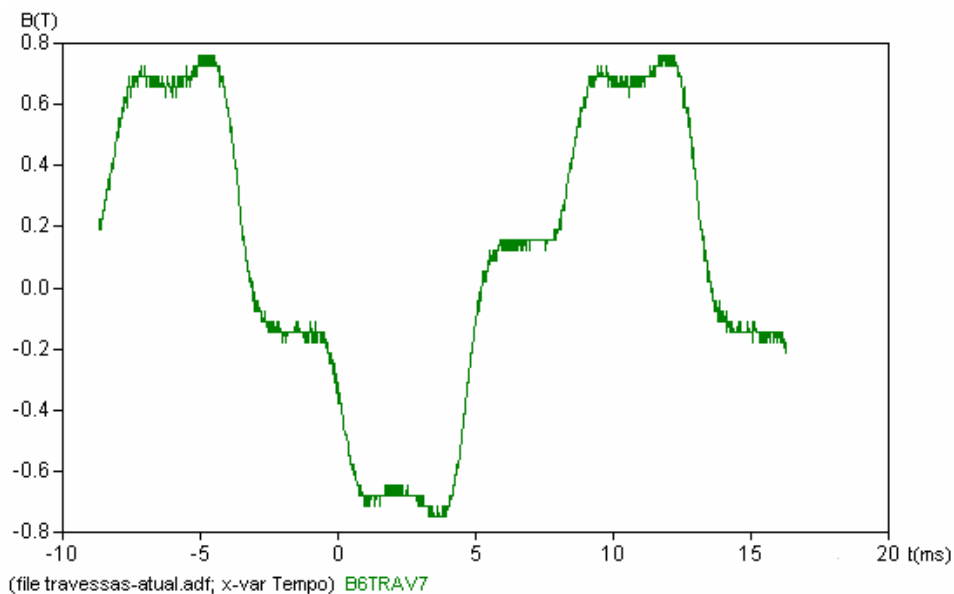
Diante dos dados registrados durante os ensaios, verificou-se que, nestas partes, as formas de onda da indução magnética têm um comportamento extremamente distorcido, o que impede de se utilizar a expressão estipulada para as perdas nos núcleos.

Nestas partes, não há como evitar a decomposição harmônica de tais ondas. Portanto, foi utilizada a rotina PlotXY do programa computacional ATP.

Os resultados mostraram a existência de vários comportamentos diferentes das formas de onda da indução magnética, quando consideradas todas as partes de fechamento de circuito magnético. As Figuras 3.7a e 3.7b mostram dois de tais comportamentos.



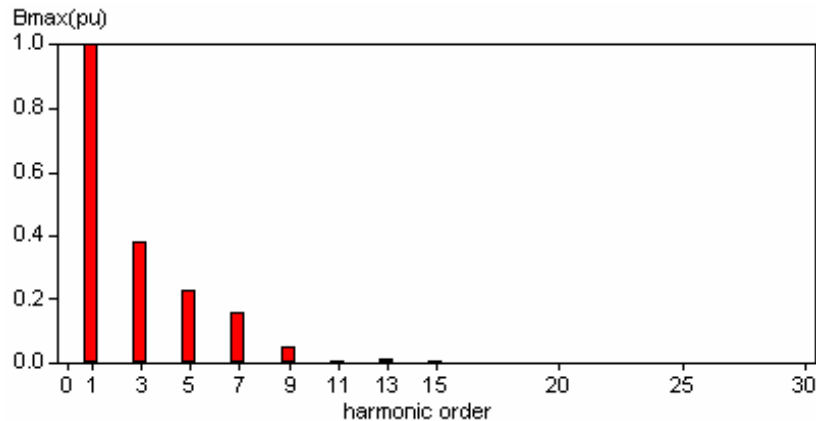
**Figura 3.7 – a)** Forma de onda da indução magnética presente na travessa 6 da Figura 3.11.



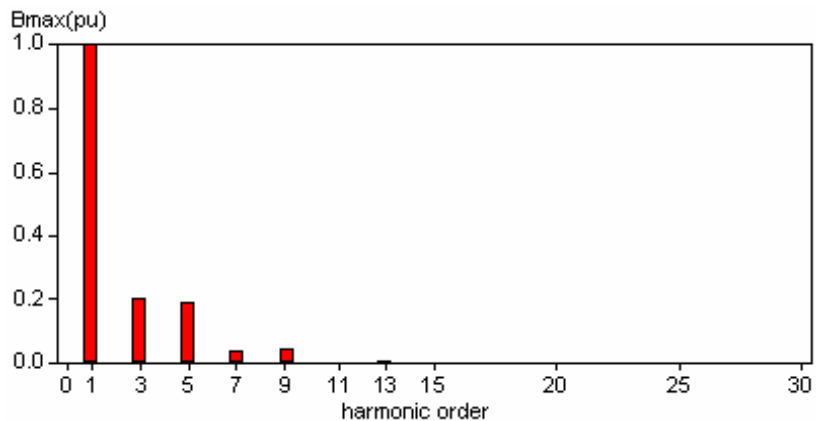
**Figura 3.7 – b)** Forma de onda da indução magnética presente na travessa 7 da Figura 3.11.

Portanto, devido à distorção a que é submetida a indução magnética nestas partes, não é fácil estabelecer uma função para este comportamento o que torna necessário o uso da decomposição de Fourier.

As Figuras 3.8a e 3.8b mostram os conteúdos harmônicos presentes para as formas de onda das Figuras 3.7a e 3.7b, respectivamente.



**Figura 3.8 – a)** Conteúdo Harmônico presente na forma de onda da Figura 3.7a.



**Figura 3.8 – b)** Conteúdo Harmônico presente nas formas de onda da Figura 3.7b.

Assim, a função da indução magnética quando decomposta em série de Fourier, torna-se [10]:

$$B(t) = \sum_h B_h \text{sen}(2h\pi ft + \varphi_h) \quad (3.25)$$

Quando se deriva em relação ao tempo, tem-se:



$$\frac{\partial B}{\partial t} = \sum_h 2h\pi f B_h \cos(2h\pi f t + \varphi_h) \quad (3.26), \text{ e}$$

$$\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^2 = \sum_h (2h\pi f B_h)^2 \cos^2(2h\pi f t + \varphi_h) \quad (3.27)$$

Considerando que o valor médio da expressão  $\cos^2(2h\pi f t + \varphi_k) = \frac{1}{2}$  durante um determinado período de tempo, e substituindo a Equação 3.27 na Equação 2.26, temos:

$$P_f = \sigma \sum_h (2h\pi f B_h)^2 \frac{d^2}{12} \frac{1}{2} \quad (3.28)$$

$$P_f = \frac{\sigma d^2 \pi^2 f^2}{6} \sum_h h^2 B_h^2 \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (3.29)$$

Esta é a expressão final para as perdas por correntes de Foucault nas partes de fechamento do circuito magnético.

Uma conclusão interessante sobre o comportamento destas perdas em todo o reator saturado, deu-se quando foi mudada a seqüência de saturação experimentada pelos núcleos.

Esta situação é alcançada quando se invertem as conexões dos núcleos que possuem dois enrolamentos primários, de forma que as  $\mathfrak{I}mm's$  agora, surjam em outros núcleos, mas sempre na mesma seqüência no diagrama fasorial.

Em tal situação, as formas de onda da indução magnética nos núcleos continuaram as mesmas, o que era previsto. Porém, nas partes de fechamento de circuito houve também a permutação das formas de onda da indução da travessa adjacente aos núcleos envolvidos para esta situação. Já os retornos, independentemente das permutações feitas, sempre apresentaram as mesmas formas de onda de indução magnética.

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, a forma como foi feito todo o estudo deste trabalho e, uma forma de mudança das posições dos núcleos.

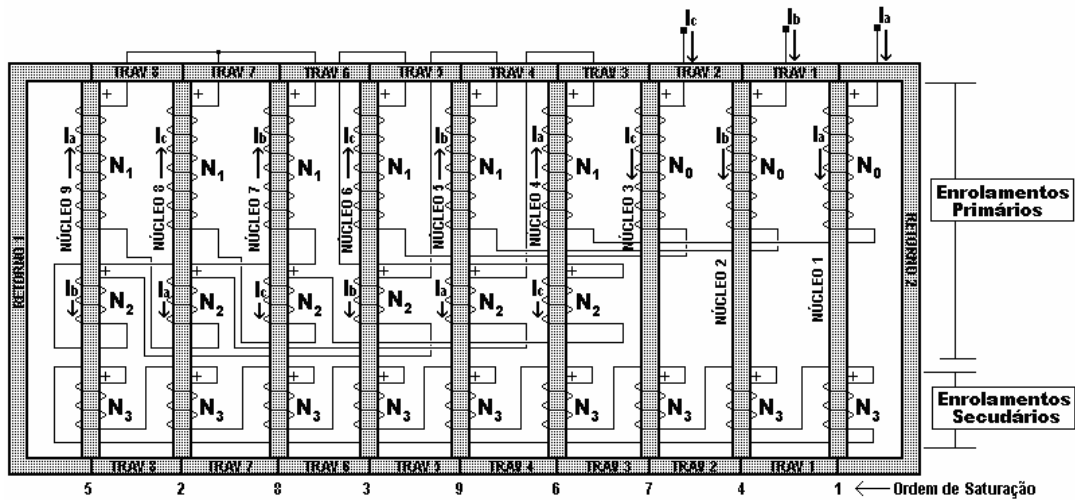


Figura 3.9 – Esquema de ligação ensaiado no protótipo PS2.

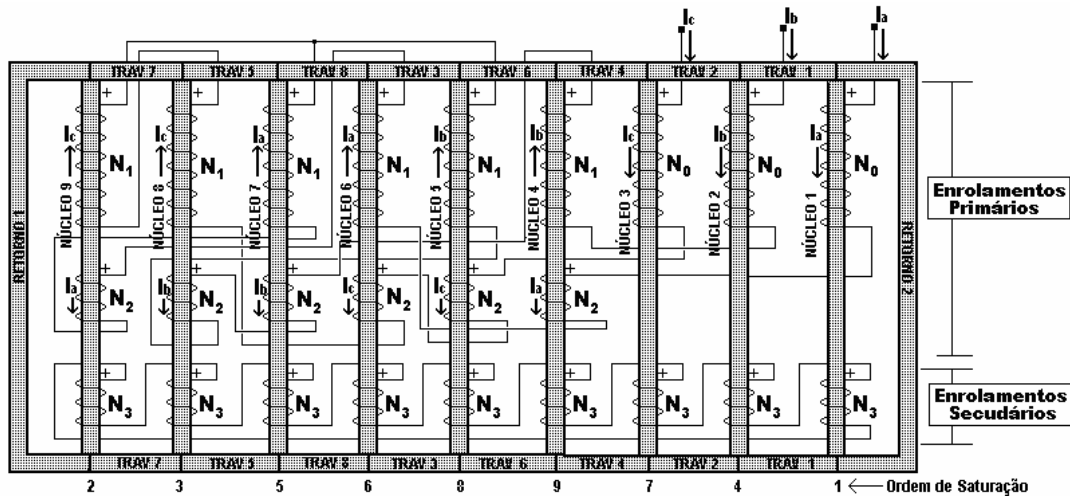


Figura 3.10 – Mudança de esquema de ligação ensaiado para o protótipo PS2.

Para melhor compreensão da informação acima, considere-se que as numerações das travessas encontradas na Figura 3.9 serão em relação ao comportamento da indução magnética nestas partes, de forma que essas numerações mudarão de posição na Figura 3.10 conforme foi descrito.

Nesta mudança de esquema, observa-se que, por exemplo, o segundo núcleo a entrar na saturação na Figura 3.9 é o núcleo 8 e a sua travessa adjacente é a travessa 7. Quando é feita a mudança de esquema de ligação para o que está representado na Figura 3.10, o mesmo

segundo núcleo a entrar na saturação é o núcleo 9 e sua travessa adjacente continua sendo a travessa 7.

Portanto, para qualquer mudança da ordem de saturação na estrutura, as travessas adjacentes continuarão sempre com o mesmo comportamento, significando que seja qual for o segundo núcleo a ser saturado, uma de suas travessas adjacentes sempre será a travessa 7.

As travessas e retornos em cada um dos protótipos PS1, PP1 e PP2 foram dimensionados sob a teoria de que era necessária uma secção transversal com o dobro da secção transversal dos núcleos para que estas peças sempre ficassem na região isenta de saturação.

Já para o protótipo PS2, suas travessas e retornos foram dimensionados sob a hipótese de que mesmo com a secção transversal igual à presente nos seus núcleos, ainda assim, estas partes continuariam na região isenta de saturação.

Para verificar esta condição, é necessário observar os valores máximos instantâneos de indução magnética nestas partes e compará-los com a curva da Figura 3.13, fornecida pelo fabricante. Estes valores estão expressos na Tabela 3.9.

As Figuras 3.11 e 3.12 têm a finalidade de permitir a identificação das travessas e retornos.

Vale lembrar que, as travessas de mesmo nome em uma mesma estrutura, têm o mesmo comportamento, com relação à indução magnética e perdas, e por isso recebem a mesma identificação.

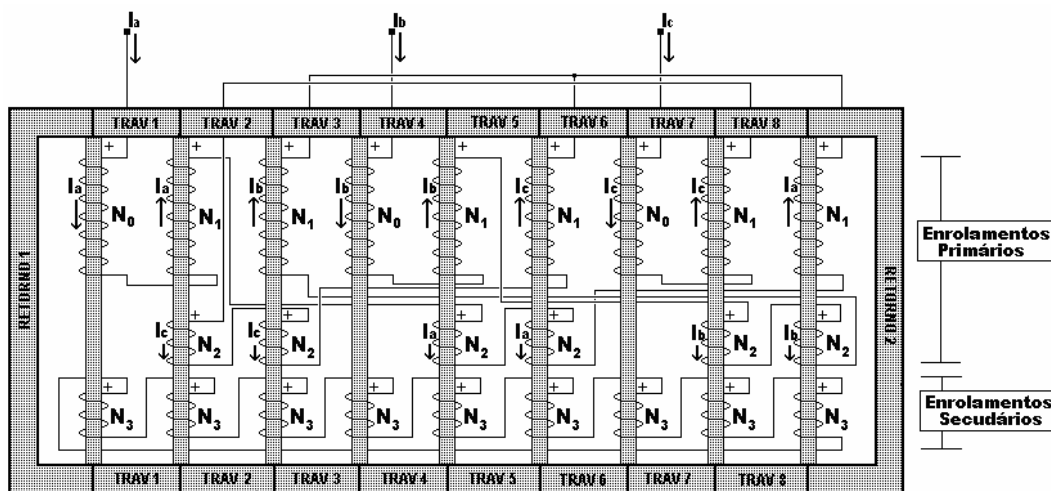


Figura 3.11 – Denominação das travessas e retornos do protótipo PS1.

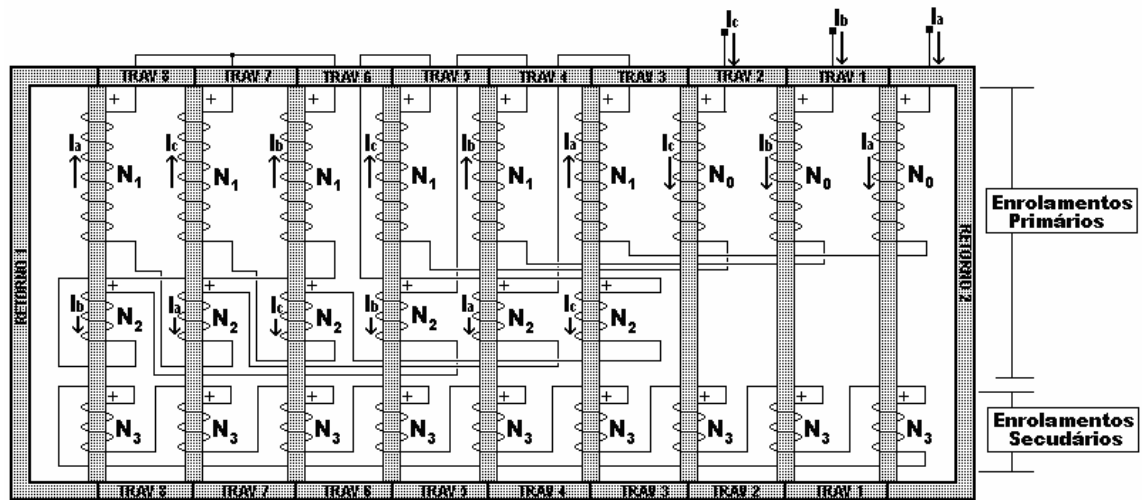


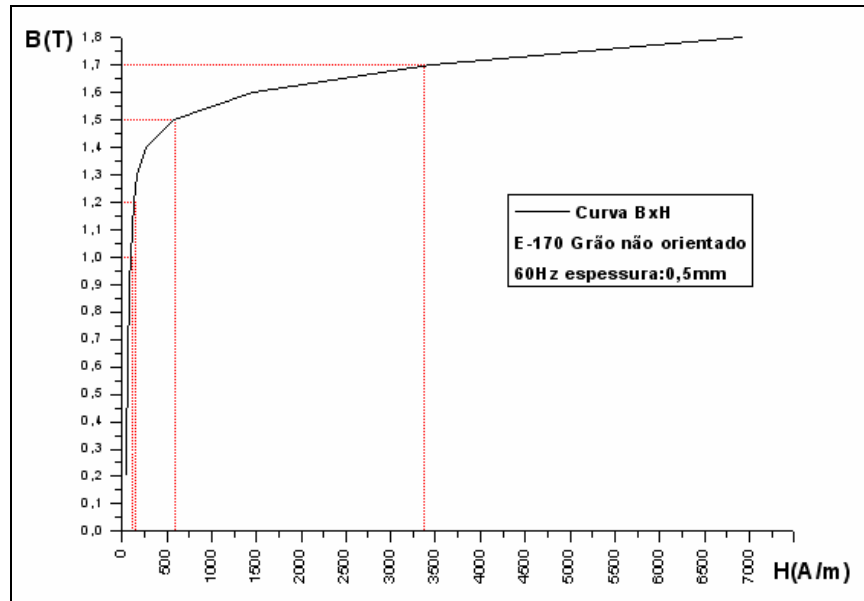
Figura 3.12 – Denominação das travessas e retornos do protótipo PS2.

A Tabela 3.9 mostra os valores máximos de indução magnética encontrada em cada uma das partes de fechamento de circuito magnético para cada um dos protótipos série.

Tabela 3.9 - Valores máximos de indução magnética instantânea presentes nas travessas e retornos dos protótipos PS1 e PS2, bem como seus erros absolutos.

Protótipo PS1	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B_{\text{máx}}(\text{T})$	Protótipo PS2	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B_{\text{máx}}(\text{T})$
Travessa 1	1,0	0,2	Travessa 1	1,3	0,2
Travessa 2	0,9	0,1	Travessa 2	1,3	0,2
Travessa 3	0,55	0,09	Travessa 3	1,1	0,2
Travessa 4	1,0	0,2	Travessa 4	1,4	0,2
Travessa 5	0,9	0,1	Travessa 5	1,4	0,2
Travessa 6	0,8	0,1	Travessa 6	0,7	0,1
Travessa 7	0,8	0,1	Travessa 7	1,5	0,2
Travessa 8	1,0	0,2	Travessa 8	1,3	0,2
Retorno 1	0,8	0,1	Retorno 1	1,0	0,2
Retorno 2	0,8	0,1	Retorno 2	0,9	0,1

Estes valores deverão ser verificados, conforme descrito, na Figura 3.13:



**Figura 3.13** - Curva BxH para o material presente nas estruturas ferromagnéticas dos protótipos, fornecida pelo fabricante.

Ao analisar o protótipo PS1, verifica-se que o maior valor encontrado nessas partes é de 1,0T, nas travessas 1, 4 e 8 e, considerando o erro de medição, esse valor poderá chegar a 1,2T, o que garante a não saturação nestas partes, de acordo com a curva.

No caso do protótipo PS2, o mesmo não acontece, pois o maior valor encontrado foi de 1,5T, na travessa 7, o qual se encontra no joelho da curva BxH, estando no limiar da região de não saturação. Ao se considerar o erro de medição, o seu valor poderá chegar a 1,7T, o que está totalmente na saturação.

Portanto, uma conclusão poderá ser obtida desta comparação: não haverá partes isentas de saturação em qualquer instante, quando se considera a secção transversal das travessas e retornos igual à secção transversal dos núcleos.

Estudos mais aprofundados poderiam levar a determinação de uma área de secção transversal otimizada nestas partes, a fim de garantir operação na região isenta de saturação, além de necessitar menos material ferromagnético.

Nas travessas e retornos, as perdas por correntes de Foucault, em watts, são calculadas pela Equação 2.20, levando em consideração o volume de cada parte, tendo esta, a necessidade da derivada da função da indução, a qual deverá ser obtida por decomposição harmônica.

Assim, as Tabelas de 3.10 a 3.13 trazem os valores das perdas por correntes de Foucault, em watts, para tal situação.

**Tabela 3.10** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo *PS1*, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Travessa 1		Travessa 2		Travessa 3		Travessa 4	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,52	0,03	0,07	0,02	0,06	0,02	0,036	0,01	0,08	0,03
L2	1,03	0,06	0,09	0,03	0,07	0,02	0,05	0,02	0,09	0,03
L3	1,58	0,09	0,10	0,03	0,08	0,02	0,05	0,02	0,10	0,03
L4	2,1	0,1	0,10	0,03	0,08	0,03	0,06	0,02	0,10	0,03
L5	2,5	0,2	0,11	0,03	0,08	0,03	0,06	0,02	0,11	0,03
L6	2,7	0,2	0,11	0,03	0,08	0,03	0,07	0,02	0,11	0,04
L7	3,2	0,2	0,11	0,04	0,09	0,03	0,07	0,02	0,11	0,04
L8	3,7	0,2	0,11	0,04	0,09	0,03	0,07	0,02	0,11	0,04
L9	4,2	0,3	0,12	0,04	0,09	0,03	0,07	0,02	0,12	0,04
L10	4,8	0,3	0,12	0,04	0,09	0,03	0,08	0,02	0,12	0,04

Leitura	Travessa 5		Travessa 6		Travessa 7		Travessa 8	
	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,07	0,02	0,06	0,02	0,04	0,01	0,07	0,02
L2	0,09	0,03	0,08	0,02	0,05	0,02	0,08	0,02
L3	0,10	0,03	0,09	0,03	0,06	0,02	0,08	0,03
L4	0,10	0,03	0,09	0,03	0,07	0,02	0,08	0,03
L5	0,11	0,03	0,10	0,03	0,07	0,02	0,09	0,03
L6	0,11	0,04	0,10	0,03	0,07	0,02	0,09	0,03
L7	0,11	0,04	0,10	0,03	0,08	0,03	0,09	0,03
L8	0,12	0,04	0,10	0,03	0,08	0,03	0,09	0,03
L9	0,12	0,04	0,11	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03
L10	0,12	0,04	0,11	0,04	0,09	0,03	0,10	0,03

**Tabela 3.11** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Retorno 1		Retorno 2	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,52	0,03	0,16	0,05	0,16	0,05
L2	1,03	0,06	0,20	0,06	0,21	0,07
L3	1,58	0,09	0,22	0,07	0,24	0,08
L4	2,1	0,1	0,23	0,08	0,27	0,09
L5	2,5	0,2	0,25	0,08	0,28	0,09
L6	2,7	0,2	0,25	0,08	0,28	0,09
L7	3,2	0,2	0,26	0,08	0,3	0,1
L8	3,7	0,2	0,27	0,09	0,3	0,1
L9	4,2	0,3	0,28	0,09	0,3	0,1
L10	4,8	0,3	0,28	0,09	0,3	0,1

**Tabela 3.12** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Travessa 1		Travessa 2		Travessa 3		Travessa 4	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,54	0,03	0,04	0,01	0,05	0,02	0,10	0,03	0,05	0,02
L2	1,05	0,06	0,05	0,01	0,06	0,02	0,13	0,04	0,07	0,02
L3	1,56	0,09	0,05	0,02	0,07	0,02	0,14	0,05	0,07	0,02
L4	2,1	0,1	0,05	0,02	0,07	0,02	0,15	0,05	0,08	0,03
L5	2,5	0,2	0,05	0,02	0,07	0,02	0,15	0,05	0,08	0,03
L6	2,7	0,2	0,05	0,02	0,07	0,02	0,16	0,05	0,08	0,03
L7	3,2	0,2	0,06	0,02	0,08	0,02	0,16	0,05	0,08	0,03
L8	3,7	0,2	0,06	0,02	0,08	0,03	0,16	0,05	0,09	0,03
L9	4,2	0,3	0,06	0,02	0,08	0,03	0,17	0,05	0,09	0,03
L10	4,8	0,3	0,06	0,02	0,08	0,03	0,17	0,05	0,09	0,03

Leitura	Travessa 5		Travessa 6		Travessa 7		Travessa 8	
	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,05	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02
L2	0,06	0,02	0,07	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02
L3	0,07	0,02	0,08	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02
L4	0,07	0,02	0,08	0,03	0,07	0,02	0,07	0,02
L5	0,07	0,02	0,08	0,03	0,07	0,02	0,07	0,02
L6	0,07	0,02	0,08	0,03	0,07	0,02	0,07	0,02
L7	0,07	0,02	0,08	0,03	0,08	0,02	0,07	0,02
L8	0,08	0,02	0,08	0,03	0,08	0,02	0,08	0,03
L9	0,08	0,03	0,09	0,03	0,08	0,03	0,08	0,03
L10	0,08	0,03	0,09	0,03	0,08	0,03	0,08	0,03

**Tabela 3.13** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Retorno 1		Retorno 2	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,54	0,03	0,22	0,07	0,22	0,07
L2	1,05	0,06	0,29	0,09	0,3	0,1
L3	1,56	0,09	0,3	0,1	0,4	0,1
L4	2,1	0,1	0,3	0,1	0,4	0,1
L5	2,5	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1
L6	2,7	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1
L7	3,2	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1
L8	3,7	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1
L9	4,2	0,3	0,4	0,1	0,4	0,1
L10	4,8	0,3	0,4	0,1	0,5	0,1

As perdas totais por correntes de Foucault geradas nas partes de fechamento de circuito magnético, ou seja, travessas e retornos, são obtidas através da soma aritmética das perdas individuais de cada uma das partes para cada um dos protótipos.

As Tabelas 3.14 e 3.15 mostram os valores calculados, em watts, das perdas totais e do seu erro absoluto,  $P_{\text{fouc}}(\text{W})$  e  $\Delta P_{\text{fouc}}(\text{W})$ , nestas partes ao longo das dez leituras de corrente que foram ensaiados os protótipos.

**Tabela 3.14** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PS1, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perdas Totais nas Travessas e Retornos	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,52	0,03	0,8	0,3
L2	1,03	0,06	1,0	0,3
L3	1,58	0,09	1,1	0,4
L4	2,1	0,1	1,2	0,4
L5	2,5	0,2	1,2	0,4
L6	2,7	0,2	1,3	0,4
L7	3,2	0,2	1,3	0,4
L8	3,7	0,2	1,4	0,4
L9	4,2	0,3	1,4	0,5
L10	4,8	0,3	1,4	0,5



**Tabela 3.15** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PS2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perdas Totais nas Travessas e Retornos	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,54	0,03	0,9	0,3
L2	1,05	0,06	1,2	0,4
L3	1,56	0,09	1,3	0,4
L4	2,1	0,1	1,4	0,4
L5	2,5	0,2	1,4	0,5
L6	2,7	0,2	1,4	0,5
L7	3,2	0,2	1,4	0,5
L8	3,7	0,2	1,5	0,5
L9	4,2	0,3	1,6	0,5
L10	4,8	0,3	1,6	0,5

Desta forma, para toda a estrutura ferromagnética dos protótipos, as perdas totais provocadas pelo efeito das correntes de Foucault são dadas pela soma entre as perdas nos núcleos, travessas e retornos.

As Tabelas 3.16 e 3.17 mostram os valores finais destas perdas em cada protótipo.

**Tabela 3.16** - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PS1, bem como o seu erro absoluto.

Leitura	Corrente		Perdas totais nos núcleos		Perdas totais nas travessas e retornos		Perdas totais na estrutura	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,52	0,03	10	3	0,8	0,3	11	4
L2	1,03	0,06	12	4	1	0,3	13	4
L3	1,58	0,09	13	4	1,1	0,4	14	5
L4	2,1	0,1	14	4	1,2	0,4	15	5
L5	2,5	0,2	14	5	1,2	0,4	16	5
L6	2,7	0,2	15	5	1,3	0,4	16	5
L7	3,2	0,2	15	5	1,3	0,4	16	5
L8	3,7	0,2	15	5	1,4	0,4	17	5
L9	4,2	0,3	16	5	1,4	0,5	17	6
L10	4,8	0,3	16	5	1,4	0,5	18	6

**Tabela 3.17** - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PS2, bem como o seu erro absoluto.

Leitura	Corrente		Perdas totais nos núcleos		Perdas totais nas travessas e retornos		Perdas totais na estrutura	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,54	0,03	9	3	0,9	0,3	10	3
L2	1,05	0,06	11	4	1,2	0,4	12	4
L3	1,56	0,09	12	4	1,3	0,4	13	4
L4	2,1	0,1	13	4	1,4	0,4	14	5
L5	2,5	0,2	14	4	1,4	0,5	15	5
L6	2,7	0,2	14	4	1,4	0,5	15	5
L7	3,2	0,2	14	5	1,4	0,5	16	5
L8	3,7	0,2	15	5	1,5	0,5	16	5
L9	4,2	0,3	15	5	1,6	0,5	17	5
L10	4,8	0,3	16	5	1,6	0,5	17	6

Portanto, mesmo utilizando menos material ferromagnético, as perdas por correntes de Foucault calculadas são praticamente as mesmas. O protótipo PS1 precisou de aproximadamente  $4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  de material ferromagnético enquanto que o protótipo PS2 precisou de  $3,53 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , cerca de 30% a menos.

O que vai definir qual o mais adequado será aquele que operará com as travessas e retornos livres de saturação para que possa garantir a independência magnética entre os núcleos.

Diante dos resultados, o protótipo PS1 tem um desempenho com os núcleos independentes magneticamente, levando assim, vantagem sobre o protótipo PS2 que, conforme foi descrito anteriormente, não garante a independência magnética de seus núcleos.

### 3.3 Perdas por ciclo de histerese

Para qualquer material magnético, pode-se caracterizar uma curva, a qual será chamada de curva de referência. Esta curva relaciona os estados da indução magnética do material quando um campo magnético é aplicado, na situação que não exista defasagem angular entre as curvas o que, em outras palavras, significa dizer que nenhuma força será exigida por parte do campo magnético aplicado ao material para desmagnetizá-lo, isto é, que define um material mole [11].

O laço de histerese está diretamente relacionado com a largura da curva  $B \times H$  e o mesmo somente irá existir se, existir uma defasagem angular entre as curvas em relação ao tempo. Portanto, uma curva característica é mostrada na Figura 3.14:

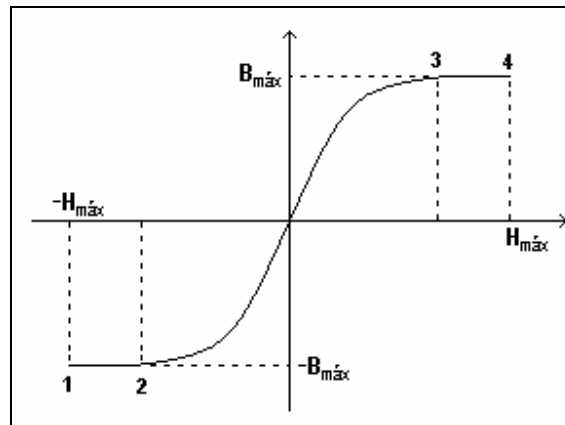


Figura 3.14 - Curva característica de um material ferromagnético.

Para o caso dos reatores saturados com ligação em série, onde a onda da indução magnética é trapezoidal, o intervalo entre o ponto 2 e o ponto 3 é o intervalo onde há uma variação da indução magnética quando o material é submetido a um campo magnético variável no tempo.

Já os intervalos entre os pontos 1 e 2 e os pontos 3 e 4, representam o intervalo de saturação, em que, independentemente do campo magnético aplicado, a indução terá sempre o mesmo valor. Assim, pode-se analisar a situação quando há uma defasagem angular entre as curvas destas grandezas.

Na Figura 3.15 é considerada uma situação simétrica da curva e pode-se verificar que a parte ascendente da curva tem o mesmo comportamento da curva de referência sendo apenas deslocada para uma nova origem.

Da mesma forma, no trecho descendente, haverá um deslocamento angular o qual fará com que seja exigida por parte do campo aplicado, uma força capaz de levar o material a situação desmagnetizada dando origem as áreas  $A_1$  e  $A_2$ .

Como no caso dos reatores saturados não foi possível estabelecer um caminho equivalente por onde circularia o campo magnético aplicado ao material, pode-se levantar a curva entre a  $\mathfrak{I}mm$  e a indução magnética.

Com esta curva é possível verificar a defasagem angular entre as curvas do campo e da indução magnética. Isto é possível porque a única grandeza que relaciona o campo magnético e a  $\mathfrak{I}mm$  é exatamente o caminho equivalente o que, como é constante só afetará nos valores e não na defasagem.

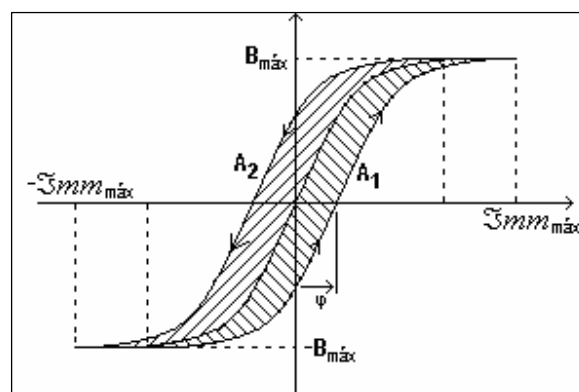


Figura 3.15 - Curva característica de um material ferromagnético.

Como a área do ciclo de histerese é representada pela parte onde há variação de ambas as grandezas, ou seja, durante a região de não saturação, a relutância equivalente neste intervalo é praticamente constante.

Quando o campo magnético aplicado é capaz de estabelecer a saturação, qualquer valor do campo além deste fará com que a relutância equivalente tenha um comportamento não-linear. Assim, a região de saturação é a parte do processo de magnetização em que praticamente só existe alinhamento dos domínios magnéticos e a energia gasta para isso é reversível [7].

Então, durante este intervalo, não há contribuição relevante para a energia gasta no fenômeno de histerese. A potência aqui denominada de potência de magnetização é constituída de uma parcela equivalente ao fenômeno de histerese e outra quando o material está na saturação.

Desta forma, é possível verificar que, para uma situação hipotética que não varie o  $B_{máx}$  e nem o número de núcleos, quanto maior a defasagem angular  $\varphi$ , mais energia será gasta no fenômeno de histerese.

Para os protótipos PS1 e PS2, ao levantar a curva  $B \times \Im mm$  de cada núcleo, observou-se que há defasagem angular  $\varphi$  diferente entre os núcleos. Isso quer dizer que quando é levado em consideração que as  $\Im mm's$  criadas em cada núcleo são definidas como nas equações em 2.1 para o protótipo PS1, ou 2.4 para o protótipo PS2, e que estas produzam apenas o fluxo magnético enlaçado pelas bobinas de prova, o material impõe forças diferentes do campo magnético para que o mesmo leve o material à situação de desmagnetização.

Esta diferença pode estar ligada ao pequeno desequilíbrio encontrado entre as tensões de alimentação, à forma com que os núcleos estão distribuídos na estrutura e pela forma de ligação ensaiada.

Conforme foi visto anteriormente, através do circuito magnético de cada protótipo, é possível obter uma expressão que indique a potência de magnetização fornecida por cada uma das fontes de fluxo magnético.

Para o cálculo efetivo do ciclo de histerese, é necessário que se conheça o caminho percorrido por um determinado campo magnético aplicado ao material. No entanto, é uma tarefa difícil, pois a estrutura será submetida a duas situações de operação, a de saturação e de não saturação além de existir a possibilidade de acoplamento magnético entre os núcleos, o que possibilita a passagem de linhas de campo criado por um núcleo em outro núcleo, impossibilitando a sua determinação.

A forma encontrada foi calcular a perda de magnetização total, que inclui as perdas por histerese como perdas por outra fonte geradora.

A Equação 2.43 dá a potência total, por núcleo, que foi obtida através da decomposição harmônica da forma de onda desta potência. Esta forma de onda foi obtida de modo muito simples, bastando apenas multiplicar os valores instantâneos de  $\Im mm$  com os valores instantâneos do fluxo magnético.

O fluxo magnético utilizado nesta equação é mesmo encontrado nos núcleos e é considerada a hipótese de que esse fluxo magnético é todo o fluxo magnético produzido pela  $\Im mm$  em um determinado núcleo, desprezando assim o fluxo de dispersão.

As Tabelas 3.18 a 3.21, mostram os valores de potência de magnetização produzida por cada uma das  $\Im mm$ 's dos núcleos quando se utiliza a Equação 2.43.

**Tabela 3.18** - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PSI.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,52	0,03	0,07	0,01	0,06	0,01	0,07	0,01	0,07	0,01
L2	1,03	0,06	0,15	0,03	0,13	0,03	0,13	0,03	0,14	0,03
L3	1,58	0,09	0,23	0,05	0,21	0,04	0,21	0,04	0,22	0,05
L4	2,1	0,1	0,32	0,07	0,29	0,06	0,28	0,06	0,29	0,06
L5	2,5	0,2	0,38	0,08	0,34	0,07	0,34	0,07	0,35	0,07
L6	2,7	0,2	0,42	0,09	0,39	0,08	0,38	0,08	0,38	0,08
L7	3,2	0,2	0,5	0,1	0,45	0,09	0,5	0,1	0,5	0,1
L8	3,7	0,2	0,6	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1
L9	4,2	0,3	0,7	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1
L10	4,8	0,3	0,8	0,2	0,7	0,1	0,7	0,2	0,7	0,2
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,06	0,01	0,06	0,01	0,07	0,01	0,06	0,01	0,07	0,01
L2	0,14	0,03	0,13	0,03	0,14	0,03	0,13	0,03	0,14	0,03
L3	0,22	0,05	0,22	0,05	0,22	0,05	0,20	0,04	0,23	0,05
L4	0,30	0,06	0,29	0,06	0,30	0,06	0,28	0,06	0,32	0,07
L5	0,37	0,08	0,36	0,08	0,37	0,08	0,34	0,07	0,39	0,08
L6	0,40	0,08	0,40	0,08	0,40	0,08	0,38	0,08	0,43	0,09
L7	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,44	0,09	0,5	0,1
L8	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,5	0,1	0,6	0,1
L9	0,7	0,1	0,6	0,1	0,7	0,1	0,6	0,1	0,7	0,1
L10	0,7	0,2	0,7	0,2	0,8	0,2	0,7	0,1	0,8	0,2

**Tabela 3.19** - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PS2.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,54	0,03	0,07	0,01	0,06	0,01	0,09	0,02	0,05	0,01
L2	1,05	0,06	0,14	0,03	0,13	0,03	0,21	0,04	0,13	0,03
L3	1,56	0,09	0,21	0,05	0,20	0,04	0,32	0,07	0,20	0,04
L4	2,1	0,1	0,30	0,06	0,28	0,06	0,44	0,09	0,28	0,06
L5	2,5	0,2	0,37	0,08	0,34	0,07	0,5	0,1	0,35	0,07
L6	2,7	0,2	0,40	0,08	0,38	0,08	0,6	0,1	0,39	0,08
L7	3,2	0,2	0,5	0,1	0,45	0,09	0,7	0,2	0,5	0,1
L8	3,7	0,2	0,6	0,1	0,5	0,1	0,9	0,2	0,5	0,1
L9	4,2	0,3	0,7	0,1	0,6	0,1	1,0	0,2	0,6	0,1
L10	4,8	0,3	0,8	0,2	0,7	0,1	1,2	0,2	0,7	0,2

Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,05	0,01	0,06	0,01	0,06	0,01	0,06	0,01	0,06	0,01
L2	0,11	0,02	0,12	0,03	0,12	0,03	0,12	0,03	0,12	0,03
L3	0,18	0,04	0,20	0,04	0,20	0,04	0,19	0,04	0,19	0,04
L4	0,26	0,05	0,27	0,06	0,27	0,06	0,27	0,06	0,27	0,06
L5	0,32	0,07	0,33	0,07	0,33	0,07	0,34	0,07	0,33	0,07
L6	0,36	0,08	0,35	0,07	0,35	0,07	0,37	0,08	0,36	0,08
L7	0,42	0,09	0,44	0,09	0,43	0,09	0,43	0,09	0,43	0,09
L8	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1
L9	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1
L10	0,7	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1

**Tabela 3.20** - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PS1, bem como seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perda de magnetização média por núcleo		Perda de magnetização total na estrutura	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P_{mag}(W)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P_{mag}(W)$
L1	0,52	0,03	0,07	0,01	0,6	0,1
L2	1,03	0,06	0,14	0,03	1,2	0,3
L3	1,58	0,09	0,22	0,05	2,0	0,4
L4	2,1	0,1	0,30	0,06	2,7	0,6
L5	2,5	0,2	0,36	0,08	3,2	0,7
L6	2,7	0,2	0,40	0,08	3,6	0,8
L7	3,2	0,2	0,5	0,1	4,2	0,9
L8	3,7	0,2	0,6	0,1	5	1
L9	4,2	0,3	0,6	0,1	6	1
L10	4,8	0,3	0,7	0,2	7	1

**Tabela 3.21** - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PS2, bem como seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perda de magnetização média por núcleo		Perda de magnetização total na estrutura	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P_{mag}(W)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P_{mag}(W)$
L1	0,54	0,03	0,06	0,01	0,6	0,1
L2	1,05	0,06	0,13	0,03	1,2	0,3
L3	1,56	0,09	0,21	0,04	1,9	0,4
L4	2,1	0,1	0,29	0,06	2,6	0,6
L5	2,5	0,2	0,36	0,07	3,3	0,7
L6	2,7	0,2	0,40	0,08	3,6	0,8
L7	3,2	0,2	0,5	0,1	4,3	0,9
L8	3,7	0,2	0,6	0,1	5	1
L9	4,2	0,3	0,7	0,1	6	1
L10	4,8	0,3	0,8	0,1	7	1

*Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural*

As duas parcelas descritas neste trabalho e estimadas através de suas equações são as parcelas de maior intensidade entre as que estão presentes em um material ferromagnético.

Uma terceira parcela pode ser estimada quando se conhecem grandezas precisas para isso. Estas perdas são identificadas como perdas causadas por um excesso de correntes induzidas no material devido ao fenômeno de deslocamento das paredes dos domínios magnéticos [13].

A forma prática de se calcular esta parcela sem a parametrização das grandezas envolvidas é realizada através da subtração das perdas totais em um material ferromagnético, das perdas clássicas mensuráveis (Foucault e Histerese), pois, a sua estimativa direta é extremamente complexa.

Uma forma teórica de obter esta parcela é mostrada na Equação 3.30 [7],[13],[14]:

$$W_e = \frac{\sqrt{\sigma G V_0 S}}{f m_v} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1.5} dt \text{ [J/Kg]} \quad (3.30)$$

Onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica,  $G$  é equivalente a um coeficiente de atrito dos domínios,  $V_0$  é o campo coercitivo,  $m_v$  é a densidade específica e  $S$  é a secção transversal magnética efetiva.

A determinação destes parâmetros é evitada ao máximo, pois exige alta tecnologia e conhecimentos adequados para medi-los e extrema precisão o que, nas instalações do laboratório onde foram ensaiados os protótipos não foi possível fazer [7].

Aqui, para o cálculo desta parcela, é realizado o mesmo principio e, deve-se considerar o erro absoluto em cada uma das estimativas. O cálculo das perdas por excesso, deverá considerar as margens de erro que cada uma das outras parcelas possuam, sendo obtida da seguinte forma:

$$P_{exc} = P_{fe} - P_{Fouc} - P_{mag} - \Delta P_{fe} - \Delta P_{Fouc} - \Delta P_{mag} \quad (3.31)$$

A parcela referente às perdas no ferro foi medida através do registrador RMS MARH-21. Este equipamento fez a aquisição dos valores de potência ativa solicitada pelos protótipos e a parcela de perdas no ferro é obtida quando se subtrai desta potência ativa, a parcela referente à potência dissipada nos enrolamentos.

As Tabelas 3.22 e 3.23 mostram todas as parcelas existentes nos materiais ferromagnéticos dos protótipos PS1 e PS2.



**Tabela 3.22** – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PS1.

Leitura	Corrente		Potência Total no ferro Medido		Perdas por Foucault total na estrutura		Potência de magnetização total na estrutura		Perda por excesso
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{tfe}(W)$	$\Delta P_{tfe}(W)$	$P_{fouc}(W)$	$\Delta P_{fouc}(W)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P_{mag}(W)$	
L1	0,52	0,03	19,0	0,2	11	4	0,6	0,1	3
L2	1,03	0,06	21,7	0,4	13	4	1,2	0,3	3
L3	1,58	0,09	22,9	0,8	14	5	2,0	0,4	1
L4	2,1	0,1	24	1	15	5	2,7	0,6	0
L5	2,5	0,2	24	2	16	5	3,2	0,7	0
L6	2,7	0,2	24	2	16	5	3,6	0,8	0
L7	3,2	0,2	25	2	16	5	4,2	0,9	0
L8	3,7	0,2	26	3	17	5	5	1	0
L9	4,2	0,3	27	4	17	6	6	1	0
L10	4,8	0,3	29	5	18	6	7	1	0

**Tabela 3.23** – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PS2.

Leitura	Corrente		Potência Total no ferro Medido		Perdas por Foucault total na estrutura		Potência de magnetização total na estrutura		Perda por excesso
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{tfe}(W)$	$\Delta P_{tfe}(W)$	$P_{fouc}(W)$	$\Delta P_{fouc}(W)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P_{mag}(W)$	
L1	0,54	0,03	17,6	0,2	10	3	0,5	0,1	4
L2	1,05	0,06	22,2	0,5	12	4	1,2	0,3	4
L3	1,56	0,09	24,4	0,8	13	4	1,9	0,4	4
L4	2,1	0,1	26	1	14	5	2,6	0,6	3
L5	2,5	0,2	26	2	15	5	3,3	0,7	0
L6	2,7	0,2	27	2	15	5	3,6	0,8	1
L7	3,2	0,2	28	2	16	5	4,3	0,9	0
L8	3,7	0,2	29	3	16	5	5	1	0
L9	4,2	0,3	30	4	17	5	6	1	0
L10	4,8	0,3	35	5	17	6	7	1	0

Os valores de perdas por excesso de correntes induzidas começam a ficar imprecisos a partir de certo valor de indução devido a propagação do erro fazendo com que, dentro da margem de erro, esta parcela de perda seja nula.

Este estudo mostra que as estimativas aqui descritas, mesmo com a imprecisão de obter as perdas por excesso, poderão ser utilizadas em projetos de estruturas ferromagnéticas para reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série.

As Figuras que seguem, são as curvas reais de indução magnética em todas as partes para cada um dos protótipos PS1 e PS2.

*Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural*

Quando o protótipo PS1 solicitava uma corrente de 4,2A, a forma de onda da indução magnética imposta a cada um dos núcleos, está representada nas Figuras de 3.17 a 3.21, seguindo a ordem numérica mostrada na Figura 3.16:

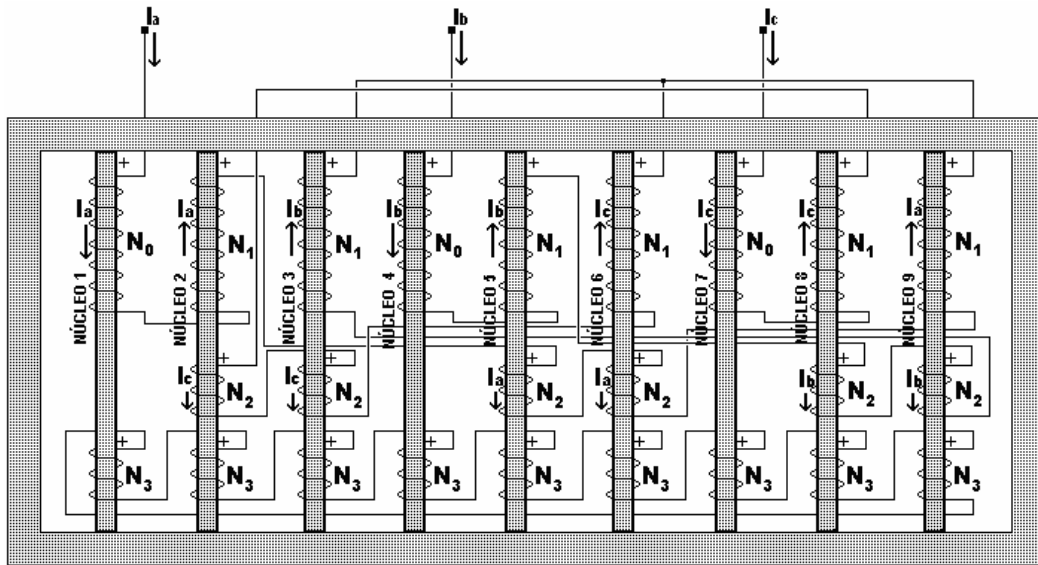


Figura 3.16 – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PS1.

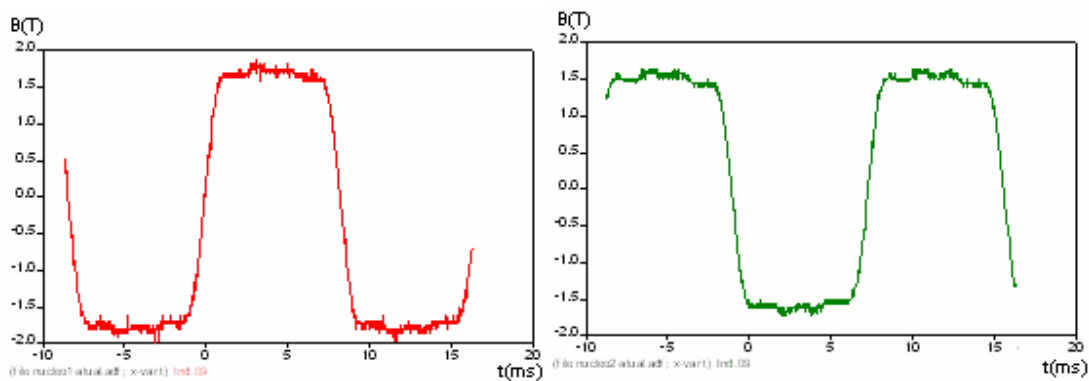


Figura 3.17 – a) Indução magnética no núcleo 1 e b) Indução magnética no núcleo 2.

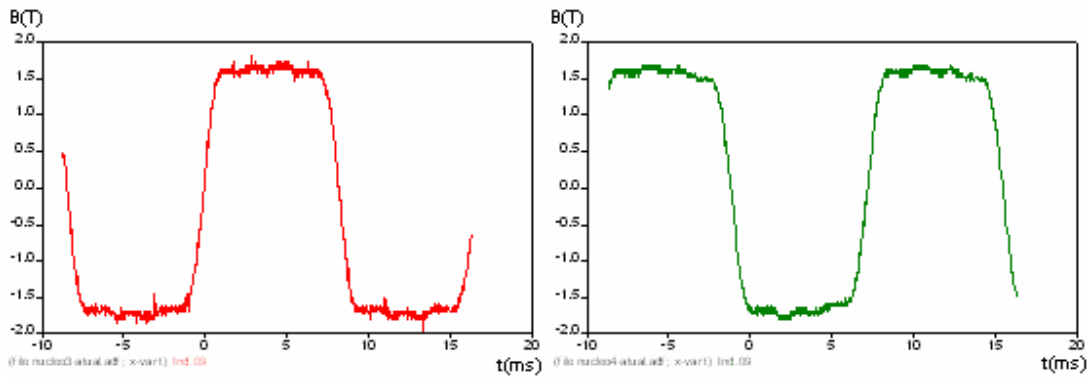


Figura 3.18 – a)Indução magnética no núcleo 3 e b)Indução magnética no núcleo 4.

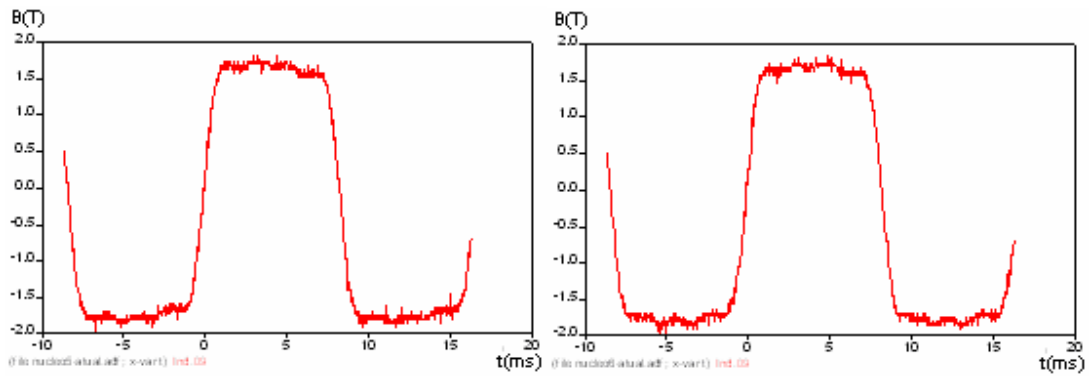


Figura 3.19 – a)Indução magnética no núcleo 5 e b)Indução magnética no núcleo 6.

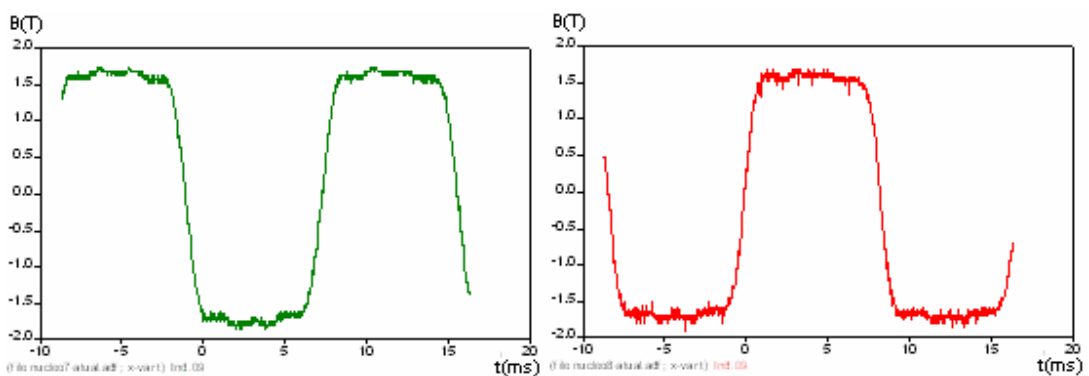


Figura 3.20 – a)Indução magnética no núcleo 7 e b)Indução magnética no núcleo 7.

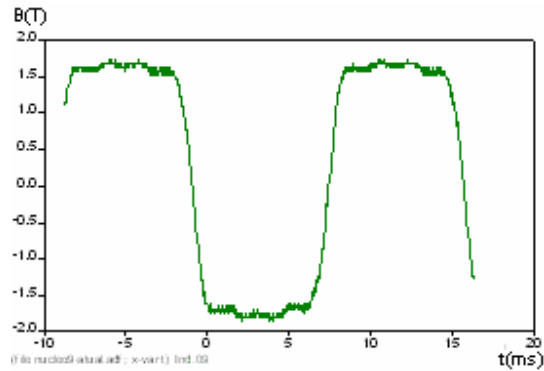


Figura 3.21 – Indução magnética no núcleo 9.

As Figuras 3.23 a 3.27 mostram os comportamentos das induções magnéticas presentes nas travessas e retornos do protótipo PS1, considerando a numeração imposta na Figura 3.22.

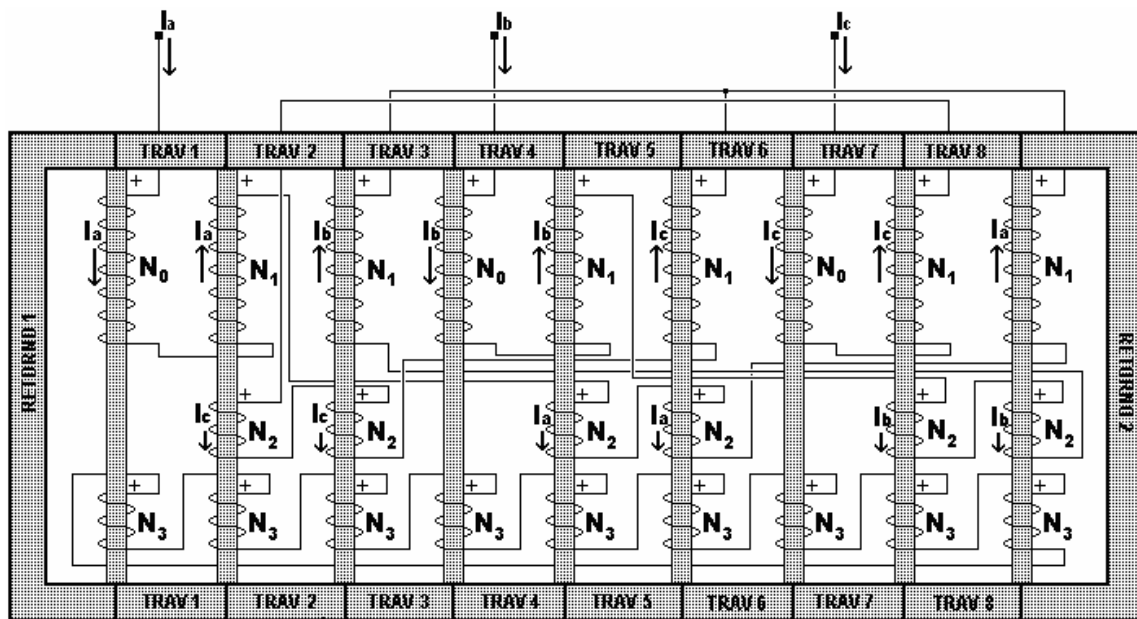


Figura 3.22 – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PS1.

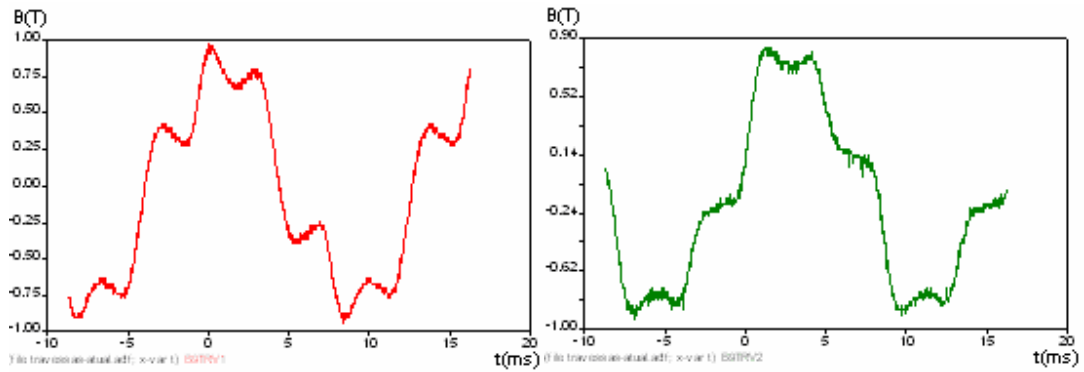


Figura 3.23 – a) Indução magnética na travessa 1 e b) Indução magnética na travessa 2.

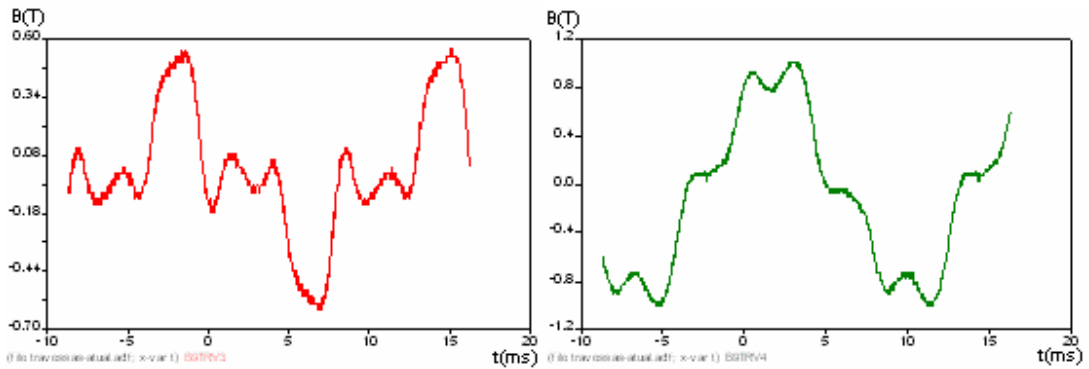


Figura 3.24 – a) Indução magnética na travessa 3 e b) Indução magnética na travessa 4.

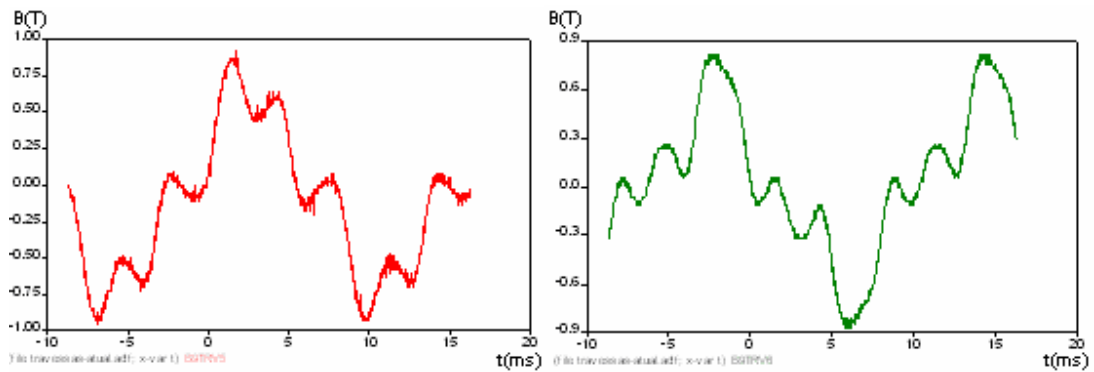


Figura 3.25 – a) Indução magnética na travessa 5 e b) Indução magnética na travessa 6.

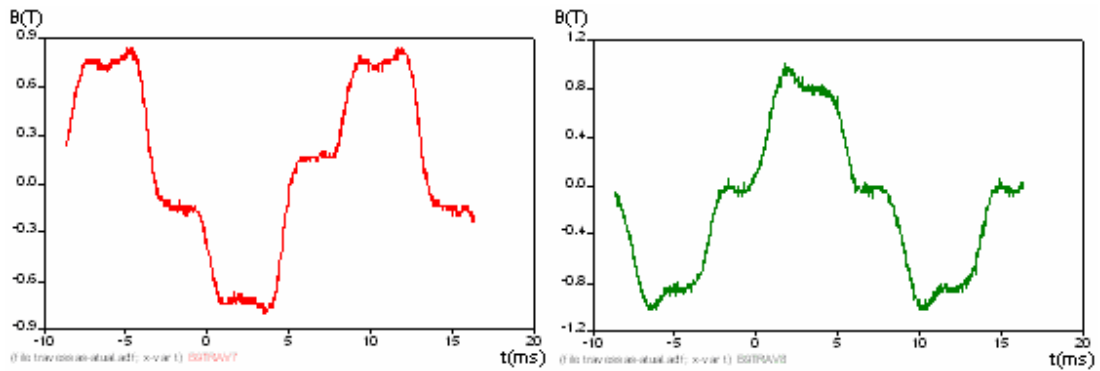


Figura 3.26 – a) Indução magnética na travessa 7 e b) Indução magnética na travessa 8.

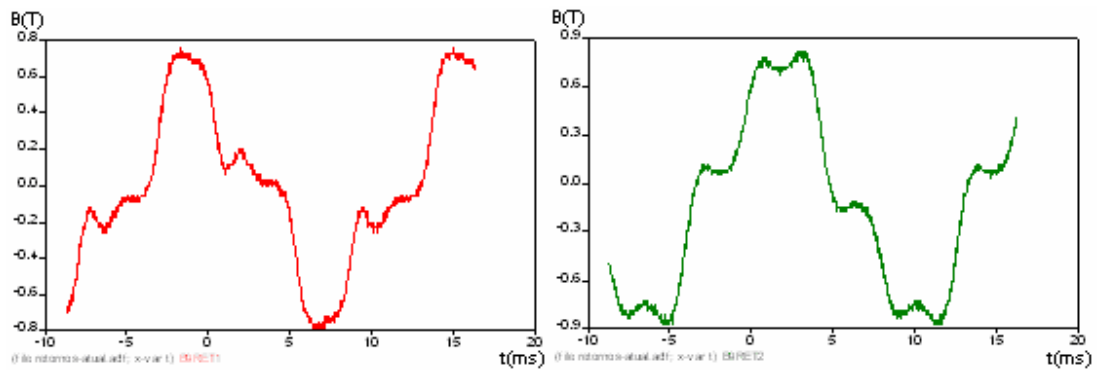


Figura 3.27 – a) Indução magnética no retorno 1 e b) Indução magnética no retorno 2.

Quando o protótipo PS2 solicitava também uma corrente de 4,2A, a forma de onda da indução magnética imposta a cada um dos núcleos, está representada nas Figuras de 3.29 a 3.33, seguindo a ordem numérica mostrada na Figura 3.28:

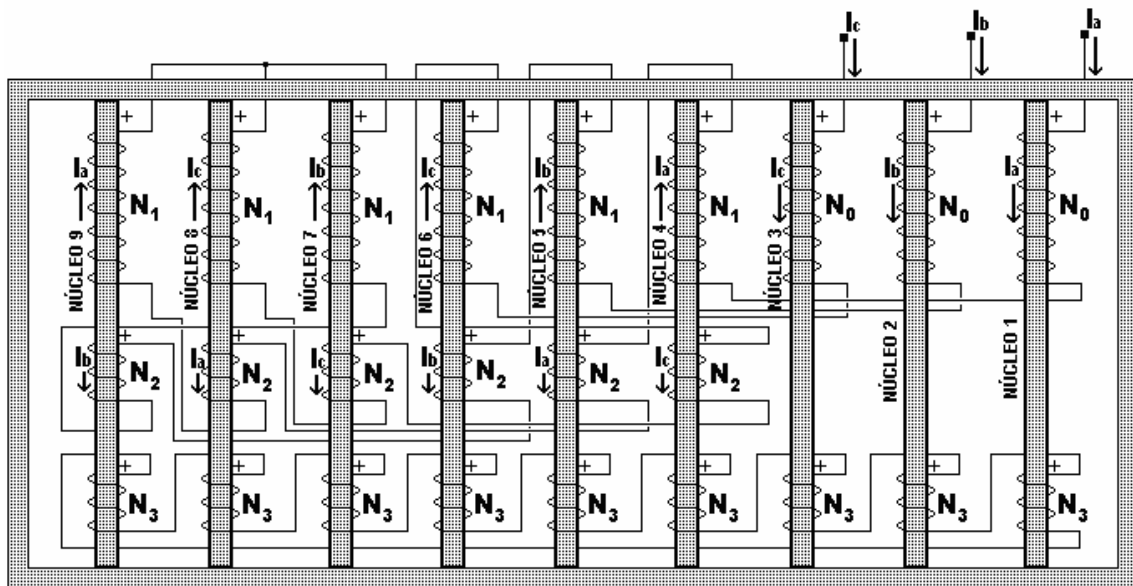


Figura 3.28 – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PS2.

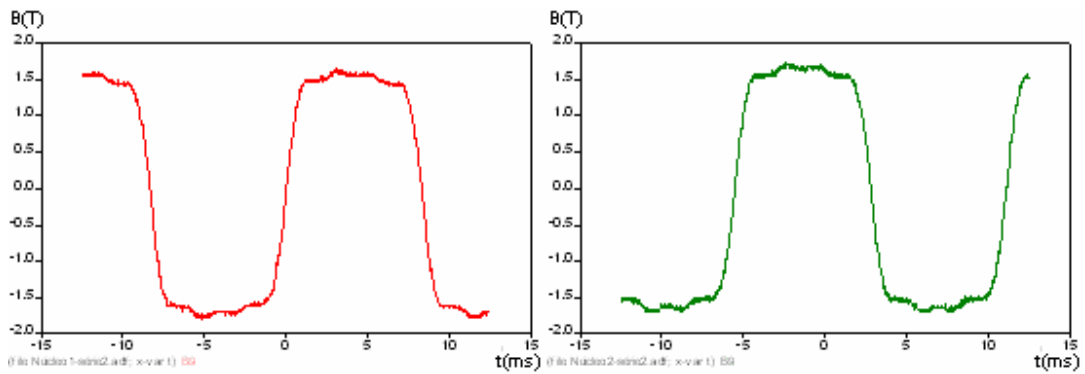


Figura 3.29 – a) Indução magnética no núcleo 1 e b) Indução magnética no núcleo 2.

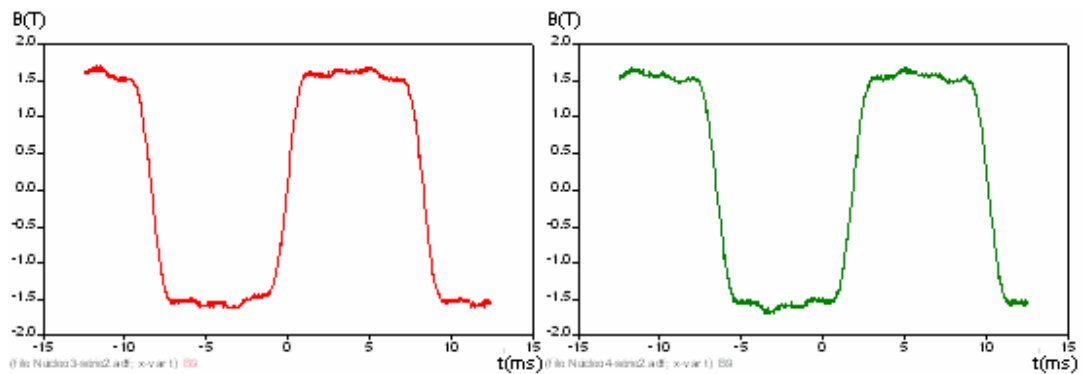


Figura 3.30 – a) Indução magnética no núcleo 3 e b) Indução magnética no núcleo 4.

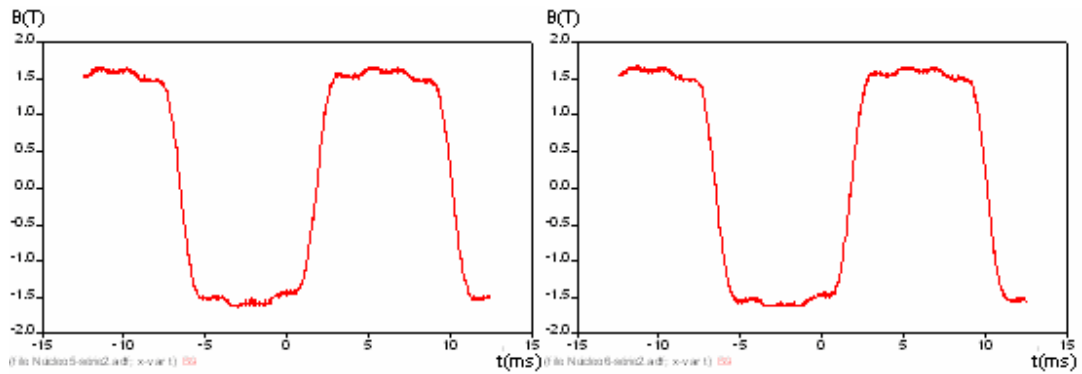


Figura 3.31 – a) Indução magnética no núcleo 5 e b) Indução magnética no núcleo 6.

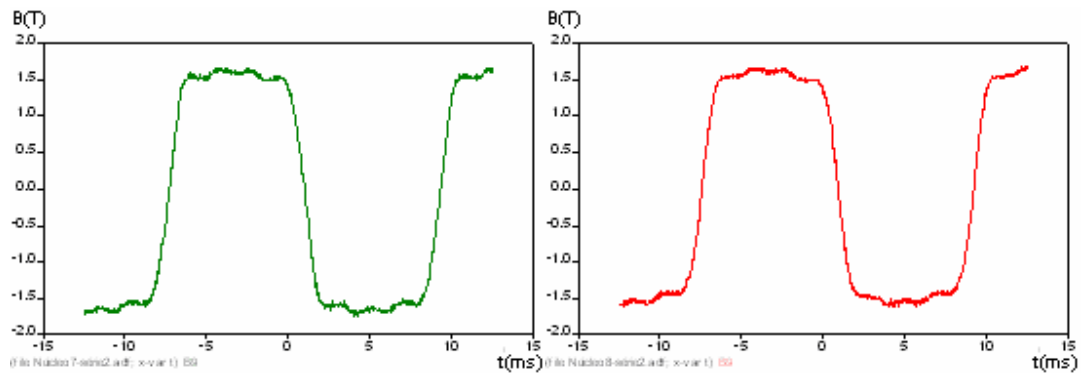


Figura 3.32 – a) Indução magnética no núcleo 7 e b) Indução magnética no núcleo 8.

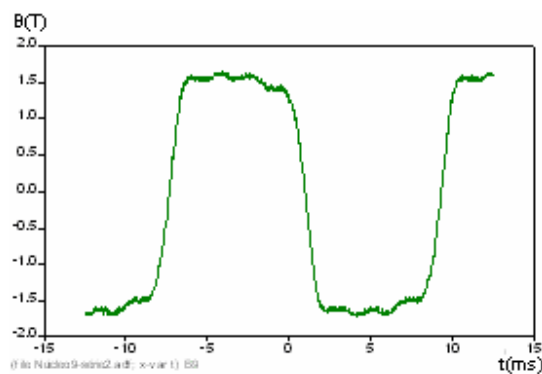


Figura 3.33 – Indução magnética no núcleo 9.

As Figuras 3.35 a 3.39 mostram os comportamentos das induções magnéticas presentes nas travessas e retornos do protótipo PS2, considerando a numeração imposta na Figura 3.34.



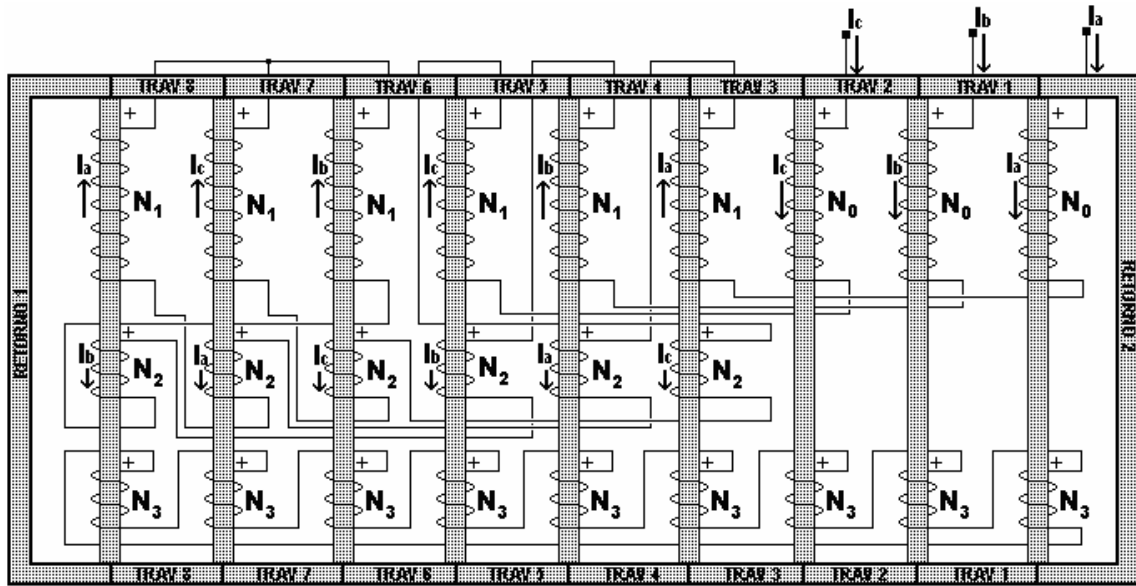


Figura 3.34 – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PS2.

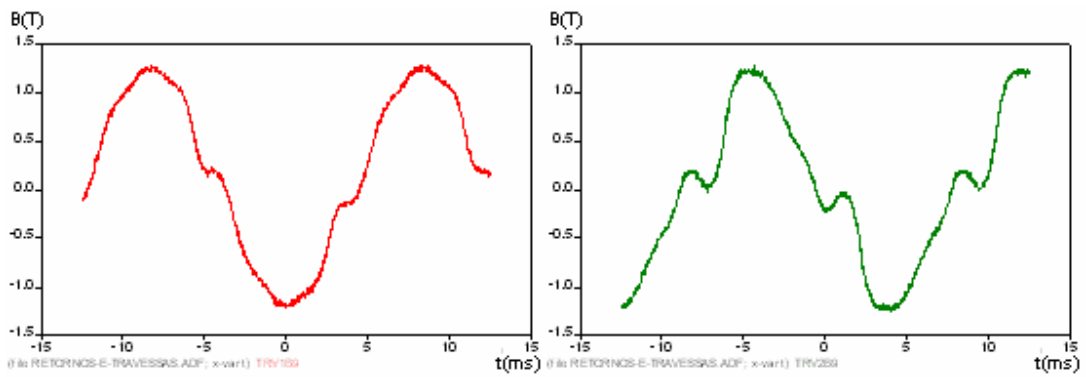


Figura 3.35 – a) Indução magnética na travessa 1 e b) Indução magnética na travessa 2.

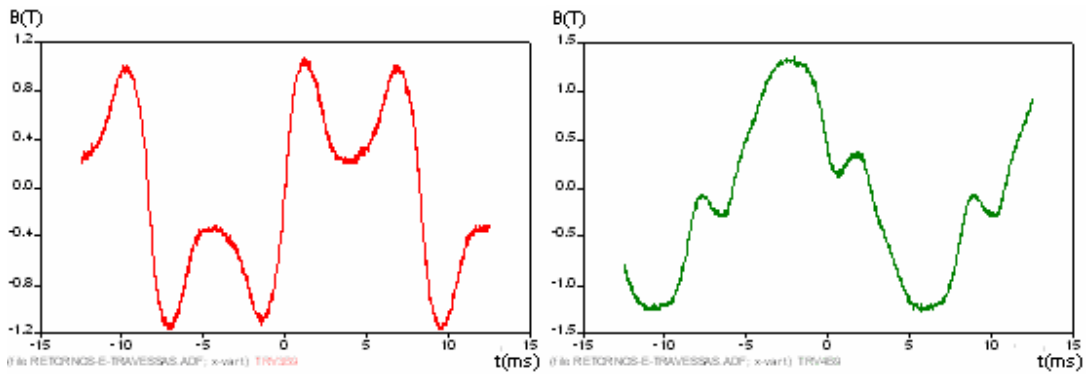


Figura 3.36 – a) Indução magnética na travessa 3 e b) Indução magnética na travessa 4.

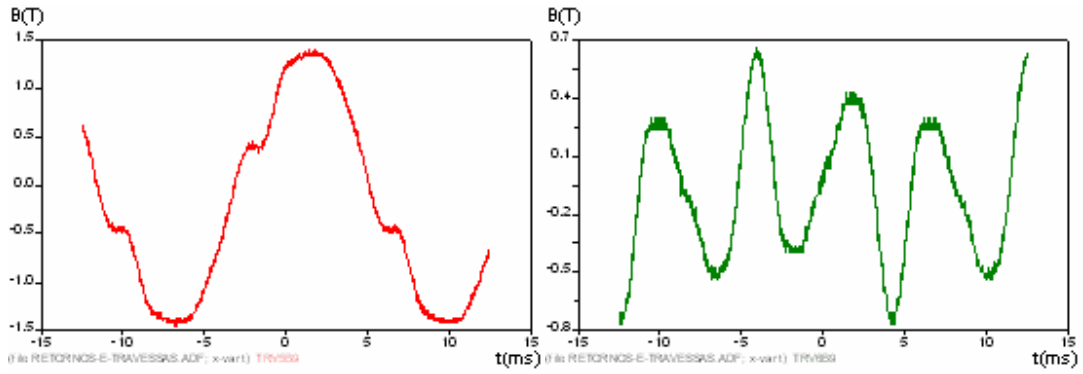


Figura 3.37 – a) Indução magnética na travessa 5 e b) Indução magnética na travessa 6.

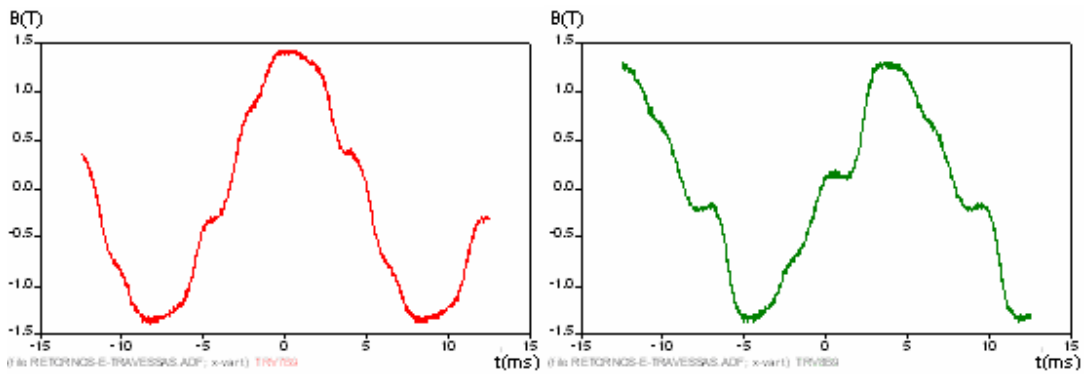


Figura 3.38 – a) Indução magnética na travessa 7 e b) Indução magnética na travessa 8.

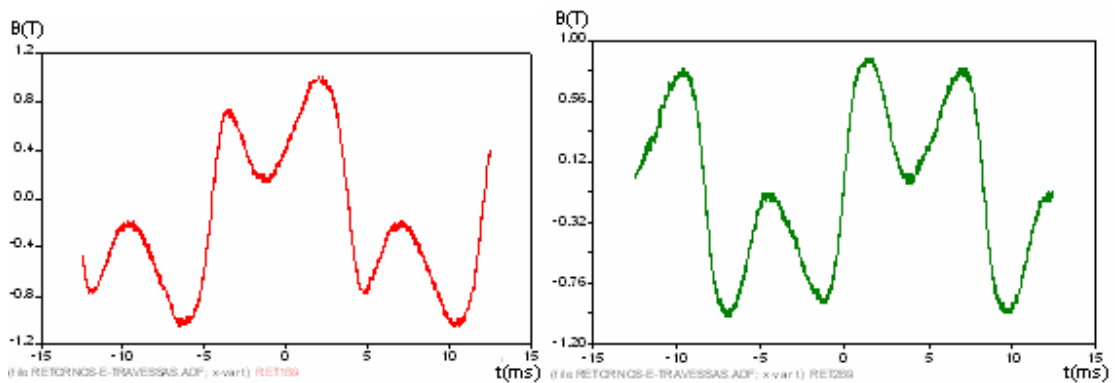


Figura 3.39 – a) Indução magnética no retorno 1 e b) Indução magnética no retorno 2.

### 3.4 Conclusões

Os valores de perdas na estrutura ferromagnética medida através do registrador RMS MARH-21 tem seus valores diferentes entre os dois protótipos ensaiados.

Fazendo uma comparação entre estas perdas em um mesmo valor de corrente através das Tabelas 3.22 e 3.23, verifica-se que o protótipo PS2 sempre possui um valor maior, o que diante das curvas características  $V \times I$  dos mesmos, pode-se prever, pois a sua inclinação é menor.

As parcelas calculadas das perdas por Foucault e por magnetização têm comportamentos parecidos quando os protótipos são comparados. Estas perdas são bem parecidas entre os protótipos por que essas dependem do valor máximo de indução magnética e como o volume dos núcleos e também os enrolamentos possuem os mesmo números de espiras e de secção transversal, é natural que as perdas tenham valores próximos.

A diferença entre os protótipos está no volume da estrutura de fechamento de circuito magnético, composta pelas travessas e retornos.

Os fluxos magnéticos criados em cada um dos núcleos são iguais, ver Figura 3.1. Por exemplo, o 2º núcleo a ser saturado na estrutura do protótipo PS1 é igual ao fluxo magnético criado no 2º núcleo a ser saturado na estrutura do protótipo PS2. Como  $\phi = BA$  e as áreas das travessas e retornos têm a relação  $A_{PS2} = A_{PS1}/2$  a indução magnética nas travessas e retornos pode duplicar de um para o outro o que implica em acoplamento magnético se o valor duplicado levar o material à saturação.

O grande teor harmônico encontrado nas suas estruturas faz com que as parcelas de perdas por correntes de Foucault sejam elevadas, conduzindo estes reatores saturados a uma temperatura acentuada, necessitando de métodos adequados para o seu resfriamento. Quanto menor for a secção transversal das travessas e retornos, mais potência deverá ser dissipada, pois a indução magnética tende a aumentar.

Diante do que aqui foi descrito é perceptível o favorecimento do protótipo PS1 em relação ao protótipo PS2.

No Capítulo 4 serão descritas as perdas medidas e as parcelas calculadas para cada um dos dois tipos de protótipos com os enrolamentos primários ligados em paralelo, bem como uma análise dos resultados.

# Capítulo 4

## Estudo do comportamento das perdas magnéticas nos reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em paralelo

### 4.1 Levantamento da curva característica operacional

No Capítulo 3 foi realizada uma comparação entre os comportamentos dos protótipos com ligação em série dos enrolamentos primários em que a única diferença física era o volume do material ferromagnético nos retornos e travessas.

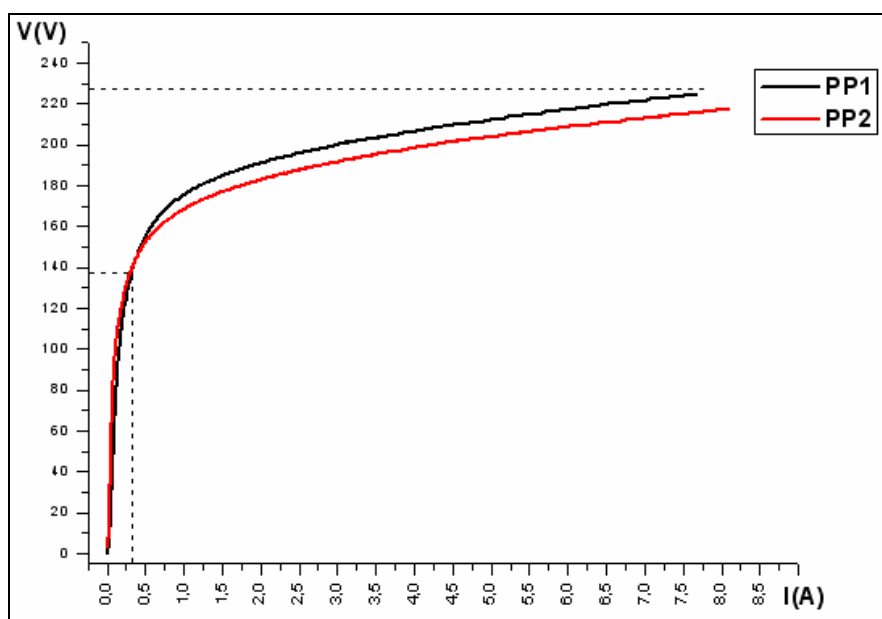
Este capítulo tem o intuito de detalhar as componentes mensuráveis das perdas no material ferromagnético dos protótipos com ligação em paralelo dos enrolamentos primários.

Os protótipos PP1 e PP2 foram projetados para terem as mesmas características operacionais. No entanto, conforme as Figuras 2.5 e 2.7, seus projetos são diferentes. O PP1 é um protótipo que possui uma estrutura ferromagnética em monobloco planar e, os enrolamentos secundários estão presentes em todos os núcleos da estrutura o que não acontece com o PP2, sendo este possuidor de três estruturas ferromagnéticas independentes umas das outras e os enrolamentos secundários estão presentes apenas nos núcleos da estrutura central.

Além disso, eles foram ensaiados de forma que tivessem distribuições de  $fmm's$  diferentes o que segundo Friedlander, não influenciará na compensação harmônica, desde que estejam defasadas entre si de  $\pi/n$  radianos. [3]. As formas de onda dos fluxos magnéticos bem como das induções magnéticas produzidas em cada parte da estrutura foram obtidas para os pontos de operação em torno dos pontos descritos na Tabela 2.12, da mesma forma que os protótipos com ligação em série.

Os protótipos PP1 e PP2 levam vantagem sobre os protótipos com ligação em série devido à criação de fluxos magnéticos puramente senoidais em seus núcleos por parte das suas  $fmm's$ , o que isenta qualquer tratamento para fins de estudo, como foi o caso dos protótipos com ligação em série.

A expressão para as perdas por Foucault nos núcleos tem uma forma bastante simples devido ao comportamento senoidal da indução magnética. Para o levantamento das curvas características dos protótipos, foi utilizado o mesmo método anterior. Utilizou-se o registrador RMS MARH-21 de grandezas com o parâmetro programado para fazer aquisição das grandezas eficazes a cada segundo. Os resultados destas leituras foram utilizados para o levantamento das curvas da Figura 4.1.



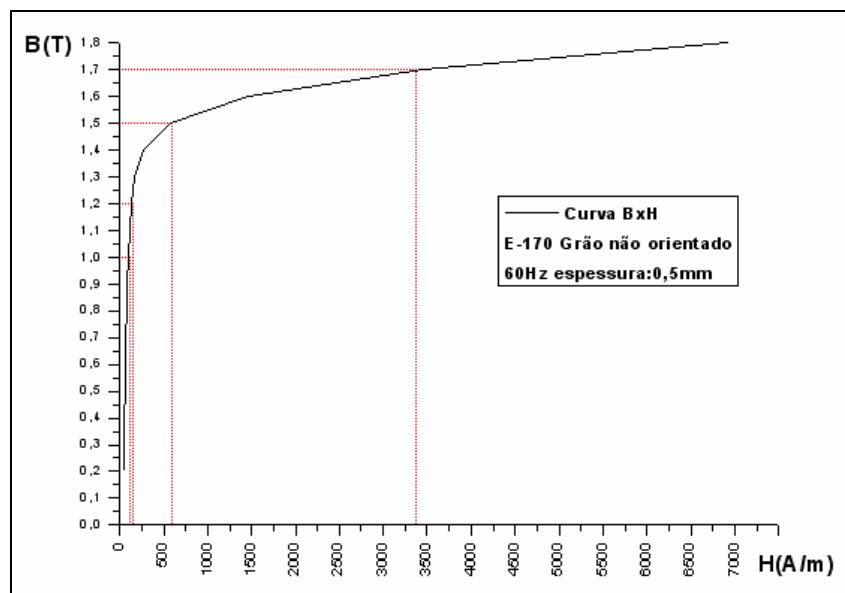
**Figura 4.1** - Curva característica operacional dos protótipos com ligação em paralelo.

Pode ser observado que existe uma diferença entre as suas inclinações. Uma explicação para este fato pode ser dada devido ao fato de que o protótipo PP2 tem um volume de ferro maior, pois cada estrutura possui dois retornos totalizando em 6 retornos e que, protótipo PP1, por ter estrutura em monobloco, possui na sua totalidade 2 retornos. Sendo assim, o fluxo magnético deverá percorrer caminhos diferentes.

Outra observação é que, quando a corrente atinge o valor de aproximadamente 0,34A dando início à saturação, a tensão nos seus terminais é de aproximadamente 138V entre fases. Neste valor de corrente, o protótipo PS1 estabelecia aproximadamente 180V entre fases e, para os protótipos PP1 e PP2 chegarem a este valor de tensão, é necessário que uma corrente de aproximadamente 3 vezes a do protótipo com ligação em série seja solicitada pelo mesmo. Este fenômeno acontece por conta das três unidades presentes nos protótipos PP1 e PP2. A

corrente de suprimento é dividida em três parcelas, ou seja, a corrente nos enrolamentos é igual um terço da corrente total. Tendo a informação de que o material ferromagnético utilizado em todos os quatro protótipos é exatamente o mesmo, a curva de saturação é a mesma e este só deverá entrar na saturação no instante em que a corrente fornecer campo magnético suficientemente elevado.

A curva  $B \times H$  para o material, segundo o fabricante, é dada na Figura 4.2.



**Figura 4.2** – Curva  $B \times H$  para o material presente nas estruturas ferromagnéticas dos protótipos, fornecida pelo fabricante.

A função dos enrolamentos secundários é de eliminar as distorções harmônicas criadas nas correntes e tensões dos reatores saturados e tal função é atingida quando um núcleo que, durante um intervalo da operação, precise se isentar da saturação e ao mesmo tempo deverá passar corrente capaz de saturá-lo pelos enrolamentos instalados nele.

Então, são induzidas tensões nos enrolamentos secundários e, como eles estão conectados fazendo um caminho fechado a cada três unidades de enrolamentos secundários, uma corrente circulará por eles e é exatamente esta corrente que irá anular o campo magnético criado pela corrente do enrolamento primário fazendo com que o campo equivalente no núcleo seja nulo e assim, estabelecendo o princípio dos reatores saturados.

A inclusão destes enrolamentos secundários na estrutura dos reatores saturados, tem mais importância naqueles que possuem ligações em paralelo e mais ainda na unidade elétrica que possui apenas um enrolamento primário como pode ser visualizado na Figura 4.3 para os núcleos 7 a 9.

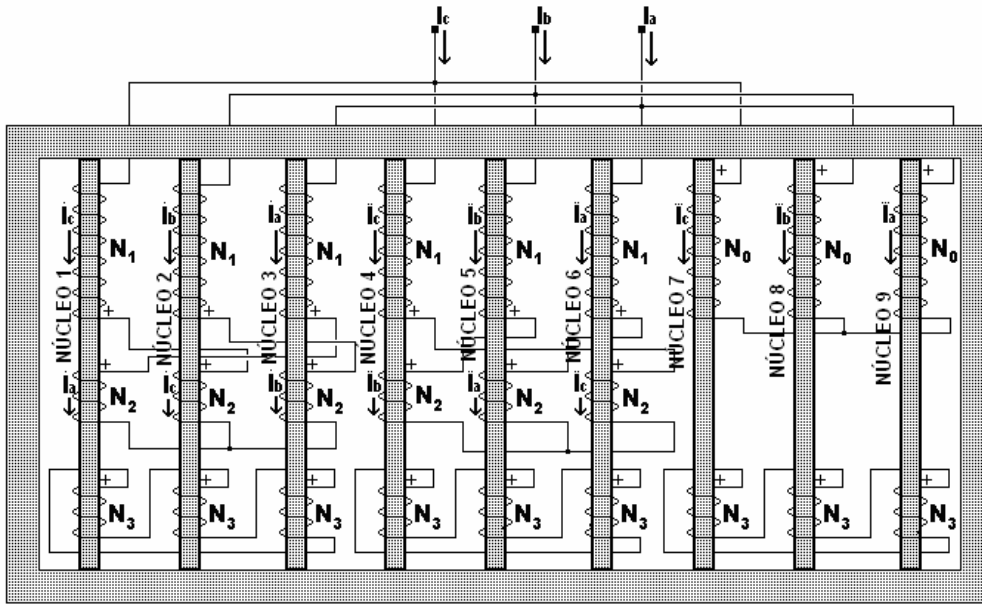


Figura 4.3 – Estrutura magnética para visualização dos núcleos no protótipo PPI.

A Figura 4.4 mostra a forma de onda da corrente que circula no enrolamento primário do núcleo 9 no intuito de exemplificar a situação descrita anteriormente.

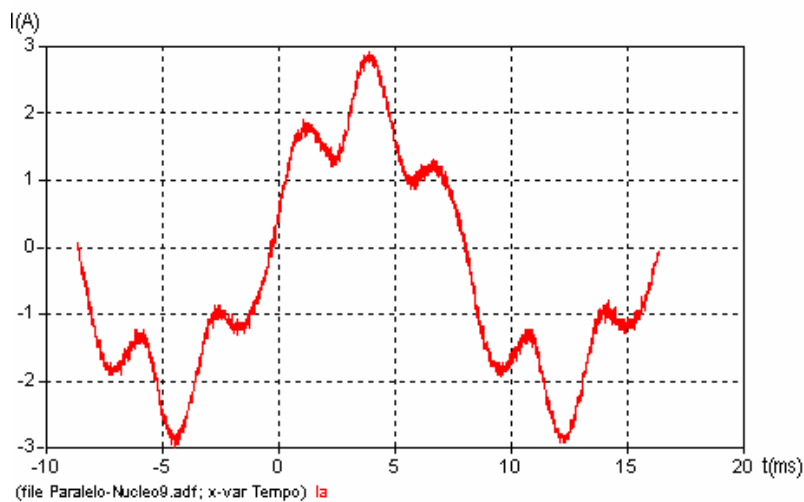


Figura 4.4 – Forma de onda da corrente presente nos enrolamentos primários nos núcleos com apenas um enrolamento primário por núcleo.

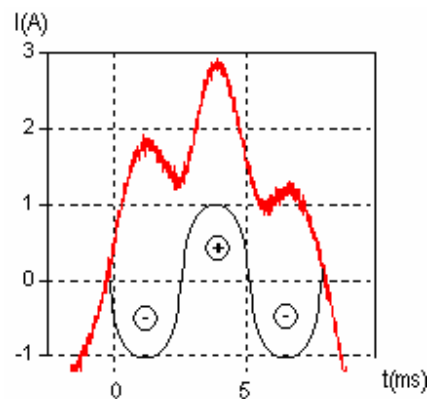


Como os enrolamentos secundários são ligados em série a cada três unidades deles, e serão induzidas tensões a cada vez que os núcleos onde estão instalados entram na região de não saturação, suas correntes serão correntes de frequência tripla da corrente de alimentação. Os três picos criados pela corrente do primário mostrada na Figura 4.4 têm seus valores capazes de levar o material a saturação.

Analisando apenas um semi-ciclo, verifica-se a existência destes três picos de corrente e que apenas um deles deverá fazer com que o material sature. Quem faz o material saturar é o campo magnético criado no material ferromagnético pelas correntes dos enrolamentos instalados nele e não estas correntes.

Desta forma, a corrente no secundário produzirá um campo magnético capaz de anular o efeito do campo magnético produzido pelo enrolamento primário, nos instantes que a corrente que circula no secundário tem seus valores pertencentes aos semi-ciclos negativos.

A Figura 4.5 retrata um semi-ciclo da forma de onda da corrente do núcleo 9 representado na Figura 4.3, mostrando também o comportamento da corrente do secundário.



**Figura 4.5** – Forma de onda da corrente no primário e secundário.

Então, durante este semi-ciclo de corrente no enrolamento primário, como a corrente do secundário tem frequência tripla esta terá um ciclo e meio durante o mesmo intervalo de tempo.

Os picos negativos da corrente do secundário mostrados na Figura 4.5, deverão criar um campo magnético capaz de anular o campo magnético criado pela corrente do primário no

mesmo intervalo de tempo, pois o núcleo deverá estar na saturação apenas em  $\pi/3$  para cada semi-ciclo e a compensação harmônica imposta por Friedlander só acontece quando as  $fmm's$  estão defasadas de  $\pi/n$  entre si o que só acontece quando a situação acima descrita acontece [1].

Para os núcleos providos de dois enrolamentos primários, onde a corrente de um deles poderá anular o efeito do campo magnético do outro, a corrente do secundário fará com que a forma de onda da corrente seja ainda menos distorcida e dá a garantia de saturação do material apenas no seu instante determinado. Ainda há a situação de existir apenas enrolamentos primários, como será mostrado, a seguir, para o caso das estruturas 1 e 3 do protótipo PP2.

O Protótipo PP2 possui um tipo de ligação que, quando em operação, os núcleos existentes nas estruturas 1 e 3, que possuem ligações sob molde de um autotransformador serão submetidos a um campo magnético com forma de onda diferente das formas de onda do campo magnético encontradas na estrutura 2 e do outro protótipo com ligação em paralelo.

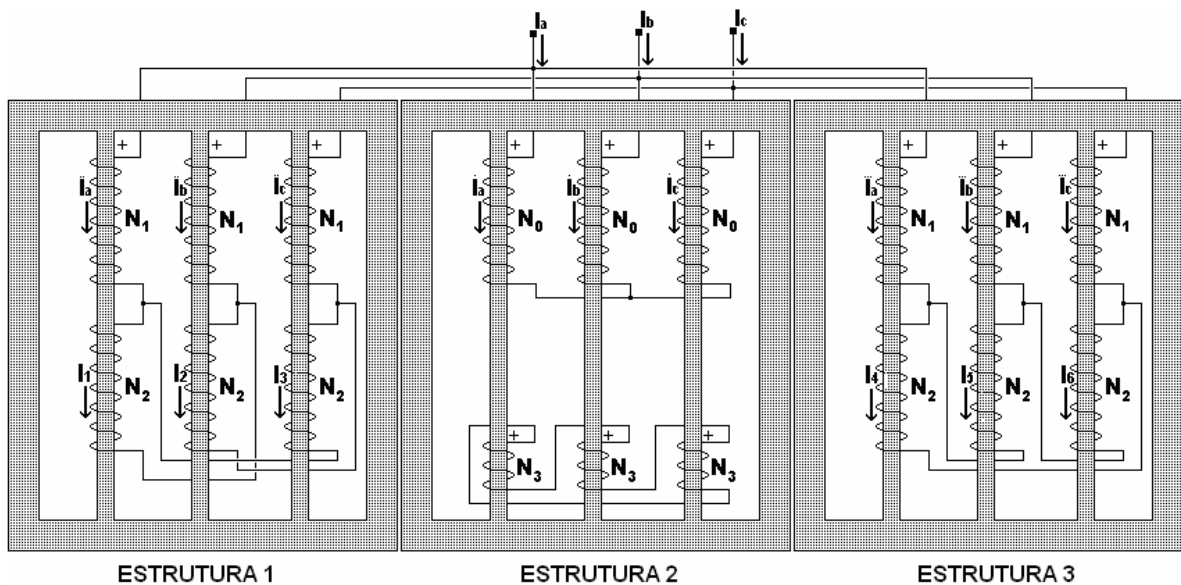


Figura 4.6 – Estrutura do protótipo PP2.

Isso acontece devido à ausência dos enrolamentos secundários nestas estruturas e que a sua ligação é feita de forma que a  $fmm$  criada deverá ser composta por apenas um pulso durante um intervalo de  $\pi/3$  a cada semi-ciclo, conforme Figura 4.7.

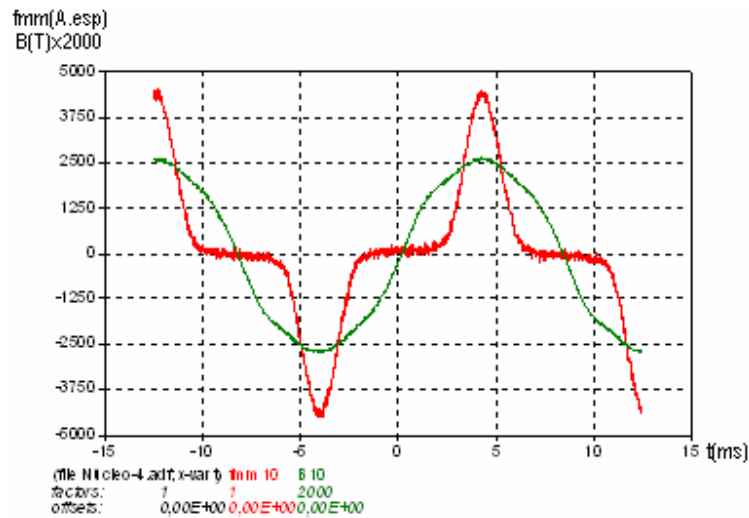


Figura 4.7 – Forma de onda da indução magnética e da  $fmm$  .

Esta  $fmm$  criada nestes núcleos possui harmônicos de ordem e amplitudes superiores aos harmônicos existentes nas  $fmm$ 's dos outros núcleos onde pode ser identificado através de uma comparação entre as Figuras 4.8a e 4.8b.

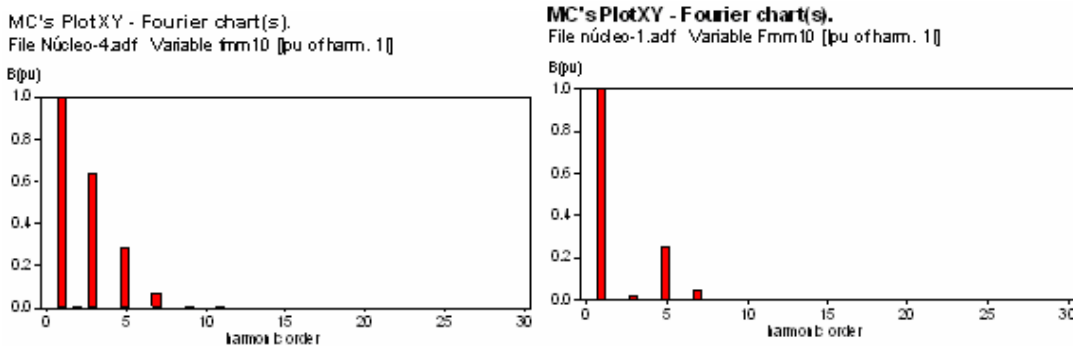
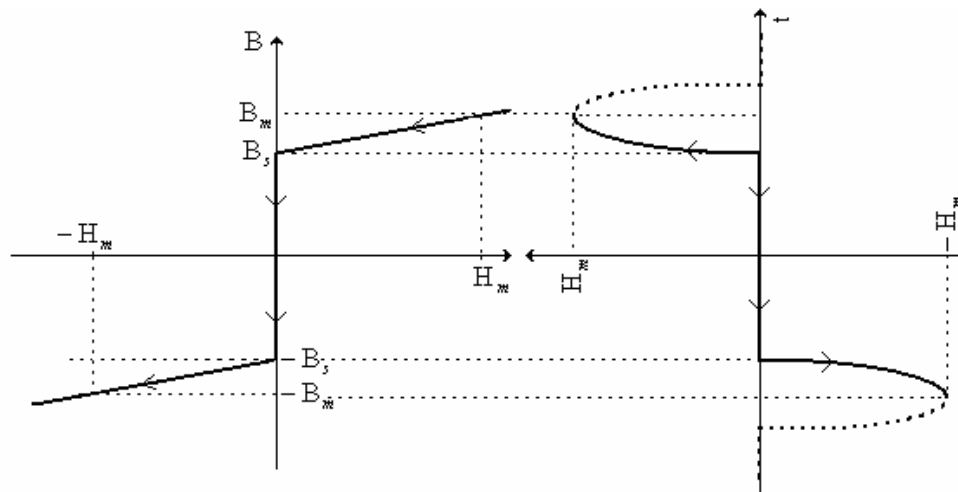


Figura 4.8 – a) Conteúdo Harmônico da  $fmm$  dos núcleos presentes nas estruturas 1 e 3 do protótipo PP2 e b) Conteúdo Harmônico da  $fmm$  dos núcleos presentes na estrutura 2 do protótipo PP2.

Apesar de uma maior distorção da forma de onda, os núcleos presentes nas estruturas 1 e 3 apresentam um comportamento bem exemplar da teoria dos reatores saturados. Como foi descrito no capítulo 1 e aqui novamente frisado, analisando a Figura 4.9:



**Figura 4.9** – Forma de onda do campo magnético criado pela excitação nos núcleos da unidade central do protótipo PP2.

Considerando a curva da esquerda como a curva de característica do material, percorrendo um trecho durante o intervalo de meio ciclo, o valor do campo sai de um valor  $H_m$  e vai até um valor de  $-H_m$ . Esta variação do campo faz com que a sua curva seja como definido como mostra, tendo esta forma de onda, um traçado muito semelhante ao da curva real medida da *fmm* no protótipo, quando é considerada tal forma de ligação, conforme a Figura 4.7.

É ressaltado novamente que a *fmm* e o campo magnético possuem o mesmo traçado em suas formas de onda por que, a única grandeza que as relaciona é o caminho percorrido pelo campo magnético,  $fmm = Hl$  sendo esta uma grandeza escalar.

## 4.2 Perdas por Foucault

Para este tipo de protótipo, esta parcela de perdas está mais concentrada em regimes de baixa frequência, pela pouca distorção que as ondas de indução magnética possuem.

Os núcleos possuem ondas de indução magnética perfeitamente senoidais e as estruturas possuem um percentual baixo de distorção em suas ondas. Com isso, a interpretação da Equação 2.26 é simples e objetiva para os seus núcleos.

As Tabelas 4.1 e 4.2 retratam os valores de indução magnética máxima encontrada nos núcleos quando há variação de corrente de suprimento dos protótipos e da mesma forma que nos protótipos com ligação em série, aqui também deverão ser observadas as travessas e retornos sob as condições de saturação, pois foram projetados para ficarem livres de saturação em qualquer instante do tempo.

Para uma melhor compreensão, considere-se a Figura 4.10, onde estão definidos os núcleos referidos nas Tabelas 4.1 e 4.5.

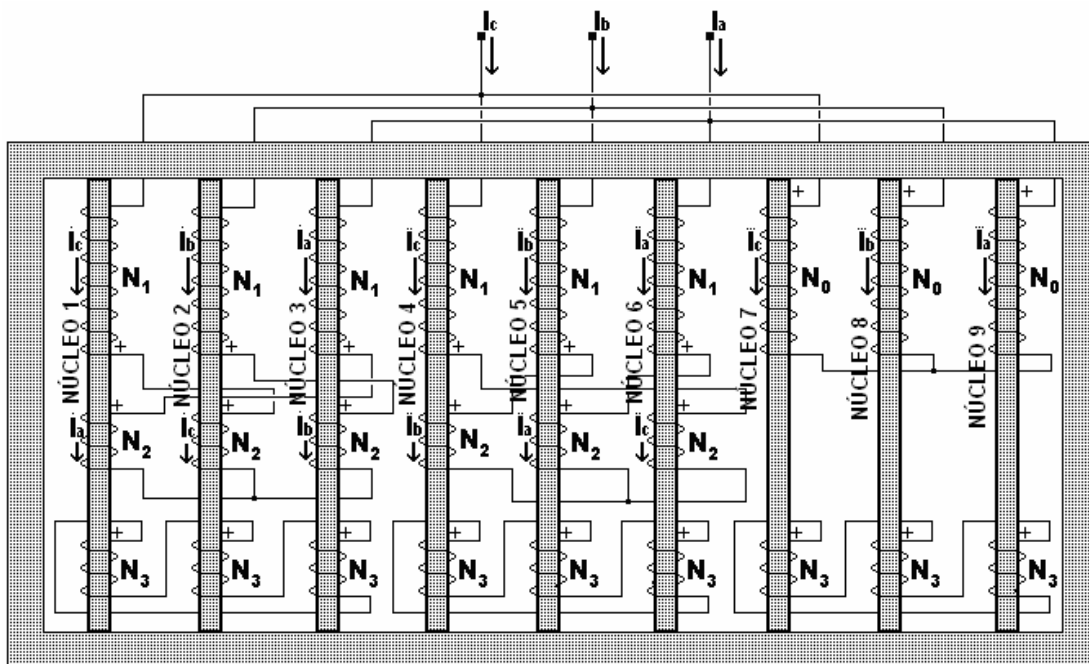


Figura 4.10 – Denominação dos núcleos do protótipo PPI

Os valores encontrados nos núcleos, de indução magnética, mostrados na Tabela 4.1 são valores máximos para forma de onda senoidal na frequência de operação de 60Hz. São mostrados também os valores de corrente correspondentes aos valores de indução magnética expressos e os erros absolutos tanto da corrente quanto da indução magnética.

Tabela 4.1 - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PPI, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$
L1	0,53	0,03	1,2	0,2	1,2	0,2	1,1	0,2	1,2	0,2
L2	1,07	0,06	1,4	0,2	1,3	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2
L3	1,6	0,1	1,4	0,2	1,4	0,2	1,2	0,2	1,4	0,2
L4	2,1	0,1	1,5	0,2	1,4	0,2	1,2	0,2	1,4	0,2
L5	2,6	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2
L6	2,8	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2
L7	3,2	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,3	0,2	1,5	0,2
L8	3,8	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,3	0,2	1,5	0,2
L9	4,4	0,3	1,6	0,2	1,5	0,2	1,3	0,2	1,5	0,2
L10	4,9	0,3	1,6	0,3	1,5	0,2	1,3	0,2	1,5	0,2
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$
L1	1,2	0,2	1,1	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2
L2	1,3	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L3	1,3	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L4	1,4	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L5	1,4	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L6	1,4	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L7	1,5	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L8	1,5	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L9	1,5	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2
L10	1,5	0,2	1,4	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2	1,5	0,2

Da mesma forma, a Figura 4.11 tem o intuito de identificar os núcleos nos quais são baseadas as Tabelas 4.2 e 4.6.

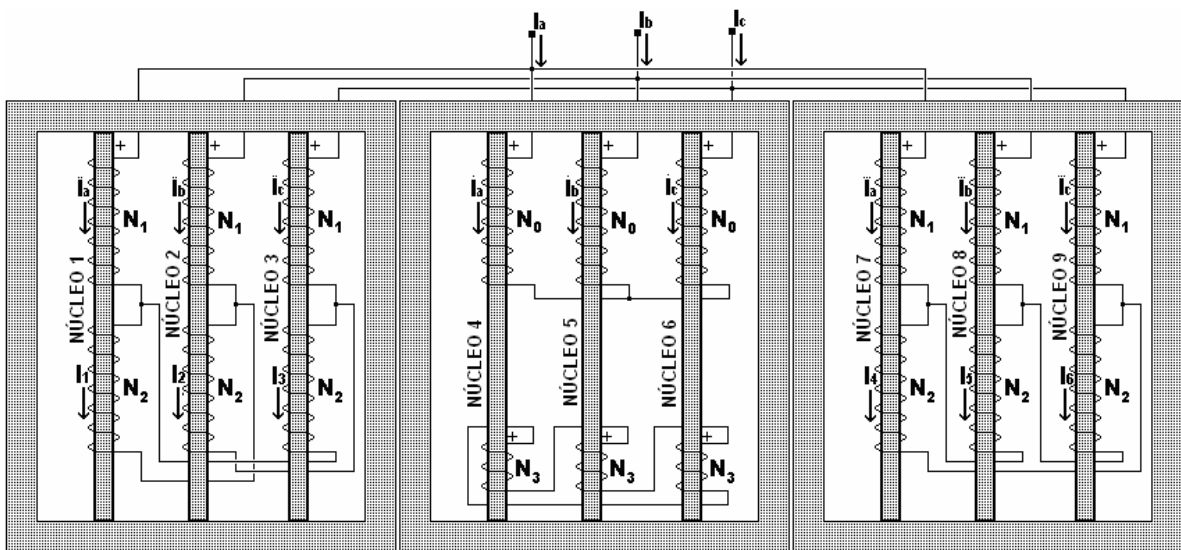


Figura 4.11 – Nomeação dos núcleos do protótipo PP2.

Os valores encontrados nos núcleos, de indução magnética, mostrados na Tabela 4.2 são valores máximos para forma de onda senoidal na frequência de operação de 60Hz. São mostrados também os valores de corrente correspondentes aos valores de indução magnética expressos e os erros absolutos tanto da corrente quanto da indução magnética.

**Tabela 4.2** - Valores de indução máxima nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PP2.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$
L1	0,56	0,03	1,0	0,2	1,1	0,2	1,1	0,2	1,0	0,2
L2	1,11	0,07	1,1	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2	1,1	0,2
L3	1,7	0,1	1,2	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2
L4	2,2	0,1	1,2	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,2	0,2
L5	2,7	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L6	2,9	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L7	3,4	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L8	4,0	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L9	4,5	0,3	1,3	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L10	5,0	0,3	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$	$B_{m\acute{a}x}(T)$	$\Delta B(T)$
L1	1,0	0,2	1,0	0,2	1,1	0,2	1,1	0,2	1,1	0,2
L2	1,1	0,2	1,1	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2
L3	1,2	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2	1,2	0,2	1,2	0,2
L4	1,2	0,2	1,2	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L5	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L6	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L7	1,3	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,3	0,2	1,3	0,2
L8	1,3	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L9	1,3	0,2	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2
L10	1,3	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2	1,4	0,2

Para um valor único de indução magnética experimentada pelos núcleos dos protótipos, deve-se considerar uma média aritmética dos valores encontrados em todos os núcleos para cada um dos protótipos, significando que, quando construídos e ensaiados de forma ideal, os núcleos passariam a experimentar valores idênticos de indução magnética em todos os núcleos da estrutura.

Assim, as Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os valores médios de indução magnética,  $B_{m\acute{a}x}(T)$  e o seu erro absoluto  $\Delta B_{m\acute{a}x}(T)$  e os valores de corrente  $I_m(A)$  e seu erro absoluto  $\Delta I_m(A)$  para tal situação

**Tabela 4.3** - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PPI, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Médio	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$
L1	0,53	0,03	1,2	0,2
L2	1,07	0,06	1,3	0,2
L3	1,6	0,1	1,3	0,2
L4	2,1	0,1	1,4	0,2
L5	2,6	0,2	1,4	0,2
L6	2,8	0,2	1,4	0,2
L7	3,2	0,2	1,4	0,2
L8	3,8	0,2	1,4	0,2
L9	4,4	0,3	1,4	0,2
L10	4,9	0,3	1,5	0,2

**Tabela 4.4** - Valores de indução máxima média nos núcleos e de corrente de alimentação do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Médio	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$
L1	0,56	0,03	1,1	0,2
L2	1,11	0,07	1,2	0,2
L3	1,7	0,1	1,2	0,2
L4	2,2	0,1	1,3	0,2
L5	2,7	0,2	1,3	0,2
L6	2,9	0,2	1,3	0,2
L7	3,4	0,2	1,3	0,2
L8	4,0	0,2	1,3	0,2
L9	4,5	0,3	1,3	0,2
L10	5,0	0,3	1,4	0,2

Assim, a Equação 2.26 aqui repetida em 4.1 será utilizada para a determinação das perdas por Foucault, considerando a forma de onda da indução magnética puramente senoidal.

$$P_f = \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 \frac{d^2}{12} \quad [\text{W/m}^3] \quad (4.1)$$

Sabendo que o quadrado da derivada da indução magnética é encontrado como mostrado em 4.2:



$$\begin{aligned}
 B(t) &= B_m \text{sen}(\omega t) \\
 \frac{\partial B}{\partial t} &= \omega B_m \cos(\omega t) \quad (4.2) \\
 \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 &= \omega^2 B_m^2 \cos^2(\omega t)
 \end{aligned}$$

Como o valor médio da função  $\cos^2(\omega t) = 1/2$ , durante um intervalo de tempo T e substituindo na equação acima:

$$\begin{aligned}
 P_f &= \sigma \omega^2 B_m^2 \frac{d^2}{24} \quad [\text{W/m}^3] \quad (4.3) \\
 P_f &= \frac{\sigma d^2 \pi^2 f^2 B_m^2}{6}
 \end{aligned}$$

A Equação em 4.3 foi utilizada para a obtenção dos valores das perdas por Foucault expressos nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente, para os protótipos PP1 e PP2 para a variação de corrente de alimentação em cada um deles.

**Tabela 4.5** – Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PPI e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,53	0,03	0,6	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2
L2	1,07	0,06	0,7	0,2	0,7	0,2	0,6	0,2	0,7	0,2
L3	1,6	0,1	0,8	0,3	0,8	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L4	2,1	0,1	0,9	0,3	0,8	0,3	0,7	0,2	0,8	0,3
L5	2,6	0,2	0,9	0,3	0,8	0,3	0,7	0,2	0,8	0,3
L6	2,8	0,2	0,9	0,3	0,9	0,3	0,7	0,2	0,8	0,3
L7	3,2	0,2	0,9	0,3	0,9	0,3	0,8	0,2	0,9	0,3
L8	3,8	0,2	1,0	0,3	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3
L9	4,4	0,3	1,0	0,3	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3
L10	4,9	0,3	1,1	0,3	1,0	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,6	0,2	0,5	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2
L2	0,7	0,2	0,6	0,2	0,7	0,2	0,6	0,2	0,7	0,2
L3	0,6	0,2	0,7	0,2	0,8	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L4	0,7	0,2	0,7	0,2	0,8	0,3	0,7	0,2	0,8	0,3
L5	0,8	0,2	0,8	0,2	0,9	0,3	0,8	0,2	0,8	0,3
L6	0,8	0,3	0,8	0,2	0,9	0,3	0,8	0,2	0,8	0,3
L7	0,8	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3
L8	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3
L9	0,9	0,3	0,9	0,3	1,0	0,3	0,8	0,3	1,0	0,3
L10	0,9	0,3	0,9	0,3	1,0	0,3	0,9	0,3	1,0	0,3

**Tabela 4.6** – Valores calculados da potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PP2 e valores de corrente de alimentação, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,56	0,03	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,1
L2	1,11	0,07	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2
L3	1,7	0,1	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2
L4	2,2	0,1	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,6	0,2
L5	2,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L6	2,9	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L7	3,4	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,8	0,2	0,7	0,2
L8	4,0	0,2	0,8	0,2	0,8	0,2	0,8	0,3	0,7	0,2
L9	4,5	0,3	0,8	0,3	0,8	0,3	0,8	0,3	0,7	0,2
L10	5,0	0,3	0,8	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3	0,8	0,2
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,4	0,1	0,5	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2
L2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2
L3	0,6	0,2	0,6	0,2	0,7	0,2	0,6	0,2	0,6	0,2
L4	0,6	0,2	0,6	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L5	0,6	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L6	0,6	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L7	0,7	0,2	0,7	0,2	0,8	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2
L8	0,7	0,2	0,7	0,2	0,8	0,3	0,7	0,2	0,7	0,2
L9	0,7	0,2	0,7	0,2	0,8	0,3	0,8	0,2	0,8	0,2
L10	0,7	0,2	0,8	0,2	0,8	0,3	0,8	0,2	0,8	0,2

As perdas totais calculadas por correntes de Foucault dissipadas por todos os núcleos da estrutura de cada um dos protótipos é igual à soma das parcelas de cada um dos núcleos.

As Tabelas 4.7 e 4.8 mostram os valores de corrente, indução magnética média nos núcleos e as perdas totais calculadas por correntes de Foucault nos núcleos dos protótipos PP1 e PP2, respectivamente:

**Tabela 4.7** - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PPI, bem como os seus erros absolutos.

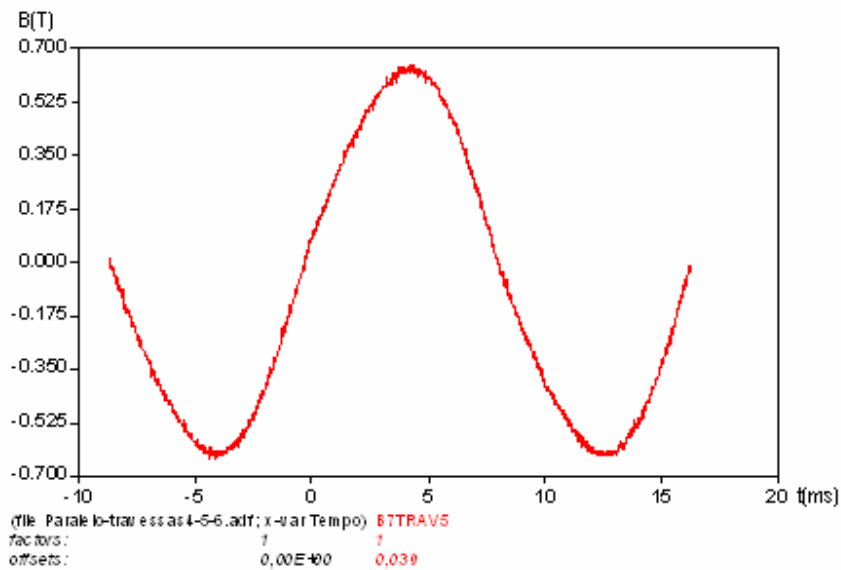
Leitura	Corrente		Indução média		Perdas por Foucault total nos núcleos	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,53	0,03	1,2	0,2	5	2
L2	1,07	0,06	1,3	0,2	6	2
L3	1,6	0,1	1,3	0,2	7	2
L4	2,1	0,1	1,4	0,2	7	2
L5	2,6	0,2	1,4	0,2	7	2
L6	2,8	0,2	1,4	0,2	7	2
L7	3,2	0,2	1,4	0,2	8	2
L8	3,8	0,2	1,4	0,2	8	3
L9	4,4	0,3	1,4	0,2	8	3
L10	4,9	0,3	1,5	0,2	8	3

**Tabela 4.8** - Valores de corrente, indução magnética e potência dissipada pelas correntes de Foucault nos núcleos do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Indução média		Perdas por Foucault total nos núcleos	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B(\text{T})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,56	0,03	1,1	0,2	4	1
L2	1,11	0,07	1,2	0,2	5	2
L3	1,7	0,1	1,2	0,2	6	2
L4	2,2	0,1	1,3	0,2	6	2
L5	2,7	0,2	1,3	0,2	6	2
L6	2,9	0,2	1,3	0,2	6	2
L7	3,4	0,2	1,3	0,2	6	2
L8	4,0	0,2	1,3	0,2	7	2
L9	4,5	0,3	1,3	0,2	7	2
L10	5,0	0,3	1,4	0,2	7	2

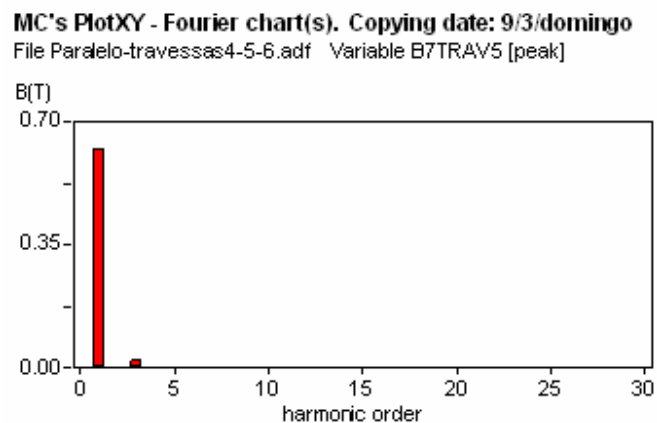
Da mesma forma que nos protótipos PS1 e PS2, aqui também houve uma divergência entre os valores das induções máximas experimentadas pelos núcleos, quando submetidos às mesmas condições de operação, devido à existência de um desequilíbrio de alimentação causado por conta da tensão no barramento de alimentação da bancada de ensaio ou por algum eventual defeito construtivo.

Nas travessas e retornos, existe uma pequena distorção nas formas de onda da indução magnética. Um exemplo destas formas de onda é representado na Figura 4.12.



**Figura 4.12** – Forma de onda da indução magnética encontrada nas partes de fechamento de circuito magnético.

Esta forma de onda foi obtida no protótipo PP1 para um ponto de operação quando a corrente solicitada tinha um valor aproximadamente de 3,0A e seu conteúdo harmônico é relatado na Figura 4.13:



**Figura 4.13** – Distorção harmônica da forma de onda da Figura 4.12.

Pela Figura 4.13, conclui-se que, nas travessas, a distorção harmônica é extremamente pequena.

Mesmo os dois protótipos tendo seus princípios de ligações diferentes e sendo um com estrutura em monobloco e outro com três estruturas independentes, o Protótipo PP1, tem um comportamento de um reator saturado com três estruturas.

Esta afirmação pode ser explicada pela leitura obtida da forma de onda da indução nas travessas que fazem a interligação entre as unidades trifásicas no caso, as travessas TRAV3 e TRAV6 conforme Figura 4.14.

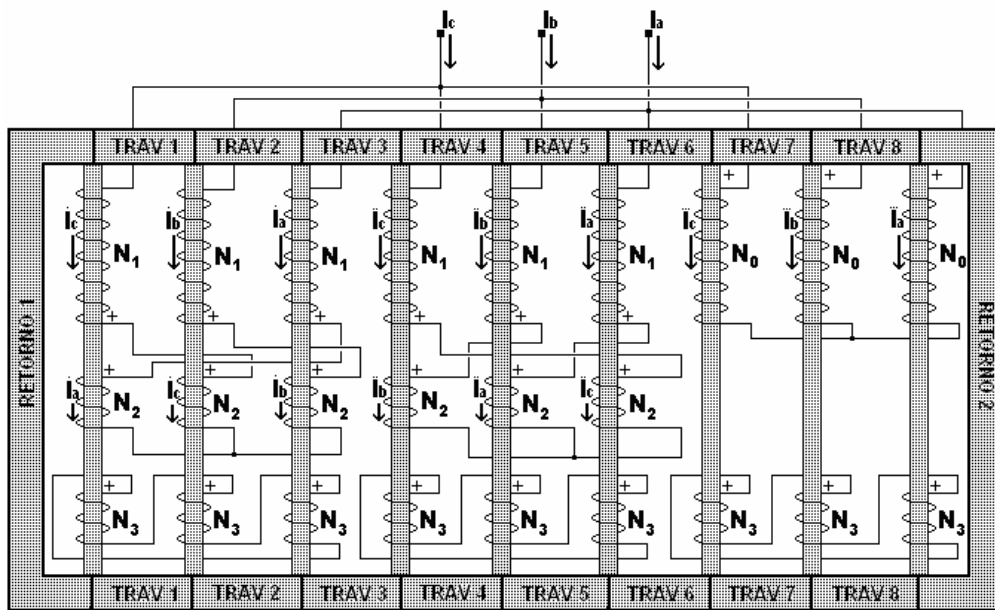
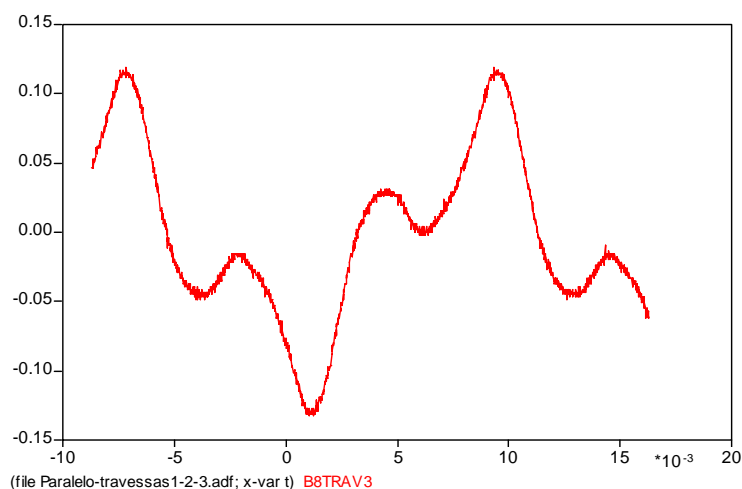
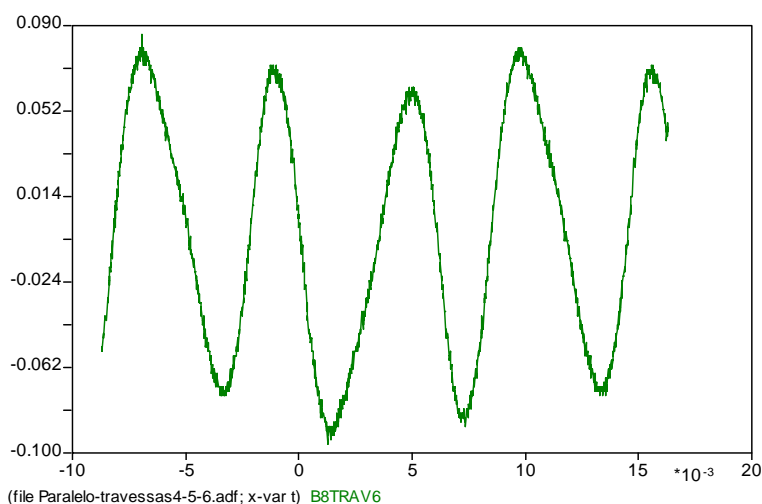


Figura 4.14 – Nomeação das travessas e retorno na estrutura do protótipo PP1.

As formas de onda nestas travessas estão exibidas nas Figuras 4.15 e 4.16, respectivamente para as travessas TRAV3 e TRAV6.



**Figura 4.15** – Forma de onda da indução magnética na travessa 3 do protótipo PPI.



**Figura 4.16** – Forma de onda da indução magnética na travessa 6 do protótipo PPI.

É uma vantagem deste protótipo, pois as perdas são extremamente baixas em relação aos núcleos. Pelas Figuras 4.15 e 4.16 verifica-se que o valor máximo instantâneo é muito pequeno quando comparado às induções máximas experimentadas pelos núcleos.

Um possível estudo poderia ser feito através da construção de um protótipo sem a presença destas duas travessas, pois precisaria de menos ferro o que, para reatores saturados de potência elevada, reduziria o custo razoavelmente.

Nestes protótipos, utilizou-se a permutação entre os núcleos, como no caso dos protótipos série. Porém só foi possível a permutação entre os núcleos de uma mesma unidade,

o que difere dos reatores saturados com ligação em série, pois estes poderiam permutar entre os seis possíveis.

Esta permutação é feita com o intuito de observar o comportamento em outras situações o que de fato mostrou a ausência de mudança nas formas de onda das induções dos núcleos. Para as travessas, como no caso dos protótipos série, houve também a permutação das formas de onda da indução da travessa adjacente aos núcleos envolvidos para esta situação, o que, para estes tipos de reatores, não faz diferença, pois as formas de onda nas travessas são muito parecidas, com exceção das travessas TRAV3 e TRAV6.

Já nos retornos, independentemente das permutações feitas, sempre apresentaram as mesmas formas de onda da indução magnética.

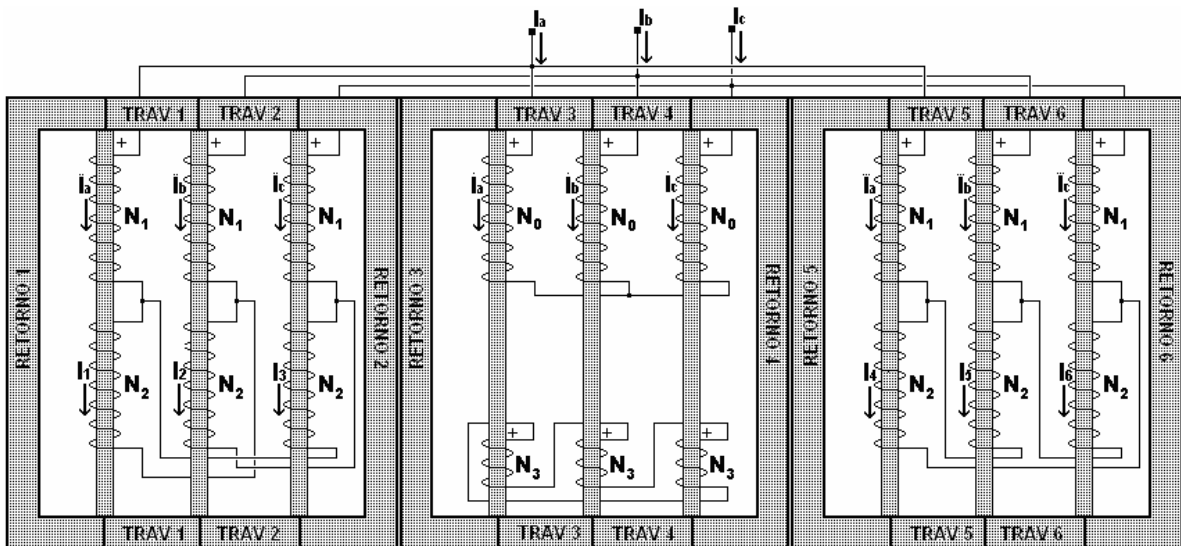


Figura 4.17 – Nomeação das travessas e retorno na estrutura do protótipo PP2.

Sabe-se que as travessas e retornos em cada um dos protótipos PS1, PP1 e PP2 foram dimensionados sob a teoria de que era necessária uma secção transversal com o dobro da secção transversal dos núcleos para que estas peças sempre ficassem na região de isenta de saturação o que obrigou a uma verificação desta condição.

Os valores máximos presentes nestas peças garante a teoria de que os núcleos se comportam independentemente uns dos outros. Por isso, é necessária a verificação.

A Tabela 4.9 mostra os valores obtidos em cada um dos protótipos PP1 e PP2 que deverão ser verificados para garantir a não saturação em qualquer valor de operação estipulado



para cada uma das peças mostradas nas Figuras 4.14 para o protótipo PP1 e 4.17 para o protótipo PP2.

**Tabela 4.9** - Valores máximos de indução magnética instantânea presente nas travessas e retornos dos protótipos PP1 e PP2, bem como seus erros absolutos.

Protótipo PP1	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B_{\text{máx}}(\text{T})$	Protótipo PP2	$B_{\text{máx}}(\text{T})$	$\Delta B_{\text{máx}}(\text{T})$
Travessa 1	0,7	0,1	Travessa 1	0,7	0,1
Travessa 2	0,7	0,1	Travessa 2	0,7	0,1
Travessa 3	0,15	0,02	Travessa 3	0,7	0,1
Travessa 4	0,7	0,1	Travessa 4	0,7	0,1
Travessa 5	0,7	0,1	Travessa 5	0,8	0,1
Travessa 6	0,05	0,02	Travessa 6	0,8	0,1
Travessa 7	0,8	0,1	Retorno 1	0,34	0,05
Travessa 8	0,8	0,1	Retorno 2	0,29	0,05
Retorno 1	0,07	0,01	Retorno 3	0,28	0,05
Retorno 2	0,09	0,01	Retorno 4	0,27	0,04
-	-	-	Retorno 5	0,26	0,04
-	-	-	Retorno 6	0,29	0,05

E, estes valores deverão ser verificados na Figura 4.2 para que os protótipos estejam de acordo com a teoria de que estas partes estarão isentas de saturação. Ao analisar o protótipo PP1, verifica-se que o maior valor encontrado nestas partes, é de 0,8T nas travessas 7 e 8 e, considerando o erro de precisão, esse valor poderá chegar a 0,9T o que garante a não saturação nestas partes, de acordo com a curva da Figura 4.2.

Para a análise do protótipo PP2, o seu comportamento é exatamente o mesmo. O maior valor encontrado foi de 0,8T nas travessas 5 e 6 podendo chegar a 0,9T quando se considera o erro precisão.

Como os dois protótipos foram construídos sob a hipótese de que seria necessária uma área de secção transversal das partes de fechamento de circuito duas vezes a dos núcleos, é compreensível que eles tenham valores de indução parecidos nestas partes.

Nas travessas e retornos, as perdas por correntes de Foucault, em watts, são obtidas pela Equação 3.29 aqui renomeada de 4.4, levando em consideração o volume de cada parte, tendo esta, a necessidade da derivada da função da indução. Esta, como já foi descrito anteriormente, deverá ser obtida por decomposição harmônica.

$$P_f = \frac{\sigma d^2 \pi^2 f^2}{6} \sum_h h^2 B_h^2 \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (4.4)$$

Assim, as Tabelas 4.10 e 4.11 trazem os valores das perdas por correntes de Foucault, em watts, para tal situação, considerando o volume da cada uma das peças.

**Tabela 4.10** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PPI, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Travessa 1		Travessa 2		Travessa 3		Travessa 4	
	Im(A)	ΔIm(A)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)
L1	0,53	0,03	0,06	0,02	0,06	0,02	0,0010	0,0004	0,06	0,02
L2	1,07	0,06	0,07	0,02	0,07	0,02	0,003	0,001	0,07	0,02
L3	1,6	0,1	0,08	0,02	0,07	0,02	0,003	0,001	0,08	0,03
L4	2,1	0,1	0,08	0,03	0,08	0,02	0,004	0,001	0,08	0,03
L5	2,6	0,2	0,08	0,03	0,08	0,03	0,005	0,002	0,09	0,03
L6	2,8	0,2	0,08	0,03	0,08	0,03	0,005	0,002	0,09	0,03
L7	3,2	0,2	0,08	0,03	0,08	0,03	0,006	0,002	0,09	0,03
L8	3,8	0,2	0,09	0,03	0,08	0,03	0,006	0,002	0,09	0,03
L9	4,4	0,3	0,09	0,03	0,09	0,03	0,007	0,002	0,10	0,03
L10	4,9	0,3	0,09	0,03	0,09	0,03	0,008	0,002	0,10	0,03

Leitura	Travessa 5		Travessa 6		Travessa 7		Travessa 8	
	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)	P <sub>fouc(w)</sub>	ΔP(w)
L1	0,06	0,02	0,0010	0,0004	0,07	0,02	0,07	0,02
L2	0,07	0,02	0,003	0,001	0,09	0,03	0,09	0,03
L3	0,07	0,02	0,005	0,002	0,09	0,03	0,09	0,03
L4	0,08	0,03	0,006	0,002	0,10	0,03	0,10	0,03
L5	0,08	0,03	0,007	0,002	0,10	0,03	0,10	0,03
L6	0,08	0,03	0,008	0,003	0,10	0,03	0,10	0,03
L7	0,08	0,03	0,009	0,003	0,11	0,03	0,11	0,03
L8	0,09	0,03	0,011	0,004	0,11	0,04	0,11	0,03
L9	0,09	0,03	0,013	0,004	0,11	0,04	0,11	0,04
L10	0,09	0,03	0,015	0,005	0,11	0,04	0,11	0,04

**Tabela 4.11** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PP1, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Retorno 1		Retorno 2	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,53	0,03	0,0010	0,0003	0,003	0,001
L2	1,07	0,06	0,002	0,001	0,005	0,002
L3	1,6	0,1	0,003	0,001	0,006	0,002
L4	2,1	0,1	0,004	0,001	0,007	0,002
L5	2,6	0,2	0,004	0,001	0,007	0,002
L6	2,8	0,2	0,005	0,002	0,008	0,002
L7	3,2	0,2	0,006	0,002	0,008	0,003
L8	3,8	0,2	0,007	0,002	0,009	0,003
L9	4,4	0,3	0,008	0,003	0,01	0,003
L10	4,9	0,3	0,010	0,003	0,011	0,003

**Tabela 4.12** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nas travessas do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Travessa 1		Travessa 2		Travessa 3	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,56	0,03	0,04	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01
L2	1,11	0,07	0,04	0,01	0,05	0,02	0,04	0,01
L3	1,7	0,1	0,04	0,01	0,05	0,02	0,04	0,01
L4	2,2	0,1	0,05	0,01	0,06	0,02	0,04	0,01
L5	2,7	0,2	0,05	0,01	0,06	0,02	0,05	0,01
L6	2,9	0,2	0,05	0,01	0,06	0,02	0,05	0,01
L7	3,4	0,2	0,05	0,02	0,06	0,02	0,05	0,01
L8	4,0	0,2	0,05	0,02	0,06	0,02	0,05	0,01
L9	4,5	0,3	0,05	0,02	0,06	0,02	0,05	0,01
L10	5,0	0,3	0,05	0,02	0,06	0,02	0,05	0,02

Leitura	Travessa 4		Travessa 5		Travessa 6	
	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,04	0,01	0,05	0,02	0,05	0,02
L2	0,05	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02
L3	0,05	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02
L4	0,05	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02
L5	0,05	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02
L6	0,05	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02
L7	0,06	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02
L8	0,06	0,02	0,06	0,02	0,07	0,02
L9	0,06	0,02	0,06	0,02	0,07	0,02
L10	0,06	0,02	0,06	0,02	0,07	0,02

**Tabela 4.13** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault, em watts, nos retornos do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Retorno 1		Retorno 2		Retorno 3	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,56	0,03	0,020	0,006	0,012	0,004	0,013	0,004
L2	1,11	0,07	0,04	0,01	0,023	0,008	0,024	0,008
L3	1,7	0,1	0,05	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01
L4	2,2	0,1	0,06	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01
L5	2,7	0,2	0,07	0,02	0,05	0,01	0,04	0,01
L6	2,9	0,2	0,07	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02
L7	3,4	0,2	0,08	0,03	0,05	0,02	0,05	0,02
L8	4,0	0,2	0,09	0,03	0,06	0,02	0,06	0,02
L9	4,5	0,3	0,10	0,03	0,07	0,02	0,07	0,02
L10	5,0	0,3	0,10	0,03	0,07	0,02	0,07	0,02

Leitura	Retorno 4		Retorno 5		Retorno 6	
	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,013	0,004	0,011	0,004	0,015	0,005
L2	0,023	0,007	0,022	0,007	0,027	0,009
L3	0,03	0,01	0,03	0,01	0,04	0,01
L4	0,04	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01
L5	0,04	0,01	0,04	0,01	0,05	0,02
L6	0,04	0,01	0,04	0,01	0,05	0,02
L7	0,05	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02
L8	0,05	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02
L9	0,06	0,02	0,06	0,02	0,07	0,02
L10	0,06	0,02	0,06	0,02	0,07	0,02

**Tabela 4.14** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PPI, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perdas Totais nas Travessas e Retornos	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,53	0,03	0,3	0,1
L2	1,07	0,06	0,4	0,1
L3	1,6	0,1	0,5	0,2
L4	2,1	0,1	0,6	0,2
L5	2,6	0,2	0,6	0,2
L6	2,8	0,2	0,6	0,2
L7	3,2	0,2	0,7	0,2
L8	3,8	0,2	0,7	0,2
L9	4,4	0,3	0,8	0,2
L10	4,9	0,3	0,8	0,3

**Tabela 4.15** - Valores de corrente e potência dissipada por correntes de Foucault total, em watts, nas travessas e retornos do protótipo PP2, bem como os seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perdas Totais nas Travessas e Retornos	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,56	0,03	0,4	0,1
L2	1,11	0,07	0,5	0,1
L3	1,7	0,1	0,5	0,2
L4	2,2	0,1	0,5	0,2
L5	2,7	0,2	0,6	0,2
L6	2,9	0,2	0,6	0,2
L7	3,4	0,2	0,6	0,2
L8	4,0	0,2	0,6	0,2
L9	4,5	0,3	0,6	0,2
L10	5,0	0,3	0,6	0,2

Desta forma, para toda a estrutura ferromagnética dos protótipos, as perdas totais provocadas pelo efeito das correntes de Foucault serão dadas pela soma entre as perdas nos núcleos, travessas e retornos. As Tabelas 4.16 e 4.17 mostram os valores finais destas perdas em cada protótipo.

**Tabela 4.16** - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PP1, bem como o seu erro absoluto.

Leitura	Corrente		Perdas totais nos núcleos		Perdas totais nas travessas e retornos		Perdas totais na estrutura	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{fouc}}(\text{w})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,53	0,03	5	2	0,4	0,1	5	2
L2	1,07	0,06	6	2	0,5	0,1	7	2
L3	1,6	0,1	7	2	0,5	0,2	7	2
L4	2,1	0,1	7	2	0,5	0,2	8	2
L5	2,6	0,2	7	2	0,6	0,2	8	3
L6	2,8	0,2	7	2	0,6	0,2	8	3
L7	3,2	0,2	8	2	0,6	0,2	8	3
L8	3,8	0,2	8	3	0,6	0,2	9	3
L9	4,4	0,3	8	3	0,6	0,2	9	3
L10	4,9	0,3	8	3	0,6	0,2	9	3

**Tabela 4.17** - Perdas totais por correntes de Foucault no protótipo PP2, bem como o seu erro absoluto.

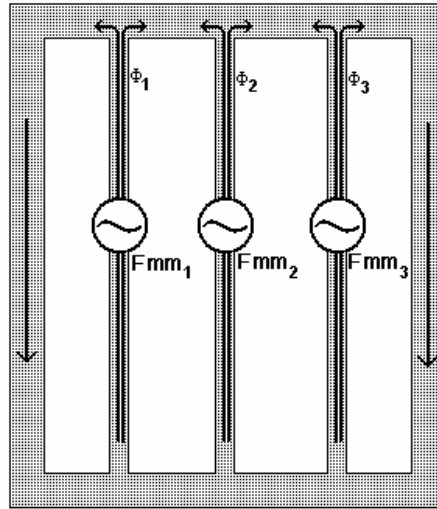
Leitura	Corrente		Perdas totais nos núcleos		Perdas totais nas travessas e retornos		Perdas totais na estrutura	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$	$P_{fouc}(w)$	$\Delta P(w)$
L1	0,56	0,03	4	1	0,3	0,1	4	1
L2	1,11	0,07	5	2	0,4	0,1	5	2
L3	1,7	0,1	6	2	0,5	0,2	7	2
L4	2,2	0,1	6	2	0,6	0,2	7	2
L5	2,7	0,2	6	2	0,6	0,2	7	2
L6	2,9	0,2	6	2	0,6	0,2	7	2
L7	3,4	0,2	6	2	0,7	0,2	7	2
L8	4	0,2	7	2	0,7	0,2	8	2
L9	4,5	0,3	7	2	0,8	0,2	8	2
L10	5	0,3	7	2	0,8	0,3	8	3

### 4.3 Perdas por histerese

Da mesma forma que os protótipos com ligação em série, os protótipos PP1 e PP2 se submetem a um regime de operação que impossibilita uma definição sobre um caminho percorrido por cada um dos fluxos magnéticos criados por cada uma das fontes geradoras.

Pelo comportamento observado nas travessas que interligam as unidades trifásicas do protótipo PP1 e pelo fato do protótipo PP2 ter estruturas independentes, as fontes geradoras de fluxo magnético que estão sendo impostas nas estruturas trifásicas possuem um caminho médio diferente dos protótipos série, donde se conclui que o fluxo magnético está concentrado a cada uma das estruturas trifásicas.

A Figura 4.18 reflete esta informação de forma mais clara.



**Figura 4.18** – Circuito magnético existente nas estruturas dos protótipos.

O comportamento da forma de onda dos fluxos criados por cada uma destas fontes é bem próximo do senoidal o que faz com que esta parcela de perdas, também se concentre em baixas induções, ao contrário dos reatores saturados com ligação em série que possuem formas de onda extremamente distorcidas.

Esta concentração em baixas frequências garante uma simplicidade para estudo das parcelas de perdas, pois se reduz ao máximo o uso das decomposições harmônicas e mesmo quando usada, é em baixas frequências.

O mesmo método da potência de magnetização utilizado nos protótipos série é utilizado para encontrar esta parcela mensurável. Nestes protótipos, foram verificadas as defasagens angulares entre as curvas do fluxo magnético e da  $fmm$  o que confirmou o mesmo comportamento que aconteceu nos protótipos com ligação em série.

As Tabelas 4.18 e 4.19 mostram os valores de potência de magnetização produzida por cada uma das  $\Im mm$ 's dos núcleos, quando se utiliza a Equação 2.43, aqui renomeada de 4.5:

$$P_{mag} = P_0 + \frac{2}{\pi} \sum_{h=0}^{\infty} \frac{P_{2h+1}}{2h+1} \cos(\varphi_{2h+1}) \text{ [W]} \quad (4.5)$$

Tabela 4.18 - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PPI.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,53	0,03	0,05	0,01	0,05	0,01	0,07	0,01	0,06	0,01
L2	1,07	0,06	0,13	0,03	0,12	0,03	0,14	0,03	0,14	0,03
L3	1,6	0,1	0,21	0,04	0,19	0,04	0,21	0,05	0,22	0,05
L4	2,1	0,1	0,29	0,06	0,27	0,06	0,29	0,06	0,31	0,07
L5	2,6	0,2	0,35	0,07	0,32	0,07	0,35	0,07	0,38	0,08
L6	2,8	0,2	0,38	0,08	0,36	0,08	0,38	0,08	0,42	0,09
L7	3,2	0,2	0,5	0,1	0,42	0,09	0,45	0,09	0,5	0,1
L8	3,8	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,6	0,1
L9	4,4	0,3	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,7	0,1
L10	4,9	0,3	0,7	0,2	0,7	0,1	0,7	0,1	0,8	0,2
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,06	0,01	0,07	0,02	0,06	0,01	0,06	0,01	0,06	0,01
L2	0,14	0,03	0,16	0,03	0,13	0,03	0,14	0,03	0,14	0,03
L3	0,14	0,03	0,26	0,05	0,21	0,04	0,21	0,04	0,21	0,04
L4	0,22	0,05	0,34	0,07	0,28	0,06	0,28	0,06	0,29	0,06
L5	0,31	0,06	0,41	0,09	0,35	0,07	0,34	0,07	0,36	0,07
L6	0,42	0,09	0,5	0,1	0,38	0,08	0,37	0,08	0,39	0,08
L7	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,44	0,09	0,5	0,1
L8	0,6	0,1	0,6	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1
L9	0,7	0,1	0,7	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1
L10	0,8	0,2	0,8	0,2	0,7	0,2	0,7	0,1	0,7	0,2



Tabela 4.19 - Potência de magnetização criada por cada um dos núcleos do protótipo PP2.

Leitura	Corrente		Núcleo 1		Núcleo 2		Núcleo 3		Núcleo 4	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,56	0,03	0,045	0,009	0,05	0,01	0,05	0,01	0,06	0,01
L2	1,11	0,07	0,12	0,03	0,12	0,02	0,12	0,03	0,16	0,03
L3	1,7	0,1	0,19	0,04	0,18	0,04	0,19	0,04	0,24	0,05
L4	2,2	0,1	0,27	0,06	0,26	0,05	0,27	0,06	0,35	0,07
L5	2,7	0,2	0,33	0,07	0,32	0,07	0,34	0,07	0,43	0,09
L6	2,9	0,2	0,35	0,07	0,33	0,07	0,36	0,08	0,5	0,1
L7	3,4	0,2	0,42	0,09	0,40	0,09	0,43	0,09	0,6	0,1
L8	4,0	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,7	0,1
L9	4,5	0,3	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,8	0,2
L10	5,0	0,3	0,7	0,1	0,6	0,1	0,7	0,1	0,9	0,2
Leitura	Núcleo 5		Núcleo 6		Núcleo 7		Núcleo 8		Núcleo 9	
	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,07	0,01	0,07	0,01	0,06	0,01	0,07	0,01	0,06	0,01
L2	0,16	0,03	0,16	0,03	0,15	0,03	0,16	0,03	0,14	0,03
L3	0,26	0,05	0,25	0,05	0,25	0,05	0,25	0,05	0,23	0,05
L4	0,35	0,07	0,34	0,07	0,35	0,07	0,35	0,07	0,31	0,07
L5	0,43	0,09	0,43	0,09	0,44	0,09	0,44	0,09	0,40	0,08
L6	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,41	0,09
L7	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,5	0,1
L8	0,7	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	0,6	0,1
L9	0,8	0,2	0,8	0,2	0,8	0,2	0,8	0,2	0,7	0,2
L10	0,9	0,2	0,9	0,2	0,9	0,2	0,9	0,2	0,8	0,2

Tabela 4.20 - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PP1, bem como seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perda de magnetização média por núcleo		Perda de magnetização total na estrutura	
	$I_m(A)$	$\Delta I_m(A)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$	$P_{mag}(W)$	$\Delta P(w)$
L1	0,53	0,03	0,11	0,01	0,5	0,1
L2	1,07	0,06	0,25	0,04	1,2	0,3
L3	1,6	0,1	0,39	0,06	1,9	0,4
L4	2,1	0,1	0,53	0,07	2,6	0,5
L5	2,6	0,2	0,6	0,1	3,2	0,7
L6	2,8	0,2	0,7	0,1	3,6	0,7
L7	3,2	0,2	0,8	0,1	4,2	0,9
L8	3,8	0,2	1,0	0,1	5	1
L9	4,4	0,3	1,2	0,1	6	1
L10	4,9	0,3	1,3	0,1	7	1

Uma estimativa das perdas magnéticas em reatores com saturação natural

**Tabela 4.21** - Corrente, potência de magnetização média criada nos núcleos e potência de magnetização total do protótipo PP2, bem como seus erros absolutos.

Leitura	Corrente		Perda de magnetização média por núcleo		Perda de magnetização total na estrutura	
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{\text{mag}}(\text{W})$	$\Delta P(\text{w})$	$P_{\text{mag}}(\text{W})$	$\Delta P(\text{w})$
L1	0,56	0,03	0,06	0,01	0,55	0,09
L2	1,11	0,07	0,14	0,03	1,3	0,3
L3	1,7	0,1	0,23	0,05	2,1	0,4
L4	2,2	0,1	0,32	0,07	2,9	0,6
L5	2,7	0,2	0,40	0,08	3,6	0,8
L6	2,9	0,2	0,44	0,09	4,0	0,8
L7	3,4	0,2	0,5	0,1	4,9	0,9
L8	4,0	0,2	0,6	0,1	5,7	0,9
L9	4,5	0,3	0,7	0,2	7	2
L10	5,0	0,3	0,8	0,2	7	2

Uma terceira parcela das perdas magnéticas também é considerada para este tipo de reator saturado. É obtida da mesma forma que no modelo série dada pela Equação 3.31. Infelizmente, o seu cálculo bastante complexo limita esta parcela apenas na teoria, não chegando ao campo prático com o intuito de medi-la de forma direta, através das grandezas existentes na Equação 3.30.

Estudos existentes nesta área utilizam apenas a forma direta de calcular esta perda não chegando a calcular cada uma de suas grandezas.

A parcela referente às perdas no ferro foi obtida através do registrador. Este equipamento fez a aquisição dos valores de potência ativa solicitada pelos protótipos e, a parcela de perdas no ferro é obtida quando se subtrai desta potência ativa, a parcela referente à potência dissipada nos enrolamentos.

As Tabelas 4.22 e 4.23 mostram todas as parcelas existentes nos materiais ferromagnéticos dos protótipos PP1 e PP2.

Tabela 4.22 – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PP1.

Leitura	Corrente		Potência Total no ferro Medido		Perdas por Foucault total na estrutura		Potência de magnetização total na estrutura		Perda por excesso
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{tfe}(\text{W})$	$\Delta P_{tfe}(\text{W})$	$P_{fouc}(\text{W})$	$\Delta P_{fouc}(\text{W})$	$P_{mag}(\text{W})$	$\Delta P_{mag}(\text{W})$	
L1	0,53	0,03	34,0	0,4	5	2	0,5	0,1	26
L2	1,07	0,06	41,6	0,6	7	2	1,2	0,3	31
L3	1,6	0,1	46,0	0,8	7	2	1,9	0,4	34
L4	2,1	0,1	49	1	8	2	2,6	0,5	35
L5	2,6	0,2	53	1	8	3	3,2	0,7	36
L6	2,8	0,2	54	2	8	3	3,6	0,7	37
L7	3,2	0,2	58	2	8	3	4,2	0,9	40
L8	3,8	0,2	63	3	9	3	5	1	43
L9	4,4	0,3	68	3	9	3	6	1	45
L10	4,9	0,3	73	4	9	3	7	1	49

Tabela 4.23 – Valores de cada parcela das perdas existentes no material ferromagnético do protótipo PP2.

Leitura	Corrente		Potência Total no ferro Medido		Perdas por Foucault total na estrutura		Potência de magnetização total na estrutura		Perda por excesso
	$I_m(\text{A})$	$\Delta I_m(\text{A})$	$P_{tfe}(\text{W})$	$\Delta P_{tfe}(\text{W})$	$P_{fouc}(\text{W})$	$\Delta P_{fouc}(\text{W})$	$P_{mag}(\text{W})$	$\Delta P_{mag}(\text{W})$	
L1	0,56	0,03	27,8	0,3	4	1	0,55	0,09	22
L2	1,11	0,07	35,0	0,5	5	2	1,3	0,3	26
L3	1,7	0,1	39,6	0,8	7	2	2,1	0,4	27
L4	2,2	0,1	44	1	7	2	2,9	0,6	30
L5	2,7	0,2	49	1	7	2	3,6	0,8	34
L6	2,9	0,2	50	2	7	2	4,0	0,8	35
L7	3,4	0,2	55	2	7	2	4,9	0,9	38
L8	4,0	0,2	62	3	8	2	5,7	0,9	42
L9	4,5	0,3	70	4	8	2	7	2	49
L10	5,0	0,3	79	4	8	3	7	2	55

Neste tipo de reator saturado, pelo fato de apresentar formas de onda das induções magnéticas pouco distorcidas ao longo de toda estrutura, as perdas aqui mensuráveis têm seus valores baixos em relação às perdas totais medidas, conforme as Tabelas 4.22 e 4.23. Nestes reatores saturados, a parcela referente às perdas por excesso aparece em maior quantidade chegando a ser 70% das perdas totais, mesmo considerando os erros de medições.

Quando o protótipo PP1 solicitava uma corrente de 3,8A, a forma de onda da indução magnética imposta a cada um dos núcleos está representada nas Figuras de 4.20 a 4.24, seguindo a ordem numérica mostrada na Figura 4.19.

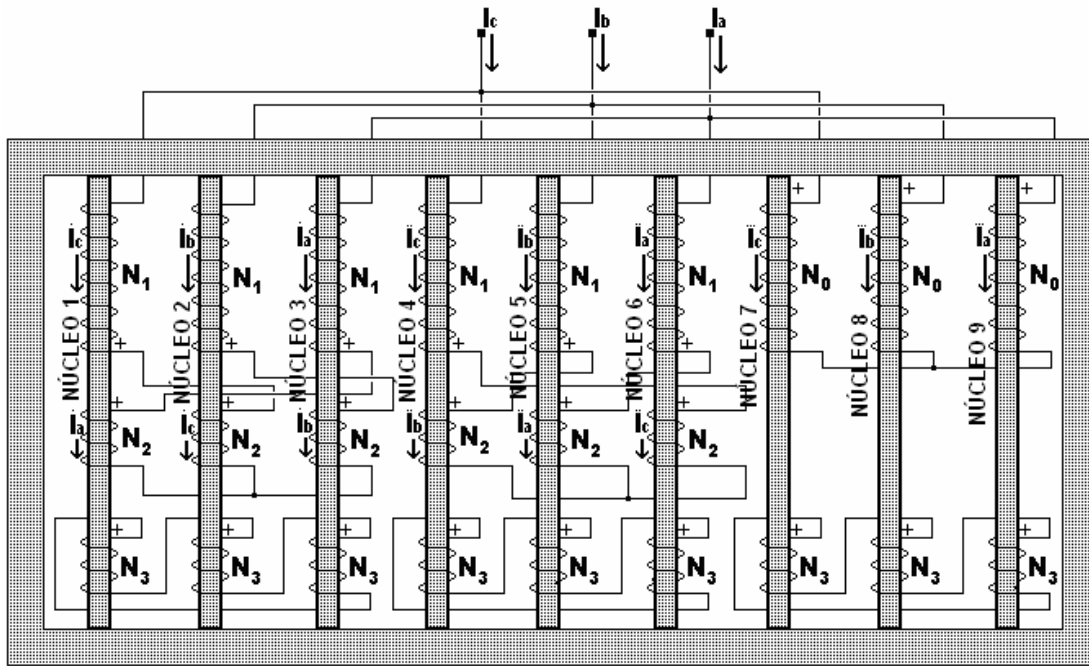


Figura 4.19 – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PP1.

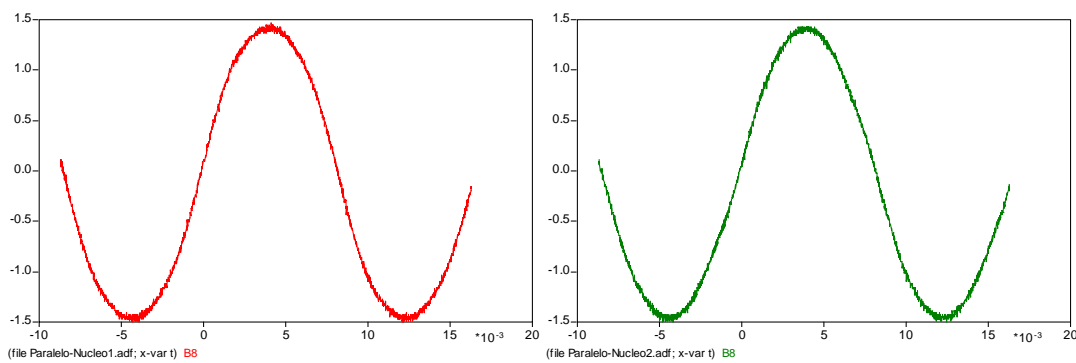


Figura 4.20 - a) Indução magnética no núcleo 1 e b) Indução magnética no núcleo 2.

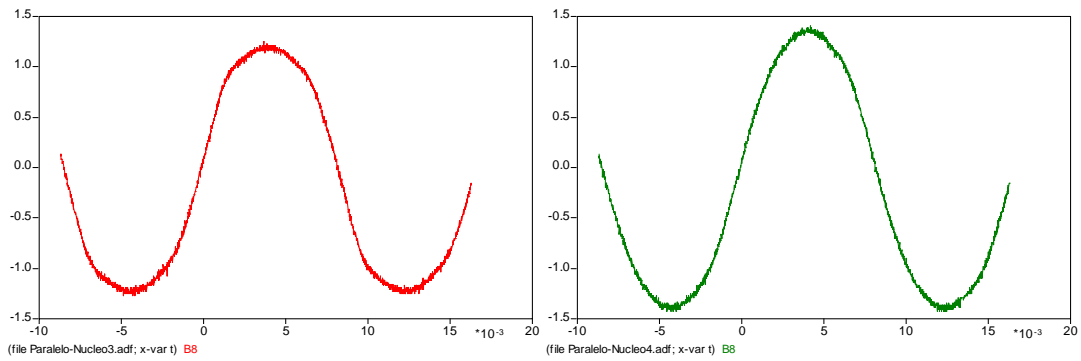


Figura 4.21 - a) Indução magnética no núcleo 3 e b) Indução magnética no núcleo 4.

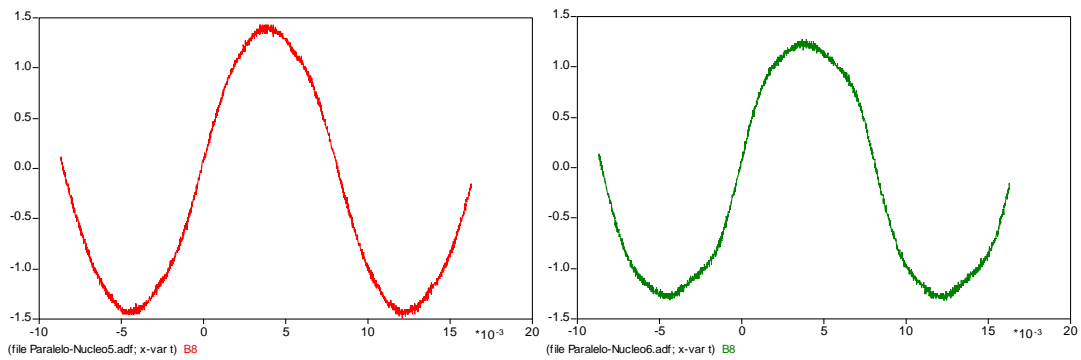


Figura 4.22 - a) Indução magnética no núcleo 5 e b) Indução magnética no núcleo 6.

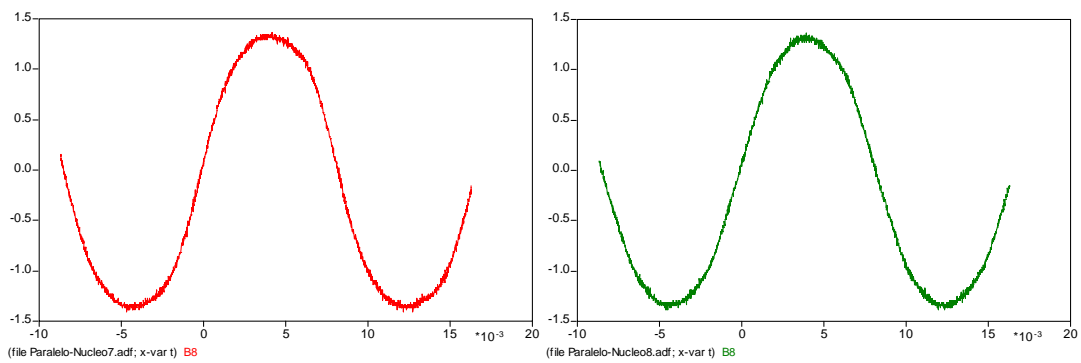


Figura 4.23 - a) Indução magnética no núcleo 7 e b) Indução magnética no núcleo 8.

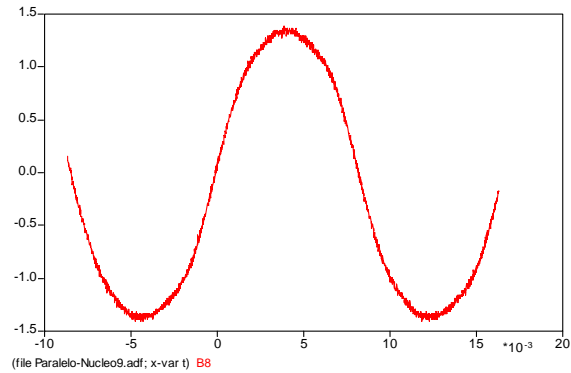


Figura 4.24 - Indução magnética no núcleo 9.

As Figuras 4.26 a 4.30 mostram os comportamentos das induções magnéticas presentes nas travessas e retornos do protótipo PP1, considerando a numeração imposta na Figura 4.25.

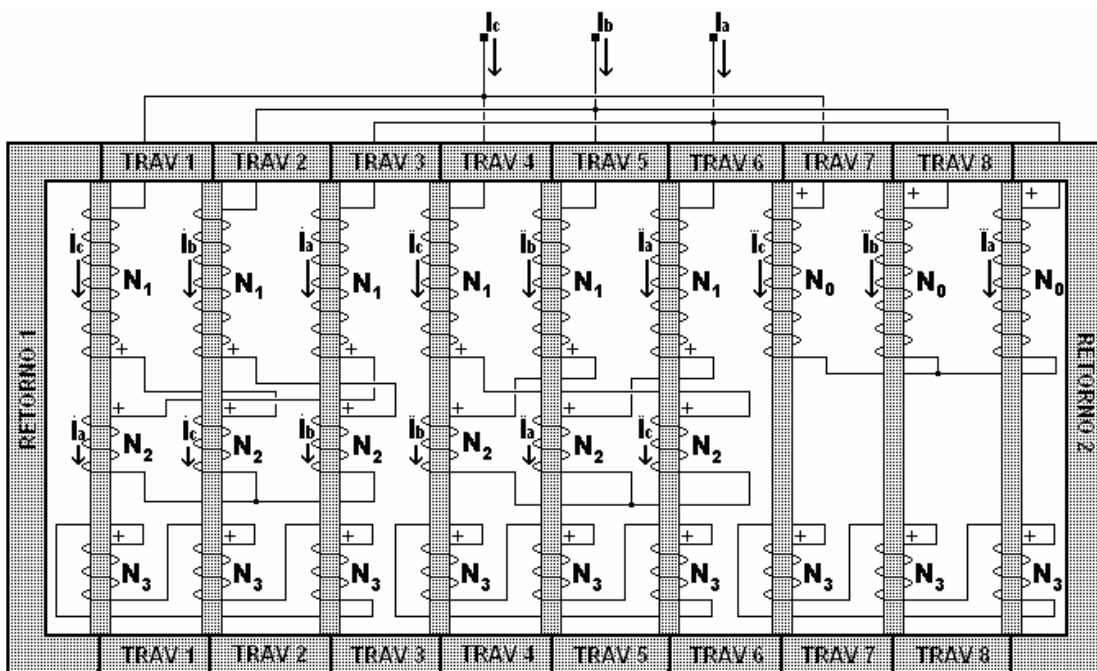
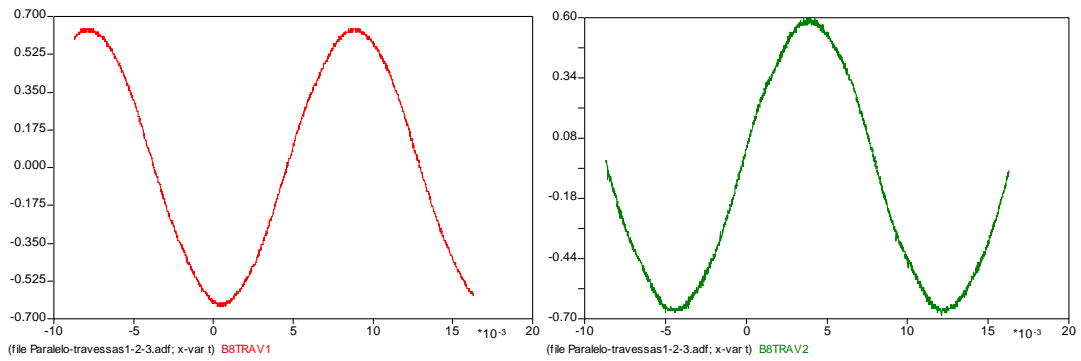
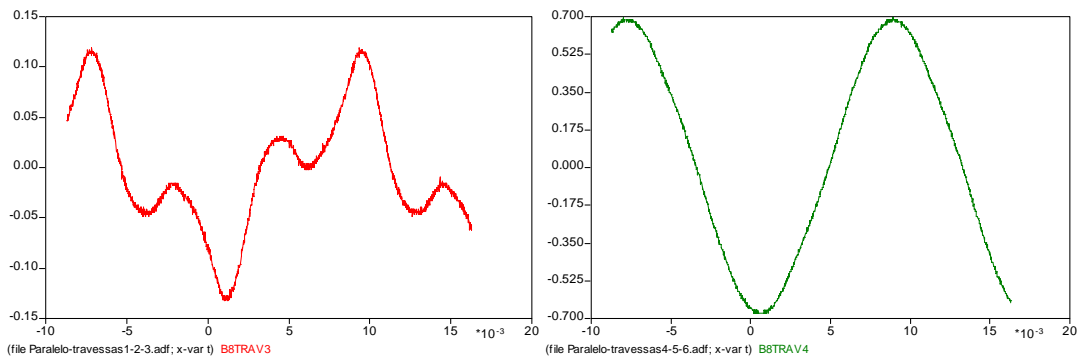


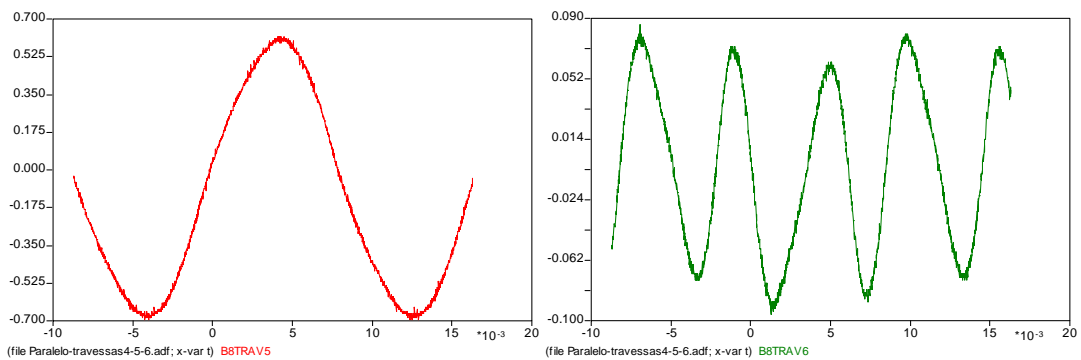
Figura 4.25 – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PP1.



**Figura 4.26 - a) Indução magnética na travessa 1 e b) Indução magnética na travessa 2.**



**Figura 4.27 - a) Indução magnética na travessa 3 e b) Indução magnética na travessa 4.**



**Figura 4.28 - a) Indução magnética na travessa 5 e b) Indução magnética na travessa 6.**

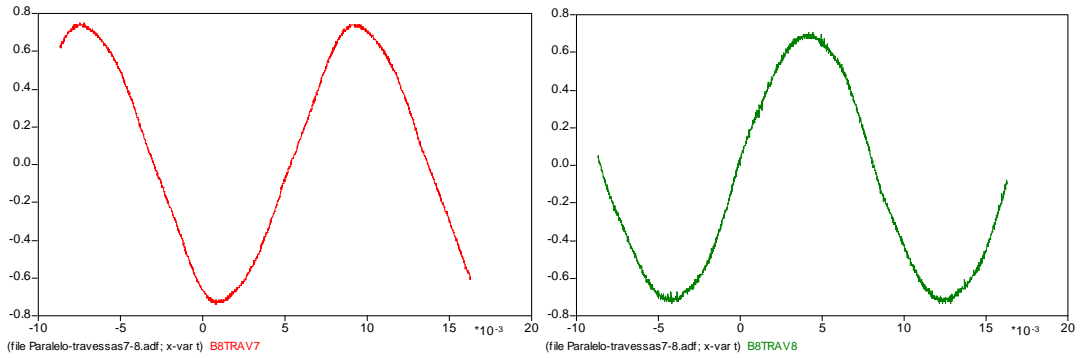


Figura 4.29 - a) Indução magnética na travessa 7 e b) Indução magnética na travessa 8.

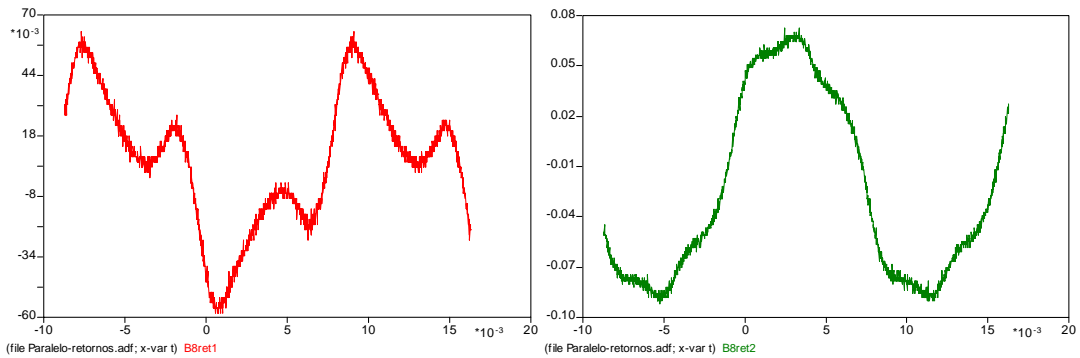


Figura 4.30 - a) Indução magnética no retorno 1 e b) Indução magnética no retorno 2.

Quando o protótipo PP2 solicitava também uma corrente de 4,0A, a forma de onda da indução magnética imposta a cada um dos núcleos está representada nas Figuras de 4.32 a 4.36, seguindo a ordem numérica mostrada na Figura 4.31:

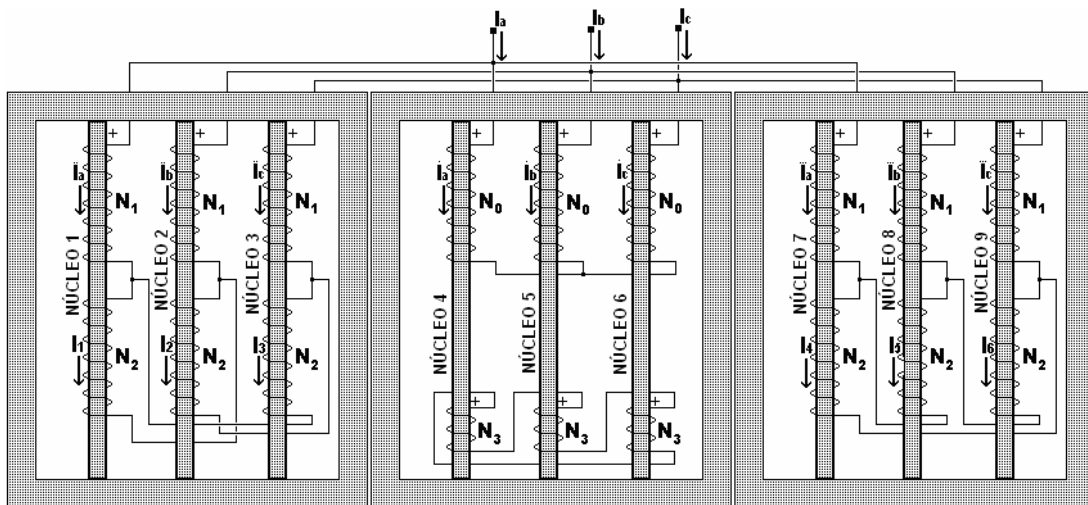
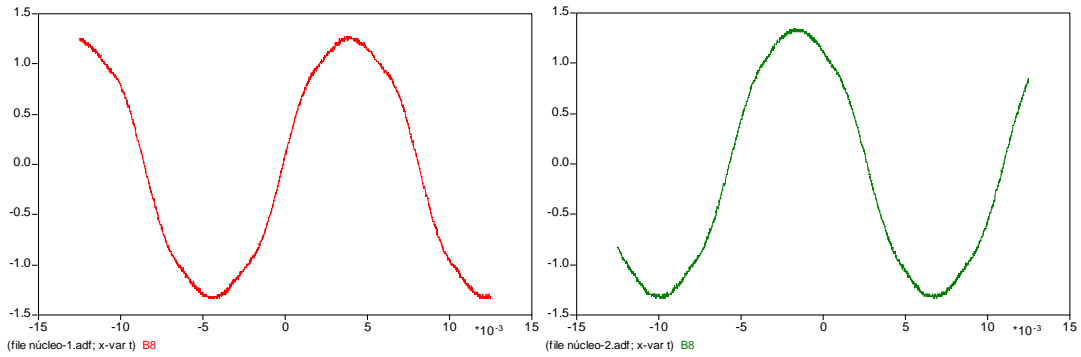
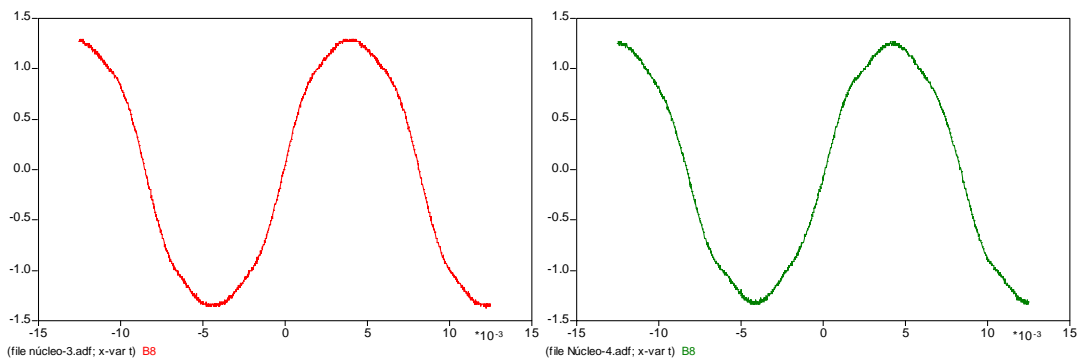


Figura 4.31 – Localização dos núcleos na estrutura ferromagnética do protótipo PP2.

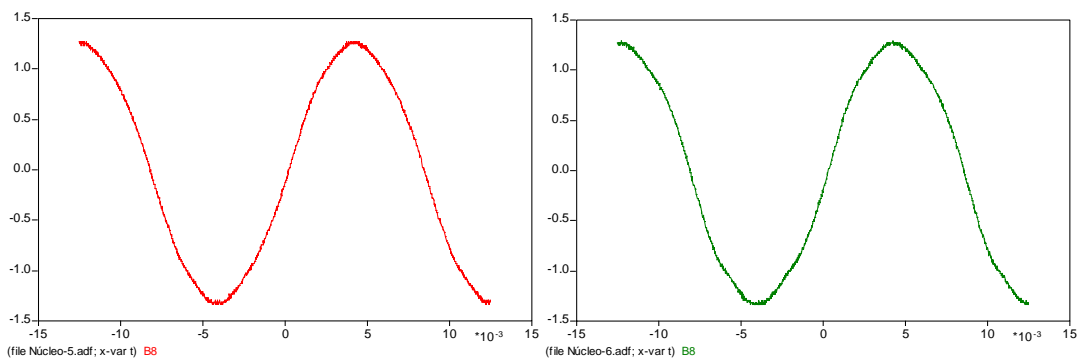




**Figura 4.32 - a) Indução magnética no núcleo 1 e b) Indução magnética no núcleo 2.**



**Figura 4.33 - a) Indução magnética no núcleo 3 e b) Indução magnética no núcleo 4.**



**Figura 4.34 - a) Indução magnética no núcleo 5 e b) Indução magnética no núcleo 6.**

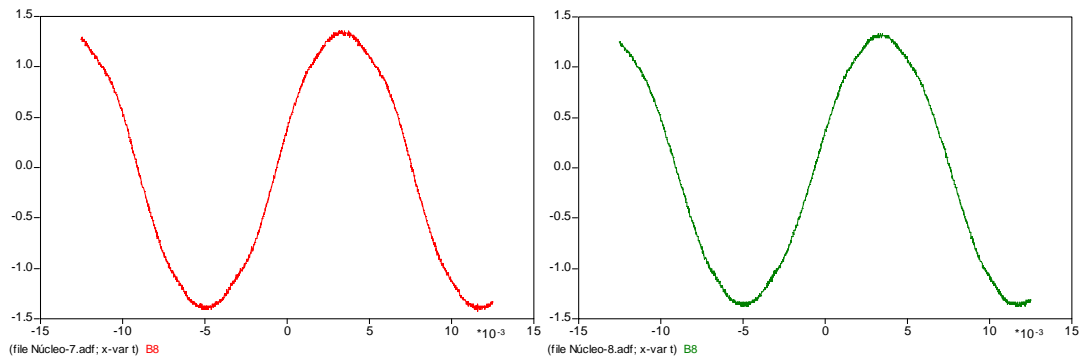


Figura 4.35 - a) Indução magnética no núcleo 7 e b) Indução magnética no núcleo 8.

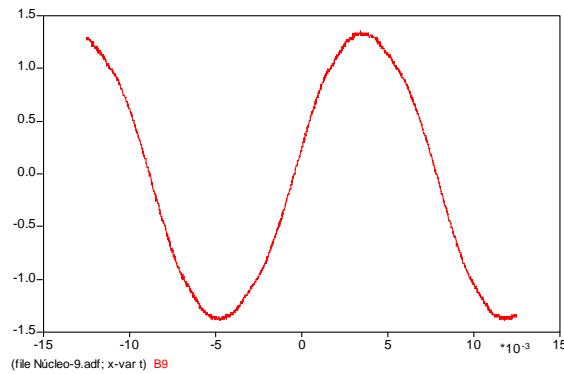


Figura 4.36 - Indução magnética no núcleo 9.

As Figuras 4.38 a 4.43 mostram os comportamentos das induções magnéticas presentes nas travessas e retornos do protótipo PP2, considerando a numeração imposta na Figura 4.37.

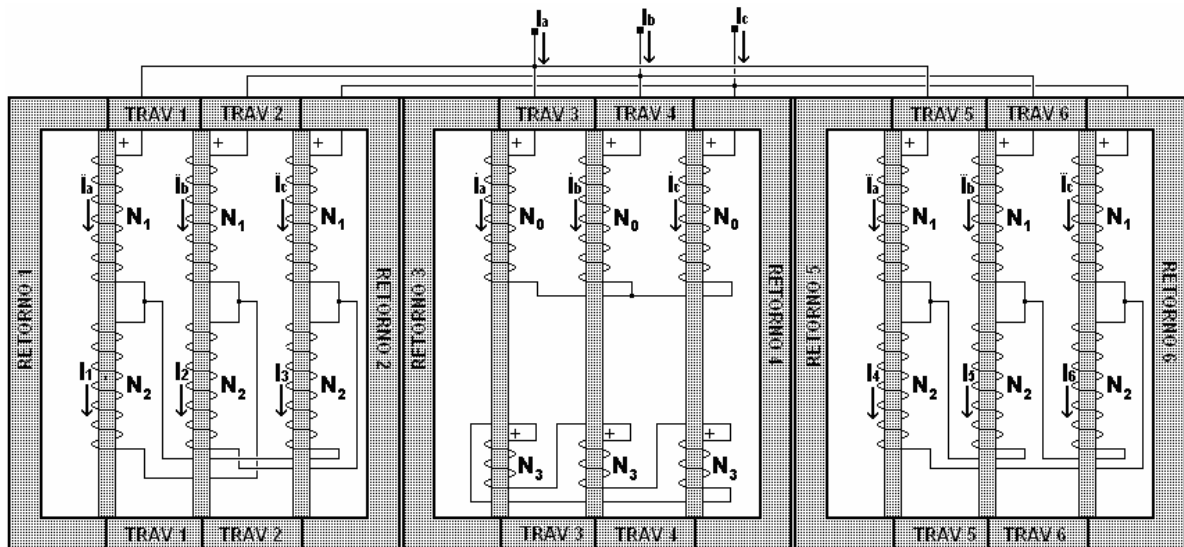


Figura 4.37 – Localização das travessas e retornos na estrutura ferromagnética do protótipo PP1.

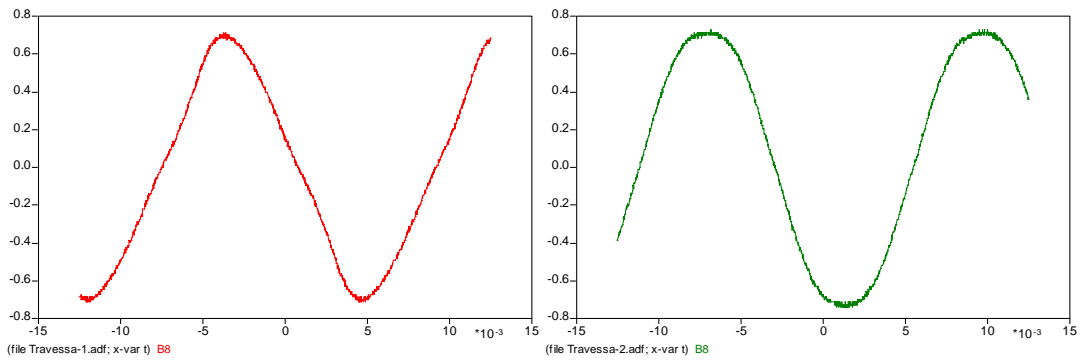


Figura 4.38 - a) Indução magnética na travessa 1 e b) Indução magnética na travessa 2.

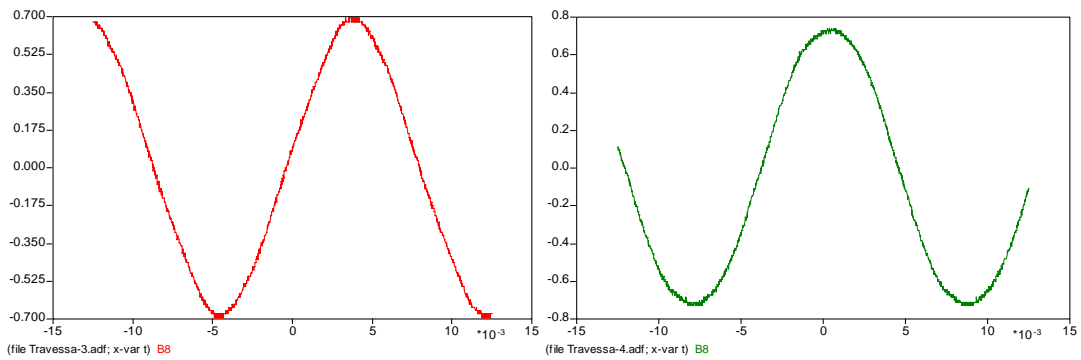


Figura 4.39 - a) Indução magnética na travessa 3 e b) Indução magnética na travessa 4.

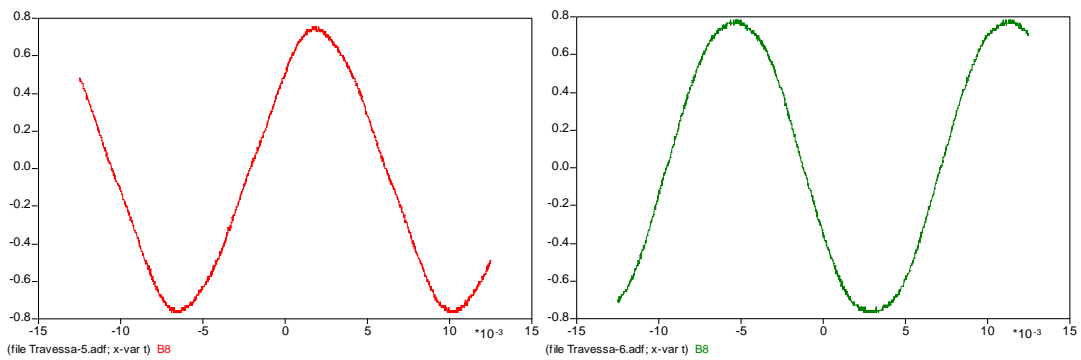
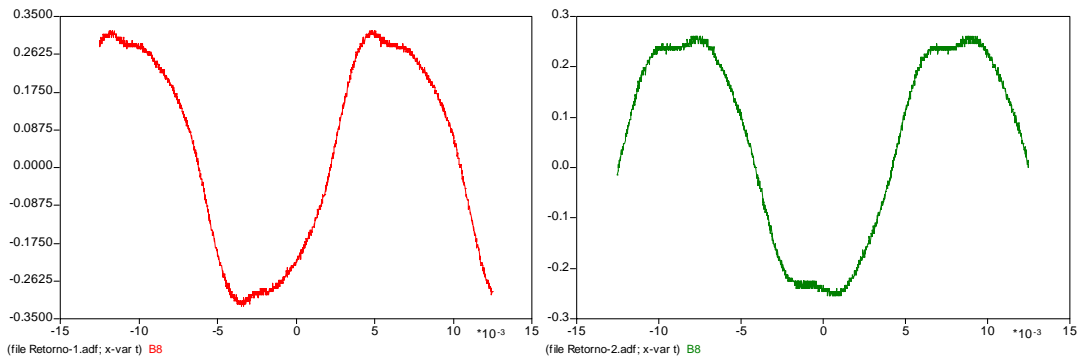
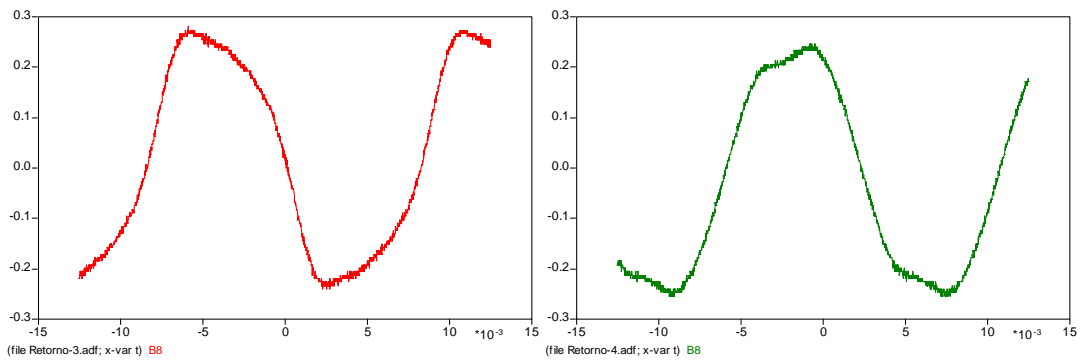


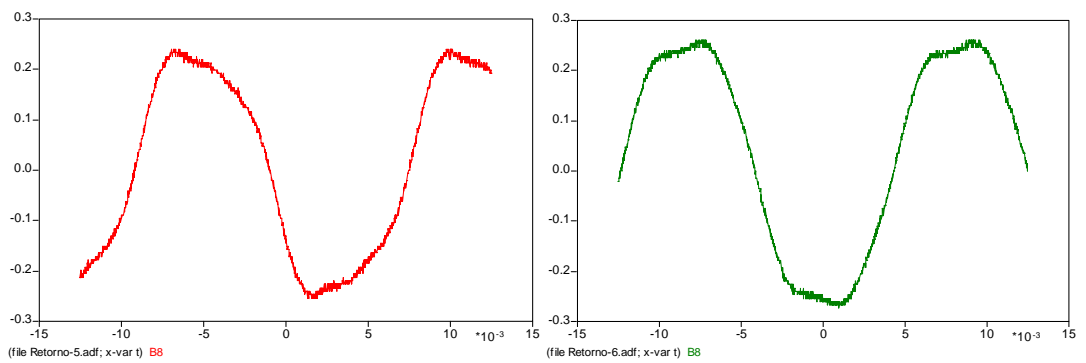
Figura 4.40 - a) Indução magnética na travessa 5 e b) Indução magnética na travessa 6.



**Figura 4.41 - a) Indução magnética no retorno 1 e b) Indução magnética no retorno 2.**



**Figura 4.42 - a) Indução magnética no retorno 3 e b) Indução magnética no retorno 4.**



**Figura 4.43 - a) Indução magnética no retorno 5 e b) Indução magnética no retorno 6.**

## 4.4 Conclusões

Diante dos resultados obtidos, verifica-se um decréscimo de potência dissipada por correntes de Foucault em aproximadamente 50% quando os modelos com ligação em paralelo são comparados aos com ligação em série. Esta condição vem como uma consequência da forma de onda da indução magnética ser menos distorcida. Neste regime de operação, as perdas por correntes de Foucault estão concentradas em baixas frequências e como as perdas dependem diretamente da frequência, é natural que as parcelas sejam menores.

No que diz respeito às perdas por magnetização, as parcelas são bem próximas, mesmo com as suas formas de onda de  $fmm$ 's sendo diferentes, pois conforme foi relatado anteriormente, núcleos com apenas um enrolamento primário tem  $fmm$  diferente do núcleo que possui dois enrolamentos primários.

Como nesta parcela estão embutidas as perdas por Histerese, é de se esperar que haja um valor limite para tais perdas, pois mesmo com diferentes formas de protótipos, tendo volume de material ferromagnético diferente e formas de onda de fluxo magnético diferente, estas parcelas são próximas, o que indica uma possível limitação destas perdas quando a saturação é atingida.

No entanto, a parcela referente às perdas por excesso cresce demasiadamente, sendo a parcela de maior valor entre as três e tendo um comportamento mais definido. Mesmo tendo diferenças construtivas, as perdas totais medidas diretamente nos dois protótipos, têm valores próximos e com um ligeiro aumento para o protótipo PP2 o que de fato é esperado quando se observa a curva característica  $V \times I$  dos dois protótipos.

No capítulo seguinte, é feita uma comparação entre os quatro modelos ensaiados, analisando os resultados, as formas de onda e conclusões sobre o trabalho aqui desenvolvido.

## Conclusões Gerais

Diante da modelagem aqui utilizada para a obtenção das perdas magnéticas em reatores saturados e a separação em três possíveis parcelas: perdas por Foucault, por magnetização e por excesso de correntes induzidas. Foi verificado que os reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série possuem um valor menor de perdas que os reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em paralelo.

As perdas por correntes de Foucault modeladas tiveram uma grande diferença quando foram comparados os modelos com ligação em série aos com ligação em paralelo. As Tabelas 3.22, 3.23, 4.22 e 4.23 garantem tal informação. Esta diferença está associada ao fato de que os reatores saturados com ligação em série possuem, nas formas de onda da indução magnética em todas as partes da estrutura ferromagnética, um grande conteúdo harmônico. Como as perdas por Foucault dependem diretamente do quadrado da frequência, elas tendem a aumentar. Este fato não ocorre nos reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em paralelo, pois as formas de onda da indução magnética submetida aos núcleos têm um comportamento senoidal, sendo também muito pouco distorcidas nas travessas e retornos, o que faz diminuir consideravelmente esta parcela de perdas em comparação aos reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série.

Em relação às perdas pelo processo de magnetização, o que se pode concluir é que independentemente da ligação dos enrolamentos primários, e também do volume do material da estrutura ferromagnética utilizado, os valores encontrados e mostrados nas Tabelas citadas anteriormente, são valores praticamente iguais para um mesmo valor de corrente de alimentação.

Como todos os valores de leitura foram acima do valor necessário para a saturação, os resultados mostram que independentemente do conteúdo harmônico da indução magnética experimentada pelos modelos ensaiados, esta perda está relacionada ao tipo de material magnético utilizado para a construção dos protótipos e o seu aumento é muito lento, o que poderá indicar o seu limite, conforme foi descrito neste trabalho, pois a saturação já foi atingida.

As perdas por excesso de correntes induzidas tiveram comportamentos bem diferentes quando se faz a comparação entre modelos de ligações dos enrolamentos primários. Estas perdas são encontradas de forma direta o que vai depender das perdas totais medidas. Ao somar as perdas por Foucault e por magnetização e comparar este valor com os valores medidos diretamente, é possível verificar que, ao considerar as margens de erro absoluto das leituras para os reatores saturados ligados em série, estes valores são iguais, concluindo que os valores de perdas por excesso possuem um valor baixo ou até simplesmente não existir.

Já para os reatores saturados ligados em paralelo, mesmo considerando a margem de erro absoluto de cada medida, esta parcela tem a maior contribuição das três existentes, detendo cerca de 70% do valor total medido.

Tendo em vista as conclusões acima, fica claro que as perdas magnéticas nas estruturas dos reatores saturados ligados em série poderão ser encontradas diretamente através das modelagens aqui deduzidas sem que ocorram grandes desvios, pois o erro que foi considerado aqui poderá ser menor quando utilizados outros métodos de obtenção das grandezas magnéticas necessárias.

Para os reatores saturados ligados em paralelo dos enrolamentos primários, as perdas totais não poderão ser encontradas apenas pela soma das duas parcelas aqui modeladas pelo fato de que a maior parcela existente neste tipo de reator saturado é referente ao excesso de correntes induzidas e, conforme descrito anteriormente, a modelagem desta parcela depende de grandezas de difícil mensuração e a sua obtenção é evitada ao máximo. A maneira encontrada para obtê-las foi pelo método direto, sendo este, a subtração das parcelas referentes às perdas por Foucault e por magnetização das perdas medidas diretamente.

Portanto, as equações aqui modeladas poderão ser utilizadas, quando são conhecidos as grandezas magnéticas e os seus comportamentos, para a obtenção das perdas magnéticas em estruturas ferromagnéticas sob o regime de saturação, para uma estimativa da sua projeção em reatores saturados com os enrolamentos primários ligados em série, de potência elevada.

## Sugestões para trabalhos futuros

Nos estudos apresentados neste trabalho, foram realizados ensaios para o levantamento das grandezas magnéticas sob configurações específicas. Estas configurações foram escolhidas devido à construção dos protótipos, o que não permitia muitas mudanças. Por exemplo, pode-se citar o protótipo PS1 onde a ordem de saturação está mostrada na Figura 2.5 sendo a seqüência 2, 8, 5, 3, 9, 6, 7, 4, 1.

Para um trabalho futuro, uma idéia seria a busca de uma seqüência ideal para a saturação dos núcleos. Esta seqüência poderia ser obtida da sugestão de utilizar uma seqüência onde se iniciasse com o primeiro núcleo da estrutura e, na seqüência, o segundo a entrar na saturação seria o último, de forma que se tivesse um equilíbrio magnético entre os fluxos criados nestes núcleos.

A idéia central deste estudo é de verificar o comportamento das grandezas magnéticas quando se faz uma distribuição simétrica da seqüência de saturação, fazendo com que se inicie pelos núcleos presentes na extremidade da estrutura indo em direção ao núcleo central.

Esta seqüência deverá ser: 1, 3, 5, 7, 9, 8, 6, 4, 2 o que reproduz perfeitamente o que foi dito. Para isto, deverão ser modificadas as estruturas já construídas para a obtenção desta seqüência. É suposto que esta configuração equilibre o valor de indução experimentada pelas travessas e retornos fazendo com que o valor médio de todas estas partes fossem abaixo do medido e mostrado neste trabalho.

Outro foco de estudo vem da necessidade de travessas e retornos com secções transversais ideais, ou seja, que não experimentem valores muito abaixo do joelho da curva de saturação do material utilizado e nem valores acima do joelho, demandando apenas a quantidade necessária de ferro para tal situação.

Em relação aos protótipos com ligação em paralelo que utilizam estrutura monobloco, como é o caso do protótipo PP1, uma situação interessante seria a substituição desta estrutura em três estruturas sem a presença dos retornos. Esta idéia nasceu a partir dos valores de indução magnética, registrados nas travessas que fazem fronteiras com as estruturas elétricas em paralelo. Estas travessas podem ser visualizadas na Figura 4.14 sendo denominadas de TRAV3 e TRAV6. Os valores máximos de indução magnética encontrados nestas partes são



valores extremamente baixos ao serem comparados aos valores máximos encontrados nas outras partes.

As idéias aqui apresentadas buscam um melhor aproveitamento do material ferromagnético utilizado e, ao mesmo tempo, buscam uma melhor eficiência do equipamento para um melhor custo benefício.

## Referências Bibliográficas

- [1] FONTE, L.A.M., *Reatores Saturados; Alguns aspectos Operacionais e de projeto*. Recife, 1997. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- [2] LEAL, F., *Reatores Saturados com Excitação Paralela*. Recife, 2000. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- [3] FONTE, L.A.M., *Desenvolvimento de reatores com Saturação Natural para Aplicação em Sistemas de Potência*. Recife, 2004. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- [4] BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.
- [5] IEEE, *Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers*, C57.12.91. New York, 1995.
- [6] STEVENSON JR., W. D.. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 1ª Reimpressão. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA., 1975.
- [7] BATISTELA, N. J., *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço Silício*. Florianópolis, 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [8] VECCHIO, R. M; POULIN B.; FEGHALI, P.T.; SHAH, D.M.; AHUJA, R., *TRANSFORMER DESIGN PRINCIPLES With Applications to Core-Form Power Transformers*. Published by Taylor & Francis, 2002.
- [9] M.I.T., E.E. STAFF, *Circuitos magnéticos y transformadores*, Editorial Reverté S.A., Barcelona 1965.
- [10] FIORILLO, F.; NOVIKOV, A., *An Improved Approach to Power Losses in Magnetic Laminations under Nonsinusoidal Induction Waveform*. IEEE Transactions on Magnetic, Vol.26, no.5, September 1990, pp.2904-2910.
- [11] SINNECKER, J. P., *Materiais Magnéticos Doces e Materiais Ferromagnéticos Amorfos*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.22, no.3, Setembro 2000, pp.396-404.
- [12] CHERRY, E. C., *The Duality between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits*. Imperial College, London, June 1948.
- [13] BATISTELA, N. J.; LUZ, M. V. F.; SADOWSKI, N.; CARLSON, R.; BASTOS, J. P. A.; KUO-PENG, P; OLIVEIRA, M. A., *Uma Metodologia de Caracterização Magnética de Aço Silício e Aplicações Na Predição das*

*Perdas Magnéticas sob Regimes de Indução Senoidal e Distorcido.*

- [14] BATISTELA, N. J.; SADOWSKI, N.; CARLSON, R.; LEITE, J. V., *Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e Avaliações das Perdas no Ferro sob vários regimes de indução*. Revista Controle & Automação, Vol.13, no.2, Maio, Jun., Agosto 2002, pp.156-164.
- [15] BERTOTTI, G., *General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, no.1, January 1988, pp.621-630.
- [16] LANCAROTTE, M. S.; PENTEADO, A. A., *Estimation of Core Losses under Sinusoidal or Non-Sinusoidal Induction by Analysis of Magnetization Rate*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.16, no.2, June 2001, pp.174-179.
- [17] CHAN, J. H.; VLADIMIRESCU, A.; GAO, X., C.; LIEBMANN, P.; VALAINIS, J., *Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation*. IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol.10, no.4, April 1991, pp.476-482.
- [18] BARBISIO, E.; FIORILLO, F.; RAGUSA, C., *Predicting Loss in magnetic Steels Under Arbitrary Induction Waveform and With Minor Hysteresis Loops*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, no.4, July 2004, pp.1810-1819.
- [19] ALMEIDA, L. A. L.; DEEP, G. S.; LIMA, A. M. N.; NEFF, H., *Um Modelo Diferencial para Histerese Magnética: Representação Algébrica Recursiva*. Revista Controle & Automação, Vol.14, no.1; Jan., Fev., Março 2003, pp.58-68.
- [20] CRUZ, C. H. B.; FRAGNITO, H. L.; COSTA, I. F.; MELLO, B. A., *Guia para Física Experimental Caderno de Laboratório, Gráficos e Erros*. Instituto de Física Unicamp, Campinas, Setembro de 1997.