

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Estudo sobre o ruído originado pela
magnetostricção em transformadores de potência**

Pedro Miguel Branco da Silva Jorge

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Artur Manuel Figueiredo Fernandes e Costa

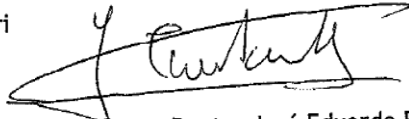
Setembro de 2015

A Dissertação intitulada

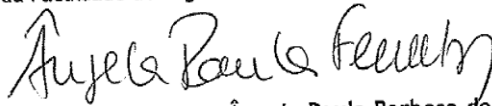
“Estudo Sobre o Ruído Originado pela Magnetostricção em Transformadores de Potência”

foi aprovada em provas realizadas em 23-10-2015

o júri



Presidente **Professor Doutor José Eduardo Roque Neves dos Santos**
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

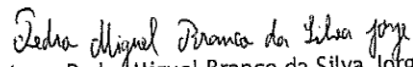


Professora Doutora Ângela Paula Barbosa de Silva Ferreira
Professor Adjunto do Departamento de Eletrotécnica da Escola Superior de
Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança



Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.


Autor - Pedro Miguel Branco da Silva Jorge

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

As principais preocupações na concepção e fabrico de um transformador elétrico são a sua eficiência, fiabilidade, robustez e flexibilidade ao menor custo. Atualmente, tem havido pressão para diminuir a poluição produzida na construção, funcionamento e destruição destas máquinas.

Um aspeto presente e frequentemente negligenciado no funcionamento do transformador elétrico é o ruído produzido pela sua operação que constitui uma fonte de poluição sonora e é cada vez mais um requisito importante destes aparelhos especialmente quando destinadas para zonas próximas de habitações.

O principal objetivo deste trabalho é a caracterização da principal causa do ruído do transformador, a magnetostrição, usando amostras de chapa magnética de grãos orientados e estudando a sua variação perante diferentes valores de indução magnética.

O estudo inicia-se com a explicação do fenómeno do ferromagnetismo e da definição de domínio magnético. É abordado o funcionamento do transformador elétrico e a sua constituição, com detalhe para o núcleo magnético. Caracteriza-se o ruído produzido pelo transformador e definir-se-á o fenómeno da magnetostrição.

Por fim, apresentam-se os resultados da investigação experimental obtidos através de ensaios realizados nos laboratórios da empresa Efacec -Energia, Máquinas e Equipamentos Elétricos S.A e de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Cumpriram-se os objetivos principais deste estudo, as curvas de borboleta da magnetostrição das amostras são interpretadas e relacionadas com o comportamento expectável dos domínios magnéticos da chapa magnética de grãos orientados.

Palavras-Chave: Transformadores Elétricos de Potência, Ruído de Transformadores, Magnetostrição

Abstract

The main concerns in the conception and fabrication of an electric transformer are its efficiency, reliability and flexibility at a low price. In recent years, there has been pressure to reduce the pollution produced by the construction, operation and destruction of these machines.

An existing and frequently neglected issue about the performance of the electric transformer is the noise produced by its operation which constitutes a source of noise pollution and an increasingly important requirement about these machines specially if they are aimed at placement near residential areas.

The main objective of this study is the characterization of the transformer's main noise source, the magnetostriction, using samples of grain-oriented electrical steel and to study its variation for different values of density of magnetic flux.

The study begins with an explanation about the phenomenon of ferromagnetism and the definition of magnetic domain. The electric transformer components and operation are addressed, detailing its magnetic core. The noise produced by the transformer is characterized and the phenomenon of magnetostriction is defined.

Finally, the results obtained from tests carried out in the laboratories at Efacec - Energia, Máquinas e Equipamentos Elétricos S.A. and at Electrical Machines Laboratory of the Faculty of Engineering of Porto are presented. The main goals of this study are accomplished, the magnetostriction's butterfly loops of the samples are interpreted and related to the expected behaviour of the magnetic domains of the grain-oriented magnetic steel.

Keywords: Power Electric Transformers, Electric Transformer Noise, Magnetostriction

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor Artur Costa, pelo forte contributo prestado e rigor exigido durante a realização deste trabalho.

Ao Eng. Ricardo Lopes, Eng. César Vasques e Eng. Luís Braña, pelo auxílio e empenho prestados face aos obstáculos que surgiram.

À minha família e namorada, que me apoiaram fortemente durante este trabalho e desde sempre.

Aos meus amigos, pela preocupação e companheirismo prestados durante todo o meu percurso académico.

Índice

Resumo	iv
Abstract.....	vi
Agradecimentos	viii
Índice	x
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xviii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2	5
Fundamentos de Eletromagnetismo	5
2.1 - A origem do ferromagnetismo	5
2.2 - Conceitos de eletromagnetismo	13
2.3 - Alguns fenómenos magnéticos especiais	16
2.4 - Síntese	18
Capítulo 3	19
Aspetos construtivos e funcionamento do transformador elétrico.....	19
3.1 - Funcionamento do transformador	19
3.2 - Características construtivas	26
3.3 - Núcleo	34
3.4 - Síntese	42
Capítulo 4	45
Magnetostrição e ruído em transformadores	45
4.1 - Caraterização do ruído do transformador	45
4.2 - Fenómeno da magnetostrição	55

4.3 - Síntese	67
Capítulo 5	69
Investigação experimental sobre magnetostricção.....	69
5.1 - Caracterização do equipamento	69
5.2 - Processamento do sinal obtido pela placa de aquisição	77
5.3 - Análise de resultados.....	84
5.4 - Síntese	95
Capítulo 6	97
Conclusão	97
6.1 - Síntese e conclusões	97
6.2 - Perspetivas de trabalhos futuros.....	98
Referências	99

Lista de figuras

Figura 2.1 - Corpo magnético com 4 domínios (1,2,3 e 4) adjacentes.	8
Figura 2.2 - Campo magnético de corpos com vários domínios.	9
Figura 2.3 - Deslocamento lateral das paredes dos domínios devido a um campo magnético externo.....	9
Figura 2.4 - As etapas da magnetização de um corpo, desde a) a magnetização nula pela ausência de campo magnético até d) à saturação.	9
Figura 2.5 - Alterações das estruturas dos domínios no processo de magnetização de um corpo ferromagnético [4].	10
Figura 2.6 - Ampliação da curva de magnetização de um material ferromagnético [1].	11
Figura 2.7 - Visualização dos domínios magnéticos [6].	11
Figura 2.8 - Razão entre a polarização de saturação normalizada e a temperatura de Curie normalizada [1]......	12
Figura 2.9 - Curvas de a) magnetização e b) ciclo de histerese [1].	13
Figura 3.1 - Esquema de um transformador a operar em vazio [14].....	20
Figura 3.2 - Esquema de um transformador a opera rem vazio com a aparelhagem de medição de potência de perdas [15].	23
Figura 3.3 - Esquema de um transformador a opera em vazio com aparelhagem de medição de potência de perdas [15].	24
Figura 3.4 - Condutor com filamentos transpostos [18].	25
Figura 3.5 - Representação da afectação dos fluxos magnéticos parasitas (a) sem shunt magnético e (b) com shunt magnético [18].	26
Figura 3.6 - Exemplo de enrolamento por camada [19].	27
Figura 3.7 - Exemplo de enrolamento duplo helicoidal [19].	27
Figura 3.8 - Exemplo de enrolamento em disco [19].	28

Figura 3.9 - Corte lateral do enrolamento em disco onde se observam as ligações entre níveis [19].	28
Figura 3.10 - Corte lateral de enrolamentos em gallette [21].	28
Figura 3.11 - Exemplo de placas de papel prensado a separar e isolar enrolamentos [19].	30
Figura 3.12 - Transformador elétrico seco [23].	32
Figura 3.13 - Instalação de um tanque de expansão num transformador [20].	33
Figura 3.14 - Transformador de potência trifásico, com o tanque de expansão à esquerda em cima e os radiadores com ventoinhas à direita em baixo [24].	33
Figura 3.15 - Exemplo de laminagem a quente [26].	35
Figura 3.16 - Exemplo de laminagem de frio [27].	36
Figura 3.17 - Estrutura dos domínios antes (à esquerda) e depois (à direita) dos cortes a laser [18].	37
Figura 3.18 - Construção tipo Core de um transformador trifásico [30].	38
Figura 3.19 - Construção tipo couraçado de um transformador trifásico [30].	38
Figura 3.20 - Esquema da circulação dos fluxos magnéticos com núcleo com cinco colunas [19].	39
Figura 3.21 - Inserção de diversos tamanhos de chapa e diferença dos preenchimentos da área limitada pelo enrolamento [12].	39
Figura 3.22 - Montagem embricada em a) SSL e b) MSL [31].	41
Figura 3.23 - Linhas do fluxo magnético na transição entre chapas a a) 90° e b) 45° [31].	41
Figura 3.24 - Núcleo de transformador trifásico com culassas e bandas de aço a fixar as chapas [18].	42
Figura 4.1 - Resultado da medição das frequências naturais no núcleo em estudo [34].	47
Figura 4.2 - Medição do deslocamento e aceleração da chapa do núcleo excitado magneticamente para vários valores de frequência da tensão de alimentação [34].	47
Figura 4.3 - Representação gráfica da atuação das (a) forças de Maxwell e (b) magnetostricção [38].	48
Figura 4.4 - Representação gráfica em vista lateral da atuação das forças de Lorentz nos enrolamentos do transformador [35].	48
Figura 4.5 - Magnetostricção para uma magnetização DC e recozimento de 5 minutos às temperaturas (a) 780 °C, (b) 820 °C e (c) 850 °C, seguidos de um arrefecimento lento [45].	50
Figura 4.6 - Magnetostricção para uma magnetização DC de uma chapa recozida a 800 °C após sofrer o número de impactos indicados nas curvas de um peso de 330 g, a uma altura de 20m [45].	50
Figura 4.7 - Esquema do Sistema de controlo ativo de Conover [51].	53

Figura 4.8 - Testes dos transformadores em condição de circuito aberto [52].	54
Figura 4.9 - Testes dos transformadores em condição de curto-circuito [52].	55
Figura 4.10 - Representação gráfica do fenômeno da magnetostricção. A figura (a) apresenta as alterações dimensionais em resposta a um campo magnético e (b) relaciona a razão $\Delta L/L$ com esse campo magnético [53].	56
Figura 4.11 - Representação gráfica da magnetostricção espontânea: a) representa o estado desordenado (paramagnético) do material acima da temperatura de Curie, b) corresponde ao estado desmagnetizado e ferromagnético abaixo da temperatura de Curie e c) representa o estado ferromagnético e magnetizado até à saturação [4].	57
Figura 4.12 - a) Curvas de magnetização em várias direções dum cristal de ferro [1] e b) representação gráfica das direções num cristal cúbico através dos Índices de Miller.	57
Figura 4.13 - Esquema da elongação provocada pela magnetização de um cristal na direção de fácil magnetização [17].	58
Figura 4.14 - Alteração da orientação dos domínios sem alteração dimensional.	59
Figura 4.15 - Alteração da orientação dos domínios com alteração dimensional do grão previamente magnetizado na direção transversal ao campo magnético externo.	60
Figura 4.16 - Magnetostricção de um cristal de ferro em função da direção da magnetização por parte de um campo magnético externo [54].	60
Figura 4.17 - Exemplo de gráfico de borboleta $\lambda(B)$ para vários valores de campo de indução magnética [47].	61
Figura 4.18 - Relação entre a alteração no comprimento de uma amostra (a vermelho) e a indução magnética que a atravessa [47].	61
Figura 4.19 - Curvas de borboleta de uma amostra na direção longitudinal (a cheio) e na direção transversal (a tracejado) [55].	62
Figura 4.20 - Variação da magnetostricção com a a)variação de frequência [55] e b) variação de temperatura [56].	62
Figura 4.21 - Exemplo de um extensómetro [17].	64
Figura 4.22 - Esquema do funcionamento de um transformador diferencial de variação linear [17]	64
Figura 4.23 - Funcionamento do sensor capacitivo de deslocamento [58].	65
Figura 4.24 - Exemplo de transdutor piezoelétrico [17].	65
Figura 4.25 - Corte transversal de um acelerómetro piezoelétrico [17].	66
Figura 4.26 - Esquema de um interferómetro de Michelson [60].	67
Figura 5.1 - Esquema de juntas em <i>double step-lap</i> [61].	70
Figura 5.2 - Efeito da compensação da indução magnética no ar [62].	71
Figura 5.3 - Esquema de montagem da ponte de Epstein para medição da potência de perdas pelo método do wattímetro [61].	72

Figura 5.4 - Fotografia da ponte de Epstein a utilizar no estudo da dissertação e a identificação dos terminais dos seus circuitos.	72
Figura 5.5 - Esquemas de a) ponte Lloyd-Fisher [63] e b) ponte de Churcher [64].	73
Figura 5.6 - Exemplo de aparelho digital para teste de chapa única [65].	73
Figura 5.7 - Montagem da ponte de Epstein com a aparelhagem de alimentação elétrica e de medição das características elétricas, nas instalações da Efacec e da FEUP.	74
Figura 5.8 - Circuito da ponte de Epstein simulado em Micro-Cap.	74
Figura 5.9 - Chapas magnéticas utilizadas nesta investigação.	75
Figura 5.10 - Extensómetro utilizado na investigação experimental desta dissertação [68]. ..	76
Figura 5.11 - Placa de aquisição de sinal e seus módulos	76
Figura 5.12 - Montagem do circuito para medição da magnetostricção com placa de aquisição em baixo.	77
Figura 5.13 - Curva de borboleta e espetro FFT do sinal de magnetostricção original.	78
Figura 5.14 - Sinal de magnetostricção original (acima, a azul), sinal de magnetostricção filtrado total (abaixo, a preto) e componente estacionária do sinal de magnetostricção filtrado (abaixo, a vermelho).	79
Figura 5.15 - Comparação entre os gráficos dos espetros FFT do sinal de magnetostricção original (a azul), sinal total filtrado (a preto) e sinal filtrado truncado (a vermelho). ..	79
Figura 5.16 - Comparação do comportamento dos filtros Butterworth, Chebyshev Tipo I, Chebyshev Tipo II e Elliptic em modo passa-baixo [70].	80
Figura 5.17 - Comparação entre os espetros FFT dos sinais de magnetostricção filtrados por diferentes filtros.	81
Figura 5.18 - Curvas em borboleta do circuito de 8 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T e h) 1,9 T.	85
Figura 5.19 - Curvas em borboleta do circuito de 8 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T e h) 1,9 T.	85
Figura 5.20 - Curvas em borboleta do circuito de 24 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.	86
Figura 5.21 - Curvas em borboleta do circuito de 24 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.	86
Figura 5.22 - Curvas em borboleta do circuito de 36 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T e f) 1,7.	87
Figura 5.23 - Curvas em borboleta do circuito de 36 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T e f) 1,7.	87

Figura 5.24 - Curvas em borboleta do circuito de 4 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.	88
Figura 5.25 - Curvas em borboleta do circuito de 4 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.	88
Figura 5.26 - Comparação entre curvas de borboleta na direção da laminação obtida por B. Bai e J.Wang [71] e a curva de borboleta obtida neste estudo na mesma direção, para a amostra de 4 chapas magnéticas.	89
Figura 5.27 - Comparação entre curvas de borboleta na direção transversal á da laminação obtida por B. Bai e J.Wang [71] e a curva de borboleta obtida neste estudo na mesma direção, para a amostra de 4 chapas magnéticas.	89
Figura 5.28 - Relação entre o sinal de magnetostricção longitudinal e o sinal de indução magnética, juntamente com a respetiva curva de borboleta $\lambda(B)$, resultante de medições na amostra de 4 chapas.	90
Figura 5.29 - Relação entre o sinal de magnetostricção longitudinal e o sinal de indução magnética, juntamente com a respetiva curva de borboleta $\lambda(B)$, resultante de medições na amostra de 8 chapas.	90
Figura 5.30 - Evolução dos valores máximos de magnetostricção para os circuitos de 4 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).	91
Figura 5.31 - Evolução dos valores máximos de magnetostricção para os circuitos de 8 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).	92
Figura 5.32 - Evolução dos valores máximos de magnetostricção para os circuitos de 24 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).	93
Figura 5.33 - Evolução dos valores máximos de magnetostricção para os circuitos de 36 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).	94
Figura 5.34 - Valores máximos absolutos de magnetostricção a direção longitudinal das amostras analisadas.	95
Figura 5.35 - Valores máximos absolutos de magnetostricção a direção transversal das amostras analisadas.	95

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Razão entre a separação atômica D com o raio r da camada incompleta 3d para os elementos 25 a 28 [1].	6
Tabela 5.1 – Valores máximos de magnetostricção para um circuito com 4 chapas magnéticas	91
Tabela 5.2 – Valores máximos de magnetostricção para um circuito com 8 chapas magnéticas	92
Tabela 5.3 – Valores máximos de magnetostricção para um circuito com 24 chapas magnéticas	93
Tabela 5.4 – Valores máximos de magnetostricção para um circuito com 36 chapas magnéticas	94

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AT	Alta Tensão
BH	Curva Intensidade do Campo Magnético / Indução Magnética
BT	Baixa Tensão
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
f.e.m	Força Eletromotriz
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IEC	<i>Internaticonal Electrotechnical Comission</i>
MSL	<i>Multiple Step-Lap</i>
NSMC	<i>Nanocrystalline Soft Magnetic Composite Material</i>
PCB	<i>Polychlorinated Biphenyl</i>
pm	Partes Por Milhão
SSL	<i>Single Step-Lap</i>

Lista de símbolos

a	Espessura da chapa, em metro
A	Área Transversal, em metro quadrado
B	Indução Magnética, em tesla
B _M	Indução Magnética de Pico, em tesla
cos ϕ	Fator de Potência
D	Distância da Separação Atômica, em nanómetro
E ₁	Força Eletromotriz no Circuito Primário, em volt
E ₂	Força Eletromotriz no Circuito Secundário, em volt
F _L	Força de Lorentz, em newton
F _M	Força de Maxwell, em newton

f	Frequência, em hertz
H	Intensidade do Campo Magnético, em ampere por metro
I_0	Corrente Eficaz em Vazio, em ampere
I_{cc}	Corrente Eficaz em Curto-Circuito, em ampere
J	Densidade de Corrente, em ampere por metro quadrado
k_H	Coefficiente de Steinmetz
L	Comprimento, em metro
n_1	Número de Espiras nos Enrolamentos do Circuito Primário
n_2	Número de Espiras nos Enrolamentos do Circuito Secundário
$P_{dissipada}$	Potência de Perdas de Joule, em watt
P_0	Valor Instantâneo de Potência Absorvida em Vazio, em watt
P_{cc}	Valor Instantâneo de Potência Absorvida em Curto-Circuito, em watt
P_H	Potência de Perdas por Histerese, em watt
r	Raio da Camada Eletrônica, em nanômetro
R_i	Resistência Total do Circuito Secundário, em ohm
V_1	Tensão no Circuito Primário, em volt
V_2	Tensão no Circuito Secundário, em volt
W_H	Energia Total Dissipada pelo Núcleo devido ao Fenômeno da Histerese, em joule
α	Cossenos Direcionais em Relação à Direção da Magnetização
β	Cossenos Direcionais em Relação à Direção da Medição da Deformação, com Respeito aos Eixos do Cristal
σ	Condutividade Elétrica do Material, em siemens por metro
μ_0	Permeabilidade Magnética do Ar, em henry por metro
λ	Magnetostricção
λ_{sat}	Magnetostricção de Saturação
Φ	Fluxo magnético, em weber

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, a gradual utilização de transformadores elétricos tem sido acompanhada por um crescente interesse por transformadores silenciosos, de modo a que a sua instalação na proximidade de pessoas não cause incómodo. Este tem-se tornado um requisito de exclusão crescente, em sede de aquisição e instalação, nomeadamente em casos em que seja preciso incluir um transformador em zonas com bastante densidade populacional.

1.1 - Enquadramento

O ruído e as vibrações são problemas particularmente difíceis de atenuar ou suprimir. No caso dos transformadores elétricos, os métodos de atenuação de ruído incluem, entre outros, o sobredimensionamento do seu núcleo magnético, a inclusão de materiais absorventes de ruído ou ainda o uso de aparelhagem eletrónica, fatores que aumentam o custo final da máquina. Por este motivo, tem-se revelado cada vez mais interesse nesta área com o objetivo de se introduzir no mercado uma nova gama transformadores silenciosos com a mesma qualidade de operação que mais ruidosos e pouca diferença entre preços.

As fontes de ruído em transformadores elétricos estão bem identificadas, sendo a principal a magnetostrição. Este fenómeno consiste na alteração das dimensões de materiais ferromagnéticos quando excitados por campos magnéticos, o que ocorre com os circuitos magnéticos das máquinas elétricas em geral e dos transformadores em particular. Sendo esse fator também complicado de controlar, a investigação deste fenómeno tem vindo a aumentar e tem-se vindo a realçar a sua importância.

1.2 - Objetivos

Este trabalho tem como objetivo fundamental:

- desenvolver um trabalho de investigação experimental com vista à obtenção das características da magnetostricção, conhecidas por “curvas de borboleta”, de várias amostras de chapa magnética, excitadas com vários valores de indução magnética, através de uma ponte de Epstein.

Associado a este objetivo, pretende-se ainda:

- estudar o fenómeno do ferromagnetismo e eletromagnetismo à escala microscópica;
- fazer um estudo sobre o ruído em transformadores elétricos de potência e sobre a origem da magnetostricção;
- caracterizar a ponte de Epstein e o principal equipamento utilizado na investigação experimental;
- obter e interpretar as curvas de borboleta resultantes da magnetostricção das amostras investigadas.

1.3 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada tendo como base os objetivos descritos anteriormente. De início será efetuado um estudo teórico dos fenómenos relacionados com o tema-título desta dissertação, seguido de uma forte componente experimental, onde serão realizados testes com o objetivo de medir as deformações físicas das chapas magnéticas perante vários valores de indução magnética alternada e tirar conclusões acerca do comportamento das amostras e das características de magnetostricção resultantes.

Deste modo, neste capítulo 1, faz-se uma introdução ao tema, identificando os principais objetivos e desafios deste estudo, assim como se apresenta a estruturação da dissertação.

No capítulo 2, é efetuado um estudo sobre certos fundamentos do eletromagnetismo à escala dos domínios magnéticos, sobre o processo da magnetização de um material e explicam-se os fundamentos eletromagnéticos que permitem o funcionamento de um transformador elétrico, assim como outras leis fundamentais do eletromagnetismo.

No capítulo 3, é apresentado um estudo simplificado do funcionamento do transformador, os seus vários modos de operação e as suas características construtivas principais, com destaque para o núcleo magnético, onde se concentra a magnetostricção.

No capítulo 4, é estudado e caracterizado o ruído proveniente do transformador elétrico e são apresentados métodos para a sua atenuação. É ainda explicado o fenómeno da magnetostricção, com os seus inconvenientes e utilidades, assim como são estudados sensores de medição de magnetostricção.

Capítulo 2

Fundamentos de Eletromagnetismo

O magnetismo tem um papel fundamental no funcionamento de um transformador elétrico e sempre foi um fenómeno fascinante devido ao facto de ser invisível a olho nu e apenas se observarem os seus efeitos e às suas propriedades únicas, algumas delas ainda por explicar.

Neste capítulo são analisados alguns aspetos relacionados com este fenómeno e apresentados os princípios elétricos, magnéticos e eletromagnéticos que governam o funcionamento daquela máquina. No final, descrevem-se alguns fenómenos que provocam movimentos ou alterações físicas, incluindo um dos temas desta dissertação, o fenómeno magnético da magnetostrição.

2.1 - A origem do ferromagnetismo

As propriedades elétricas, químicas e magnéticas dos elementos químicos são determinadas pelas camadas eletrónicas (constituídas por eletrões) que rodeiam o núcleo dos seus átomos. Estas camadas encontram-se a uma certa distância do seu núcleo, muitas delas possuem subcamadas e contém diferentes números de eletrões. A quantidade de eletrões por camada aumenta quanto mais distante esta estiver do núcleo e geralmente os eletrões vão preenchendo todas as camadas desde o centro até ao exterior, de modo que as camadas interiores estejam preenchidas e as exteriores possam não estar.

Apesar disto, existem elementos na tabela periódica que possuem eletrões nas camadas exteriores sem que todas as camadas interiores estejam totalmente preenchidas, nomeadamente os que possuam número atómico entre 19 e 28, onde a camada exterior (camada 4s) possui eletrões enquanto a imediatamente interior (camada 3d), encontra-se incompleta. Esta é a primeira de três propriedades que explica o ferromagnetismo dos elementos ferro

(elemento número 26), cobalto (elemento número 27) e níquel (elemento número 28): possuir uma camada não totalmente preenchida de elétrons e não é a exterior.

Em 1911, a partir das experiências de Albert Einstein e Johannes Wander de Haas, provou-se que o momento magnético de um átomo de ferro se devia aos elétrons que o orbitam, sendo que cada elétron possui um momento mecânico angular e um momento magnético. Perante uma magnetização do material, ocorre uma mudança no momento angular dos elétrons e verifica-se movimento do corpo a nível macroscópico. Este fenómeno denomina-se efeito de Einstein-de-Haas [1],[2].

Mais tarde determinaram-se dois tipos de movimentos dos elétrons em torno dos núcleos dos átomos: a órbita à volta do núcleo ou rotação sobre o seu próprio eixo. Este último denomina-se de spin, que pode ser positivo ou negativo.

Nas camadas da nuvem eletrónica totalmente preenchidas o número de spins positivos e negativos é igual, pelo que os momentos de spin são cancelados entre si. No entanto, tal como anteriormente referido, no ferro, cobalto e níquel a camada 3d encontra-se não preenchida, pelo que os momentos de spin não se cancelam, havendo um deles (positivo ou negativo) que sobressai em relação aos outros. Esta é a segunda propriedade que caracteriza os materiais ferromagnéticos.

A terceira propriedade dos elementos 26, 27 e 28 é o fato do ferromagnetismo se exibir maioritariamente em substâncias sólidas cristalinas, onde momento de spin domina, ainda que existam materiais amorfos que, dentro de certas condições, possam ser ferromagnéticos.

Os elétrons da camada exterior dos átomos possuem uma certa liberdade e podem, por exemplo, atuar nos metais como elétrons condutores. Nos grãos, a interação entre átomos ou iões numa estrutura cristalina pode levar a um alinhamento paralelo dos elétrons, existindo, no entanto, uma condição para a ocorrência deste alinhamento: a razão entre a distância entre átomos e o raio da camada incompleta 3d deve ser superior a 3. A tabela 2.1 apresenta os valores da distância entre átomos, o raio da camada 3d e a razão entre eles, para os elementos ferro, cobalto e níquel e, como se verifica, o ferro, o cobalto e o níquel possuem razões superiores a 3.

Tabela 2.1 – Razão entre a separação atómica D com o raio r da camada incompleta 3d para os elementos 25 a 28 [1].

Material	D [nm]	r [nm]	D/r
Elemento 26, Ferro (Fe)	0,250	0,0790	3,26
Elemento 27, Cobalto (Co)	0,251	0,0690	3,64
Elemento 28, Níquel (Ni)	0,25	0,0635	3,94

Concluindo, para ocorrer o ferromagnetismo é necessário que três condições sejam cumpridas simultaneamente:

- Tem de existir uma camada interior não totalmente preenchida nos seus átomos;
- Tem de haver descompensação do spin eletrónico na camada referida na condição anterior;
- Os átomos ou iões devem formar uma estrutura cuja distância entre eles devem ser, pelo menos, o triplo do raio da camada da primeira condição.

De acordo com estudos energéticos, entende-se que nem todos os spins do material ferromagnético estão espontaneamente alinhados como um todo, sendo que o alinhamento engloba um limitado número de átomos. Estes grupos de átomos com o mesmo sentido de spin são chamados de “domínios elementares”, “domínios de Weiss”, ou simplesmente, “domínios”, dentro dos quais o material se encontra, espontaneamente, magnetizado até à saturação, sem qualquer influência externa. A temática dos domínios no magnetismo é explicada em seguida.

2.1.1 - Domínios magnéticos

A teoria dos domínios pretende apresentar uma descrição da histerese existente nos materiais ferromagnéticos e os processos magnéticos que permitem determiná-la [1]. Foi inicialmente indicada por Sir Alfred Ewing como uma teoria molecular, que dividia a matéria em ímanes elementares formados por um ou mais átomos, mas possuía erros (apresentados de seguida), sendo substituída pela teoria dos domínios.

Teoria Molecular de Ewing: observou-se experimentalmente que a relação existente entre a indução magnética B e a intensidade de campo magnético H seguia uma certa relação e, para além disso, ao dividir um íman permanente em pequenas partes, estas conservavam o magnetismo no mesmo sentido que a peça original. Estas considerações originaram a teoria “molecular” do magnetismo por Ewing e William E. Weber.

Segundo esta teoria, cada molécula ou conjunto de átomos de um corpo magnético consiste num íman elementar que possui liberdade de girar à volta do seu centro. Do mesmo modo, colocando em justaposição um número de pequenos ímanes-barras que possam girar livremente e submetendo-os a um campo magnético de intensidade crescente, observa-se que, contrariando a rotação lenta e contínua anterior destes elementos, produz-se uma alteração brusca de sentido e finalmente outra rotação contínua até todos os ímanes se posicionarem em paralelo ao campo magnético submetido. Deste modo, fazendo as somas vectoriais dos campos magnéticos dos ímanes elementares e da intensidade de campo magnético exterior e projetando os resultados nos eixos de coordenadas, obtém-se uma curva com forma similar à curva de magnetização. Conclui-se ainda que a diminuição de suscetibilidade magnética (relação entre a indução magnética no material e a intensidade do campo magnético exterior)

se produz com a elevação da temperatura ao ponto de mudança de material ferromagnético para paramagnético, denominado por ponto ou temperatura de Curie, se devia ao facto das forças de agitação térmica dominarem sobre as forças de atração magnética.

Ainda que esta teoria ofereça uma imagem válida e as suas suposições tenham um certo fundamento, reconhece-se que, tendo em conta os atuais conhecimentos da estrutura dos átomos e dos corpos cristalino, as forças magnéticas entre átomos adjacentes são demasiado fracas para manter o paralelismo entre momentos magnéticos assim que se elimina o campo magnético imposto, pelo que se torna essencial explicar o fenómeno do magnetismo remanescente. Por outro lado, as forças de agitação térmica à temperatura ambiente venceriam facilmente as forças de atração magnética entre os átomos. Ainda assim, a teoria de Ewing foi extremamente útil e a demonstração de uma das suas previsões, o desaparecimento da histerese magnética num campo magnético giratório de grande intensidade, comprova a sua importância.

Teoria dos Domínios: em 1907, Pierre-Ernest Weiss introduziu a teoria do magnetismo dos “domínios” magnéticos, que propõe que um corpo ferromagnético seja composto por muitos e pequenos domínios, cada um deles espontânea e magneticamente saturado, e com sentido de campo magnético usualmente arbitrário; de modo que, quando um corpo não está magnetizado, estes domínios anulam-se entre si [3].

Cada domínio consiste num número de átomos com momentos magnéticos orientados no mesmo sentido. A figura 2.1 mostra, esquematicamente, os domínios de um corpo ferromagnético e os limites que os separam, observando-se que os campos magnéticos dos domínios estão distribuídos de modo a que as linhas de fluxo magnético se fechem e reduzam a energia magnética ao mínimo. No caso de uma amostra composta por um só domínio, as linhas de campo magnético exteriores são também ser fechadas, exemplificado na figura 2.2a). Comportando-se como um íman, esta amostra é bastante sensível à ação de campos magnéticos exteriores. No entanto, aumentando a divisão deste domínio em dois domínios magneticamente opostos (figura 2.2b)), o campo magnético exterior diminui drasticamente, podendo desaparecer totalmente com o aumento das divisões (figura. 2.2c)) [1].

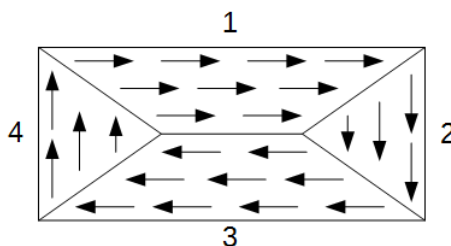


Figura 2.1 - Corpo magnético com 4 domínios (1,2,3 e 4) adjacentes.

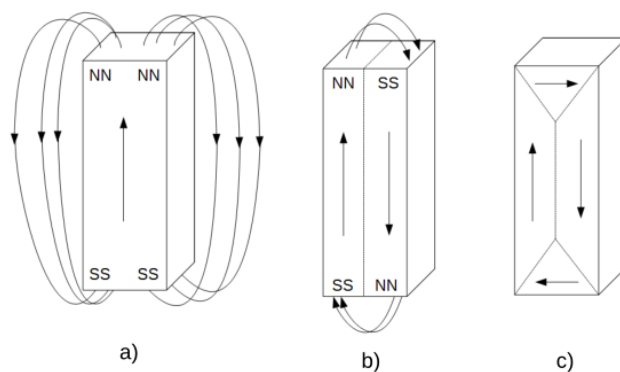


Figura 2.2 - Campo magnético de corpos com vários domínios.

O momento magnético de um domínio é determinado pelo seu volume, pela magnitude e pelo sentido do seu campo magnético, sendo assim possível criar uma alteração do momento magnético alterando o volume ou sentido do domínio. A mudança de volume dos domínios produz-se com o deslocamento das paredes dos domínios, como mostra na figura 2.3, e a mudança no sentido do domínio implica a sua rotação. Supõe-se ainda que estas alterações possam ser reversíveis ou irreversíveis.

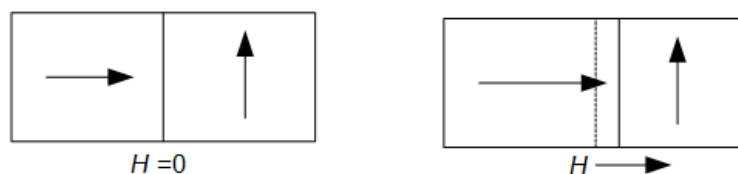


Figura 2.3 - Deslocamento lateral das paredes dos domínios devido a um campo magnético externo.

Relacionando estas alterações com a magnetização de um grupo de domínios, esta última é composta por três modificações principais:

1. Etapa inicial: deslocamento reversível dos limites (figura 2.4b));
2. Etapa intermédia: deslocamento irreversível dos limites (figura. 2.4c));
3. Etapa superior: rotação reversível (figura. 2.4d)) [1].

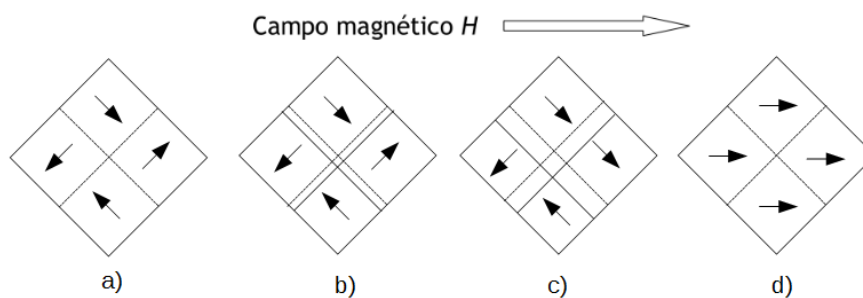


Figura 2.4 - As etapas da magnetização de um corpo, desde a) a magnetização nula pela ausência de campo magnético até d) à saturação.

Acrescentam-se ainda as alterações da estrutura dos domínios num ciclo de magnetização num corpo ferromagnético da figura 2.5.

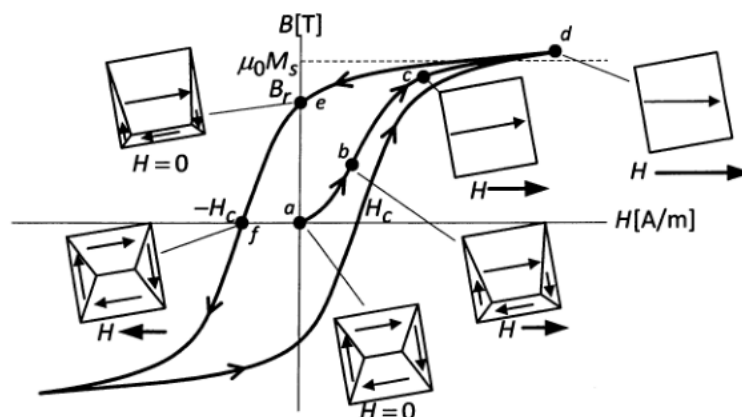


Figura 2.5 - Alterações das estruturas dos domínios no processo de magnetização de um corpo ferromagnético [4].

O domínio de um ferro ocupa um volume aproximado de 10^{-9} cm^3 . Weiss supunha ainda que estariam presentes forças inter-atômicas de grande magnitude que contribuíam para o efeito alinhador do campo aplicado. A existência de tais forças não era conhecida quando Weiss postulou esta teoria mas, em 1928, Werner Heisenberg apresentou uma teoria quântica que mencionava forças de intercâmbio entre elétrons de átomos adjacentes, confirmando as forças sugeridas por Weiss [3].

2.1.2 - Demonstração prática dos domínios magnéticos

Só após vários anos é que se pôde demonstrar de modo prático e direto a existência destes domínios com as experiências de Barkhausen e as fotografias dos espectros formados pelo pó de Bitter, que permitiram a surpreendente confirmação da realidade.

- a) Efeito Barkhausen: em 1917, Barkhausen descobriu que o ferro produzia um ruído quando era magnetizado ou desmagnetizado. Barkhausen inseriu um tubo de ferro numa bobina conectada a um recetor de telefone, por via de um amplificador com fator de amplificação de 10000, estando também ligado a um galvanómetro de espelho (instrumento utilizado nesse tempo para medições de corrente mais precisas que o galvanómetro normal). Ao inserir e girar um íman sobre o ferro, alternando o sentido do campo magnético e mantendo a direção, o físico constatou que uma alteração gradual e uniforme do campo magnético exterior forçava os ímanes moleculares a deslocar-se irreversivelmente. Estas variações abruptas na estrutura nos domínios produziam pequenos impulsos de tensão não uniformes. Estes impulsos induziam a bobina que rodeava o tubo de ferro e puderam ser escutados como ruído através do auscultador do telefone, que se denominou ruído de Barkhausen.

No entanto é necessário salientar que estes sons audíveis correspondem apenas a grandes grupos de ímanes moleculares, que possuem grande estabilidade e requerem mais energia para romper a sua junção [1],[5]. Estes impulsos de campo magnético, correspondentes aos impulsos de tensão, estão representados na figura 2.6.

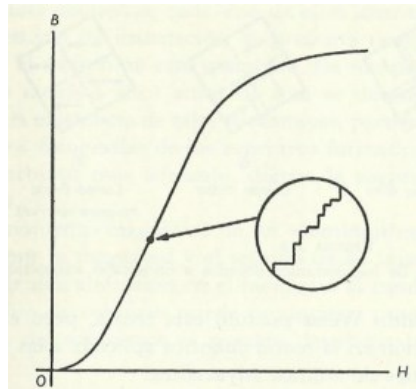


Figura 2.6 - Ampliação da curva de magnetização de um material ferromagnético [1].

- b) Espectros formados pelo pó de Bitter: uma entrada interessante na demonstração da existência dos domínios é a técnica dos espectros formados por pó. Aplicando uma suspensão coloidal de óxido de ferro sobre a superfície polida de grãos magnéticos e observando-a através de um microscópio, regista-se que o pó deposita-se em traços cujas formas se creem estar determinadas, em grande parte, pela configuração dos domínios magnéticos, visto que as partículas de óxido de ferro se alinham paralelamente ao eixo maior do cristal, indicando qual a direção de mais fácil magnetização. Com estes espectros, deduziu-se que a forma dos domínios pode ser em agulha ou barra larga, embora os domínios possam ser representados adequadamente com forma cúbica como finalidade de uma simples interpretação da teoria.

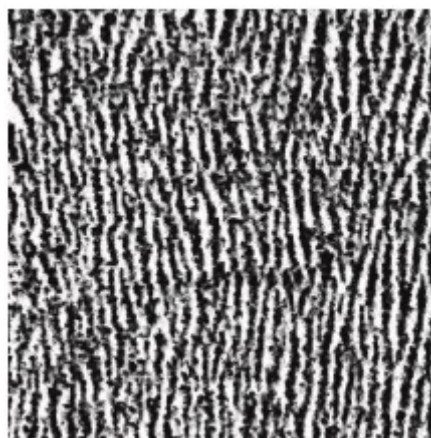


Figura 2.7 - Visualização dos domínios magnéticos [6].

2.1.3 - Tipos de magnetismo

Todas as substâncias são consideradas magnéticas mas só as ferromagnéticas e ferrimagnéticas são capazes de ser magnetizados por influência de campos magnéticos relativamente baixos.

A maioria dos materiais - sólidos, líquidos e gases - possuem uma suscetibilidade magnética bastante baixa, o que os torna materiais diamagnéticos e paramagnéticos (diamagnetismo possui suscetibilidade negativa e paramagnetismo positiva). Em contraste, os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos possuem valores elevados de suscetibilidade, que variam com o campo magnético que atua no material. Como foi referido anteriormente, a suscetibilidade magnética dos materiais diminui com o aumento da temperatura, atingindo o valor nulo à temperatura de Curie, a partir da qual perdem a sua capacidade de fácil magnetização e tornam-se paramagnéticos, como se verifica na figura 2.8 [1],[7].

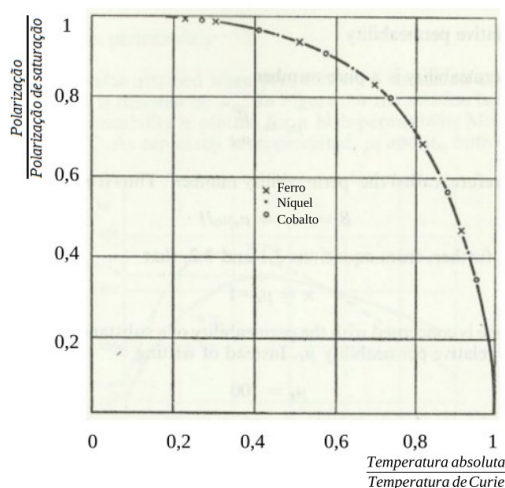


Figura 2.8 - Razão entre a polarização de saturação normalizada e a temperatura de Curie normalizada [1].

Existe ainda o conceito de materiais magneticamente duros e materiais magneticamente macios. Os magneticamente duros retêm uma considerável quantidade de energia magnética (também conhecida por remanescência ou indução residual) depois de se eliminar o campo magnetizante, os macios, pelo contrário, perdem a maior parte da energia magnética quando se suprime esse campo.

Os dois tipos de materiais diferem na sua coercividade magnética, que se define pela intensidade de campo magnético mínima que anula a indução magnética residual num certo material: um material magneticamente duro terá uma coercividade bastante elevada, o que será apropriado para utilizar como íman permanente, e um material magneticamente macio terá uma coercividade bastante baixa, propriedade útil para aplicações que exijam frequentes variações da magnetização do material [3].

A coercividade magnética está intimamente relacionada com a histerese magnética de uma material. Histerese é a diferença entre os valores de indução magnética num material para o

mesmo valor de intensidade de campo magnético incidente durante o processo de magnetização e desmagnetização do material. Quanto maior for a histerese, maior a dificuldade em desmagnetizar um material previamente magnetizado ou vice-versa, e, portanto, maior a sua coercividade. Por seu lado, quanto menor for a histerese, mais facilmente se consegue desmagnetizar um material previamente magnetizado ou o inverso e menor a sua coercividade magnética.

Pode-se observar a curva da primeira magnetização de uma amostra na figura 2.9 a), onde a intensidade de campo magnético (H) e a indução magnética (B) iniciais são nulos e a diferença entre as curvas de posteriores magnetizações e de desmagnetizações da figura 2.9 b), ou seja, a histerese [1]. O valor de remanescência do material equivale à magnitude da indução magnética quando a intensidade do campo magnético se anula, enquanto o valor da coercividade equivale à magnitude da intensidade do campo magnético quando indução magnética se anula [7].

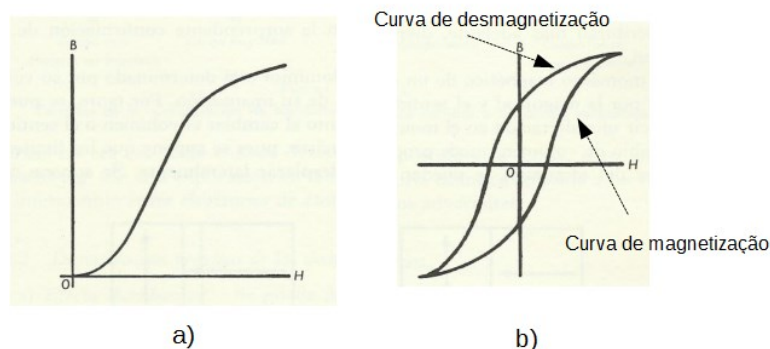


Figura 2.9 - Curvas de a) magnetização e b) ciclo de histerese [1].

Os materiais principais utilizados em núcleos de transformadores são os ferromagnéticos e ferrimagnéticos, pois magnetizam-se com valores baixos de campo magnético e possuem baixa histerese ou coercividade magnética, o que permite que alterem facilmente o seu sentido de magnetização. No capítulo seguinte são apresentadas mais particularidades destes dois tipos de materiais.

2.2 - Conceitos de eletromagnetismo

Como se sabe, um transformador monofásico é uma máquina com dois circuitos elétricos independentes, cada um com o seu valor de tensão e corrente elétricos e com iguais valores de potência elétrica. Isto é possível pois os dois circuitos partilham o mesmo circuito magnético e, através da estreita relação entre eletricidade e magnetismo explicada por leis físicas, tornam esta função possível.

Em 1819, Hans Christian Ørsted observou que a agulha de uma bússola (atuando como um ímã) sofria uma deflexão sempre que se aproximava de um fio retilíneo por onde passava uma

corrente elétrica. Esta deflexão dos ímanes, sem atuação de outra força visível, indica que a corrente elétrica produz um campo magnético, cujas linhas de força são ortogonais ao fio.

Por sua vez, o físico francês André Marie Ampère procurou aprofundar esta relação entre eletricidade e magnetismo, registrando que o valor da indução magnética B ao longo de um circuito magnético fechado C é proporcional à intensidade de corrente contínua e estacionária i que atravessa a superfície delimitada pela curva, mais concretamente [8]:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{C} = \mu_0 i \text{ (N. A}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$

Uma limitação da lei de Ampère é a exigência de uma distribuição de corrente elétricas de valores constantes. Caso isso não se verifique, não é possível obter uma indução magnética constante e a lei de Ampère não se poderá aplicar para a obtenção do valor da indução ao longo do circuito [8].

A lei de Ampère foi melhorada para indicar o campo magnético B induzido por uma corrente estacionária i num circuito elétrico C em qualquer ponto P no espaço à distância r da superfície delimitada por C através da lei de Biot-Savart, criada pelos físicos franceses Jean-Baptiste Biot e Félix Savart, como se verifica pela equação (2.2) [8][9]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{C} \times \hat{r}}{r^2} \text{ (T)} \quad (2.2)$$

Com esta equação, é possível obter a direção, o sentido e a magnitude da indução magnética \vec{B} , induzida por uma corrente i , sem a necessidade de simetria na distribuição das correntes elétricas em relação à superfície da indução magnética registada na lei de Ampère.

Como referido acima, as leis de Ampère e de Biot-Savart aplicam-se apenas para correntes elétricas estacionárias que, por definição, estão associadas a um circuito fechado. Esta particularidade não explica, por exemplo, o funcionamento de um circuito elétrico com condensadores ou semelhantes armazenadores de eletricidade, cuja construção implica sempre um volume dielétrico entre placas eletricamente carregadas, ou seja, um circuito com estes dispositivos é um circuito aberto mas, no entanto, é percorrido por corrente elétrica durante o armazenamento ou descarregamento de energia dos seus condensadores. Este problema foi resolvido por James Clerk Maxwell ao propor a Lei de Ampère-Maxwell, que contempla a relação entre a indução magnética \vec{B} num circuito magnético fechado C e uma corrente elétrica variável no tempo [9], [10]:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_{\text{fechado}} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS \right) \text{ (T)} \quad (2.3)$$

onde i_{fechado} é a intensidade de corrente na fração fechada do circuito C em ampère, ε_0 é a permitividade elétrica do volume dielétrico em farad por metro, S representa a superfície

atravessada pelo campo elétrico no volume dielétrico, \vec{E} é o vetor do campo elétrico no volume dielétrico em newton por coulomb e \hat{n} é o versor da direção e sentido do campo elétrico no volume dielétrico perpendicular à superfície S .

As leis acima referidas admitem que a passagem de corrente elétrica por um condutor produza uma indução magnética mas não referem a possibilidade de produção de eletricidade a partir de campos magnéticos. Numa das suas experiências neste contexto, o físico inglês Michael Faraday enrolou 70 metros de fio de cobre em torno de um bloco de madeira, inserindo um galvanómetro no circuito. Nesse mesmo bloco, enrolou outros 70 metros de fio de cobre, isolados do primeiro, e ligou-os a uma bateria. Supunha-se que pela lei de Ampère a ação de um campo magnético criado por um circuito elétrico induzisse uma corrente no outro mas tal não se verificou: na verdade a corrente no circuito do galvanómetro era nula. Surgia, no entanto, uma deflexão no galvanómetro no momento em que o circuito ligado à bateria era ligado ou desligado, ou seja, a corrente elétrica era induzida não por um campo magnético estático mas sim por um variável.

Faraday, com resultado em mais experiências, formulou a lei que recebeu o seu nome (Lei de Faraday), que indica que a ação de um fluxo magnético Φ variável no tempo, através de uma superfície S , induz uma força eletromotriz ε nos limites desta superfície [8]:

$$\varepsilon = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{C} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = -\frac{d\Phi_S}{dt} \quad (V) \quad (2.4)$$

onde \vec{E} é o vetor de campo elétrico em volt por metro, S representa a superfície atravessada pela indução magnética \vec{B} , C representa o circuito fechado percorrido pelo campo elétrico e Φ_S é fluxo magnético que atravessa a superfície S em weber.

O sinal negativo na terceira e quarta parcela deve-se à Lei de Lenz, formulada pelo físico russo Heinrich Friedrich Emil Lenz, que descobriu que a corrente elétrica, induzida por um fluxo magnético variável no tempo, flui sempre na direção que opõe a variação desse fluxo, de modo que, se o fluxo magnético que atue num circuito se altera, a corrente induzida produz outro fluxo magnético na direção oposta de modo a corrigir essa alteração.

A lei de Faraday permite resolver diversos problemas que envolvam fluxos magnéticos variáveis no tempo e campos elétricos induzidos, especialmente problemas de obtenção do valor da força eletromotriz induzida através de informação sobre o fluxo magnético variável no tempo e obtenção da variação da magnitude do campo magnético, sua direção ou área de influência através de informação sobre a força eletromotriz induzida [10].

É também devido a este fenómeno que um transformador elétrico só funciona com corrente alternada, de modo a que induza um fluxo magnético cujas características se alterem no tempo e induza força eletromotriz num outro circuito que partilhe este fluxo.

Estão assim estabelecidas as duas leis fundamentais do eletromagnetismo, a de Ampère e de Faraday, que, muito resumidamente, explicam o funcionamento de um transformador elétrico, na medida em que determinam como se cria uma tensão num circuito (força eletromotriz da lei de Faraday) através de fluxo magnético induzido por outro circuito (lei de Ampère).

2.3 - Alguns fenômenos magnéticos especiais

Apresentam-se aqui diversos efeitos magnéticos onde o campo magnético altera as dimensões ou provoca alterações físicas nas peças onde atua, sendo um desses efeitos a magnetostricção de Joule, um dos assuntos mais importantes desta dissertação.

Efeito de Joule: em 1842, James Prescott Joule reportou o seguinte efeito: durante a magnetização de uma peça de ferro, esta expande na direção da magnetização e contrai na direção transversal à anterior. Mais tarde, este comportamento denominou-se de magnetostricção e verificou-se que ocorre em todos os materiais magnéticos, pode ter sinal positivo ou negativo e o seu valor varia com o campo magnético que incide no material [1].

É, no entanto, necessário distinguir os conceitos de magnetostricção volumétrica (isotrópica) e magnetostricção de Joule (anisotrópica). Na volumétrica, a atuação do campo magnético causa uma alteração isotrópica na forma do material em todas as dimensões, medindo-se da seguinte forma [11]:

$$\text{Magnetostricção volumétrica} = \frac{\Delta \text{volume}}{\text{volume inicial}} \quad (2.5)$$

A magnetostricção de Joule, por seu lado, causa uma alteração na forma, distendendo ou comprimindo o material na direção do campo magnético, mantendo o volume constante, pelo que pode ser definida por [11]:

$$\text{Magnetostricção de Joule} = \frac{\Delta \text{comprimento}}{\text{comprimento inicial}} \quad (2.6)$$

Geralmente a magnetostricção volumétrica é de magnitude bastante inferior à magnetostricção de Joule.

Efeito de Matteucci: o efeito de Matteucci é conhecido desde 1847. Se for colocado um fio ferromagnético ao longo de um campo magnético e esse sofrer torção mecânica, a sua magnetização altera-se. Matteucci afirmou também que, se for colocado um galvanómetro entre o fim e início de um cilindro de ferro, é possível observar correntes induzidas ao torcer e repor a forma inicial ao cilindro. Ainda com outra experiência, se um cilindro de ferro for torcido e reposto à forma inicial durante a sua primeira magnetização e depois remagnetizado, verifica-se um impulso de corrente elétrica no momento em que se liga o circuito ao cilindro.

Tal como Sir William Thomson descobriu mais tarde, esta sequência de respostas demonstra efeitos da histerese para torções cíclicas. Thomson explicou este efeito supondo que, como consequência da magnetostricção, era produzida um campo magnético helicoidal, cuja componente circular era sobreposta ao efeito longitudinal inicial.

Opondo este efeito de Matteucci “positivo”, foi posteriormente descoberto um efeito de Matteucci “negativo”, que produzia forças eletromotrizes num sentido que opunha o sentido da magnetização inicial [1].

Efeito de Wiedemann: ao inserir um tubo de ferro dentro de um campo helicoidal, Gustav Wiedemann verificou variações dimensionais na direção paralela ao campo magnético (longitudinal) e na direção perpendicular (transversal). No entanto existia uma assimetria nestas forças, provocando uma torção no tubo.

Esta torção surge se o tubo for afetado por um campo magnético uniforme e paralelo ao eixo do tubo, ou por um campo magnético circular produzido por uma corrente axial. Esta corrente axial pode ser transmitida através do próprio tubo ou por um fio isolado colocado ao longo do eixo dele, sendo que a torção é menor na primeira situação que na segunda.

Os resultados desta investigação, levada a cabo por Wiedemann, são entendidos como prova da hipótese de ímanes moleculares rotativos. Ainda hoje, estes resultados constituem a base do princípio do armazenamento magnético.

É de salientar a correspondência entre a lei de Matteucci e a lei de Wiedemann: na primeira, a deformação em torção do material criar uma tensão ao longo da sua extensão, enquanto que a segunda a torção do material é causada pela incidência de um campo magnético exterior [11],[12].

Efeito de Villari: de acordo com E. Villari, uma elongação elástica de um material ferromagnético produz uma alteração na sua suscetibilidade magnética. Em materiais que expandem com a sua magnetização, ou seja, mostram magnetostricção positiva, a sua suscetibilidade magnética aumenta sob tração mecânica. Por outro lado, a suscetibilidade de materiais com magnetostricção negativa diminui sob tração mecânica.

Existe aqui outra correspondência entre a lei de Villari e a lei de Joule: no primeiro caso, a suscetibilidade magnética é alterada aplicando tração mecânica no material; no segundo, é o campo magnético que cria a tração.

Villari descobriu também, através das suas pesquisas, que uma barra de ferro expande se magnetizada com um campo magnético fraco mas contrai ao exceder-se um certo valor de campo magnético, o que demonstra haver uma mudança de sinal da magnetostricção no mesmo material [1].

2.4 - Síntese

Neste capítulo explica-se e comprova-se o ferromagnetismo a nível atómico e de partículas elementares, assim como são diferenciados outros tipos de magnetismo. É também explicada a diferença entre materiais magnéticos duros e macios através dos conceitos de histerese e coercividade magnéticas.

Posteriormente apresentam-se as principais leis da física que explicam a indução de uma tensão elétrica num circuito por parte de outro e, finalmente, indicam-se alguns fenómenos magnéticos onde são alteradas as dimensões, propriedades elétricas e magnéticas ou existe torção mecânica nos materiais sujeitos a campos magnéticos externos.

Capítulo 3

Aspetos construtivos e funcionamento do transformador elétrico

Um transformador elétrico é um dispositivo utilizado para transformar tensão ou corrente alternada, podendo realizar outras funções, tais como isolar um circuito de outro, isolar corrente contínua, mantendo o trânsito de corrente alternada entre circuitos, alterar o número de fases, como no caso transformadores tri-hexafásicos ou tri-dodefásicos, ou, ainda, adaptar o valor de uma impedância entre o secundário e o primário (função de adaptador de impedâncias) [13].

Neste capítulo detalham-se os aspetos construtivos e o funcionamento deste equipamento, com foco nos transformadores de potência trifásicos, nos seus enrolamentos e na construção, qualidade e montagem do núcleo magnético, pois é aqui que se verifica o problema alvo desta dissertação, a magnetostrição das chapas magnéticas.

3.1 - Funcionamento do transformador

Um transformador de potência consiste, normalmente, em dois conjuntos de enrolamentos, o primário (ou de mais alta tensão) e o secundário (ou de mais baixa tensão), que, devido a um núcleo magnético comum, partilham um mesmo fluxo magnético. É através deste fluxo de indução mútua que é possível haver valores de tensão alternada diferentes nos dois circuitos, sem que haja ligação elétrica entre eles.

Para perceber o seu funcionamento, apresenta-se a Figura 3.1, que demonstra um transformador monofásico a operar em vazio, em regime estacionário e ideal (ou seja, desprezam-se as resistências nos circuitos e os fluxos magnéticos de fugas). Quando é aplicada uma tensão alternada V_1 num desses enrolamentos (por definição, o primário), cria-se corrente

elétrica I_0 , que percorre esta bobina e induz uma força magnetomotriz (diferença de potencial magnético) alternada no interior da bobina. Esta força, por sua vez, cria um fluxo magnético (setas a tracejado), também alternado, no núcleo, de acordo com a Lei de Ampère referida no capítulo anterior.

A parte deste fluxo magnético, que é comum aos circuitos primário e secundário, induz uma força eletromotriz nos enrolamentos dos circuitos (E_1 no primário, E_2 no secundário), segundo a Lei de Faraday. Como se trata de um transformador ideal, esta força eletromotriz tem igual valor e sinal simétrico à tensão V_1 (como indica a Lei de Lenz), o que resultaria numa soma de tensões com resultado nulo e, por isso, nenhuma corrente circularia no enrolamento primário. Na realidade, esse resultado nunca é nulo, pelo que existe sempre uma corrente no circuito primário, denominada de corrente de excitação ou de magnetização.

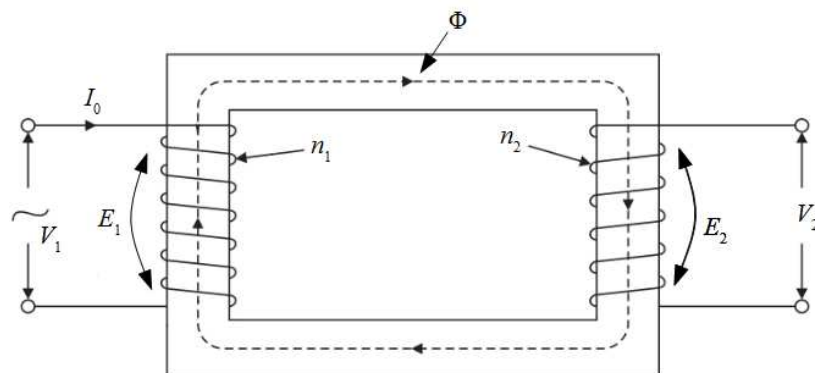


Figura 3.1 - Esquema de um transformador a operar em vazio [14].

O valor das forças eletromotrizes E_1 e E_2 resulta da indução por variação do fluxo magnético de indução mútua Φ , cujo valor é multiplicado pelo número de espiras induzidas dos enrolamentos:

$$V_1 = E_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}; V_2 = E_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ (V)} \quad (3.1)$$

onde n_1 e n_2 são, respetivamente, o número de espiras nos enrolamentos dos circuitos primário e secundário.

Como o fluxo magnético Φ é o mesmo nos dois circuitos, podem-se comparar os valores das forças eletromotrizes nos enrolamentos através da relação de transformação de um transformador:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.2)$$

Daqui se verifica que a razão entre os valores das tensões entre cada circuito é proporcional à razão do número de espiras dos respetivos enrolamentos. A razão entre os valores das

correntes dos circuitos, pelo contrário, encontra-se em proporção inversa com a razão do número de espiras.

Quando se trata de um transformador monofásico real, novamente em regime estacionário, é necessário ter em consideração a resistência dos circuitos primário e secundário e os fluxos magnéticos de dispersão. Estes fatores implicam que os valores das tensões nos terminais dos dois circuitos sejam diferentes dos valores das respectivas forças eletromotrizes. Neste caso, a relação de transformação será:

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.3)$$

No caso de haver uma carga elétrica ligada ao circuito secundário, a corrente que atravessa esse circuito produzirá uma força magnetomotriz desmagnetizante no enrolamento do circuito secundário, que se oporá à força magnetomotriz no primário. A soma destas forças magnetomotrizes, com sentidos opostos, irá diminuir instantaneamente reduzir o fluxo magnético no núcleo, o que terá como consequência a redução dos valores das forças eletromotrizes E_1 e E_2 e modificará o equilíbrio entre V_1 e E_1 . Para restabelecer este equilíbrio, é necessário aplicar uma maior corrente de magnetização de modo a neutralizar a força magnetomotriz no secundário [15].

3.1.1. Potência ativa de perdas

O funcionamento do transformador elétrico, tal como qualquer outra máquina, produz potência ativa de perdas sob forma de calor. Apesar de inevitáveis, devem ser evitadas pois prejudicam o seu rendimento e contribuem para o aquecimento, podendo por esta razão levar a desgaste ou avaria do equipamento.

As perdas dividem-se habitualmente em perdas no núcleo, perdas no cobre e perdas devido a fluxos magnéticos de fugas:

Perdas no núcleo: as perdas no núcleo magnético de um transformador devem-se aos fenómenos da histerese magnética e das correntes parasitas, que resultam da magnetização alternada do núcleo.

A histerese magnética deve-se à dificuldade em deslocar as paredes dos domínios magnéticos dos materiais quando influenciados por um fluxo magnético alternado, devido às imperfeições dos seus grãos. Durante a magnetização do material, os domínios magnéticos redimensionam-se e rodam no mesmo sentido que o campo imposto, como explicado no capítulo 2. Esta movimentação pode ser dificultada por imperfeições nos grãos, impurezas ou alguma tensão mecânica no material, pelo que as paredes dos domínios ficam temporariamente retidas. Os domínios acabam por se mover mas de modo brusco, tal que a alta velocidade do deslocamento das paredes dos domínios gera pequenas correntes elétricas parasitas no

material, que por sua vez constituem potência de perdas através da equação da potência de perdas de Joule $P_{dissipada} = RI^2$ e é libertada sob forma de calor.

As perdas de energia no núcleo causadas pela tendência do material de conservar a sua magnetização, ou a opor-se à variação desta, denominam-se perdas de histerese. Como o transformador elétrico funciona com corrente alternada, o fenómeno da histerese ocorre sempre que há inversão no sentido do fluxo, ou seja, o dobro da frequência da alimentação [13],[16].

A energia total dissipada pelo núcleo devido ao fenómeno da histerese, por ciclo, sob forma de calor, que aqui se designa por W_H , será [15]:

$$W_H = \text{volume do núcleo} \times \oint H dB \text{ (J)} \quad (3.4)$$

onde o integral se estende por toda a área do ciclo de histerese do gráfico. Para saber o valor da potência de perdas por histerese, multiplica-se W_H pela frequência do campo magnético f :

$$P_H = f \times W_H = f \times \text{volume do núcleo} \times \oint H dB \text{ (W)} \quad (3.5)$$

Como se observa, a potência de perdas por histerese depende exclusivamente, da amplitude do fluxo da indução magnética, da frequência dessa fonte e da natureza do material magnético, que altera a área do ciclo. Ainda outra equação, proposta por Steinmetz [15]:

$$P_H = k_H \times f \times \text{volume do núcleo} \times B_M^x \text{ (W)} \quad (3.6)$$

onde k_H representa o coeficiente de Steinmetz e x o expoente de Steinmetz, que dependem da natureza do material.

Tendo em conta que o núcleo de um transformador é constituído por uma liga metálica que opera sob um campo magnético alternado, existem sempre forças eletromotrizes induzidas, segundo a Lei de Faraday. Estas forças provocam correntes elétricas que circulam neste núcleo, que se denominam de Foucault ou parasitas e, segundo a equação da potência de perdas de Joule, libertam potência sob forma de calor.

Estas correntes aumentam quanto mais espessa e menos resistiva for a peça do núcleo magnético, pelo que se este fosse constituído por um único bloco de metal, as correntes seriam enormes, causando perdas e calor incontroláveis. Como tal, o material é dividido em chapas, cujo corte, montagem e isolamento de superfície não permitem que se crie um circuito eletricamente fechado, para não haver condução de correntes. Tendo isto em conta, a potência de perdas por correntes parasitas no núcleo pode também ser calculada através da equação [15]:

$$P_F = k_F \times f^2 \times a^2 \times \sigma \times B_M^2 \times \text{volume do núcleo (W)} \quad (3.7)$$

onde a é a espessura da chapa e σ a condutividade elétrica do material.

Em adição a este cálculo das correntes parasitas, que se denominam de clássicas, existem outras correntes parasitas designadas por correntes anómalas ou residuais. Estas resultam de movimentações das paredes dos domínios durante a sua alteração dimensional e dependem da velocidade a que as movimentações ocorrem. Estas perdas, que aumentam consoante o tamanho do grão (quanto maior, maior a distância entre paredes e maior a velocidade das suas movimentações), possuem um valor bastante mais elevado que as perdas clássicas, onde se assume uma mistura homogênea de muitos e pequenos domínios [16].

É possível medir a potência de perdas no núcleo através de um ensaio do transformador em vazio. Um exemplo desta montagem encontra-se na Figura 3.2 e, como o nome do ensaio indica, o transformador encontra-se a operar em vazio ou em circuito aberto, que é sinónimo do circuito primário do transformador se encontrar alimentado à tensão nominal e com os terminais do secundário isolados. Nesta situação, não há corrente elétrica nos enrolamentos secundários e a corrente no primário é a suficiente para magnetizar o núcleo, ou seja, corresponde à corrente de magnetização. Deste modo, a potência ativa absorvida pelo transformador coincide quase na totalidade com a potência de perdas no núcleo. Num transformador monofásico, a potência tem valor eficaz de $P_0 = V_{1n} I_0 \cos \phi_0$, onde P_0 é o valor eficaz da potência absorvida em vazio, V_{1n} é o valor eficaz da tensão nominal do circuito primário, I_0 é o valor eficaz da corrente no circuito primário e $\cos \phi_0$ é o fator de potência

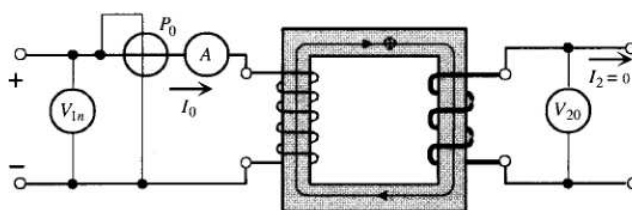


Figura 3.2 - Esquema de um transformador a operar em vazio com a aparelhagem de medição de potência de perdas [15].

Para reduzir as perdas no núcleo magnético dos transformadores devem-se empregar chapas de aço de pequena espessura, alta resistividade elétrica, com pequeno ciclo de histerese e isoladas eletricamente entre si. Para isso, as chapas contêm uma pequena percentagem de silício, o que reduz as perdas por histerese, aumenta a permeabilidade magnética e aumenta a resistividade elétrica, logo, reduz a potência de perdas por correntes parasitas. Traz, no entanto, a desvantagem de tornar o aço duro e quebradiço, pelo que, por motivos de fabrico e facilidade de manuseamento, a quantidade de silício costuma ser limitada a 4,5%. Existe

também um cuidado com a pureza do aço, através da eliminação de impurezas, como o carbono.

Não deve ser esquecido que a laminagem e isolamento das chapas magnéticas aumentam a secção total do núcleo, reduzindo o fator de empacotamento, ou seja, proporção da área de metal (a útil) em relação à da geometria total. Ao construir o núcleo, as chapas são pressionadas entre si de modo a minimizar espaços de ar entre si e a aumentar a área útil, embora seja uma medida que pode contribuir para o ruído durante a operação [15],[18].

Para concluir, o envelhecimento das lâminas do núcleo, danos mecânicos sofridos nas chapas (por pancadas ou dobragem) e falhas no isolamento elétrico também provocam um aumento das perdas no núcleo [1].

Perdas no cobre: a potência de perdas no cobre dos enrolamentos é consequência da resistência elétrica dos condutores nos circuitos primário e secundário. Esta potência é libertada sobre forma de calor e o seu valor calcula-se, novamente, através da equação potência de perdas por efeito de Joule. Nesta situação, é possível medir a potência de perdas no cobre através de um ensaio em curto-circuito, ou seja, com os terminais do circuito secundário conectados entre si e alimentado com uma tensão baixa no circuito primário, tal que a corrente no circuito primário coincida com seu valor nominal. Pode-se observar a montagem através da Figura 3.3.

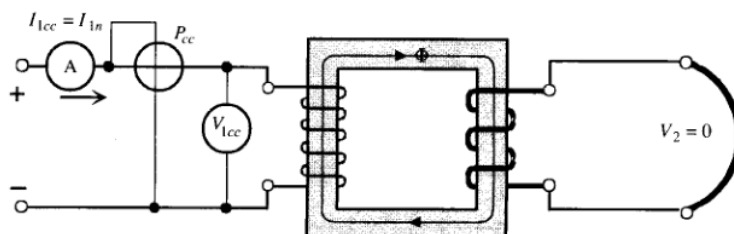


Figura 3.3 - Esquema de um transformador a opera em vazio com aparelhagem de medição de potência de perdas [15].

Neste caso, o valor da tensão aplicada à entrada representa uma pequena fração do valor da tensão nominal, pelo que o fluxo magnético será baixo e as perdas no núcleo magnético podem ser desprezadas. Assim, a potência de perdas total deste ensaio é igual à potência de perdas no cobre. Esta potência de perdas tem o valor de $P_{cc} = V_{1cc} I_{1n} \cos \phi_{cc}$, onde P_{cc} é o valor eficaz da potência absorvida em curto-circuito, V_{1cc} é o valor eficaz da tensão no circuito primário, I_{1n} é o valor eficaz da corrente no circuito primário e $\cos \phi_{cc}$ o fator de potência [15].

Para diminuir as perdas por efeito de Joule nos enrolamentos pode-se reduzir o número de espiras (o que diminui o comprimento do condutor e também a resistência), aumentar a área do condutor (reduzindo a sua resistência) ou um equilíbrio entre ambos. É necessário ter em atenção que é preciso combinar a alteração das dimensões das bobinas dos enrolamentos com o núcleo onde se inserem, de modo a manter as mesmas condições de operação. Em condutores

multifilares, deve ainda realizar-se a sua permutação de modo a evitar correntes de circulação no seu interior, como adiante se falará.

Perdas por fluxos magnéticos de fugas: apesar do bom acoplamento magnético entre os circuitos primário e secundário, existe sempre uma quantidade de campo magnético que não é aproveitado para a transformação de tensão. Este campo designa-se de fugas e pode induzir correntes elétricas parasitas nos condutores e restantes componentes metálicos do transformador que, mais uma vez, poderão constituir perdas de acordo com o efeito de Joule.

O fluxo magnético de fugas pode atuar nos enrolamentos, induzindo tensões e, conseqüentemente, correntes elétricas nestes componentes, bem como gerar perdas por histerese em órgãos ferromagnéticos. Estas correntes têm direção perpendicular em relação ao fluxo de fugas, que é praticamente paralelo ao fluxo no núcleo. Como tal, um método para diminuir a magnitude destas correntes parasitas é, à semelhança da laminação do núcleo magnético, dividir o condutor do enrolamento em vários filamentos, isolados eletricamente entre si para impedir a transmissão de corrente entre filamentos na direção das correntes induzidas pelos fluxos magnéticos de fugas. Esta prática reduz o efeito pelicular da corrente e aumenta a resistência elétrica, em relação a estas correntes parasitas, mas também a secção total do condutor, mantendo a secção de cobre intacta, o que aumenta o volume total dos enrolamentos.

É necessário ter em atenção que, ao dividir o condutor em filamentos paralelos entre si e a diferentes distâncias do núcleo magnético, estes terão também diferentes valores de forças eletromotrizes induzidas, que podem provocar concentrações de calor em zonas específicas. Para combater estas diferenças de tensão entre filamentos recorre-se à transposição sucessiva de filamentos do condutor, intercalando-se de modo a ocuparem as mesmas posições sequencialmente. Um exemplo deste condutor é apresentado na Figura 3.4.

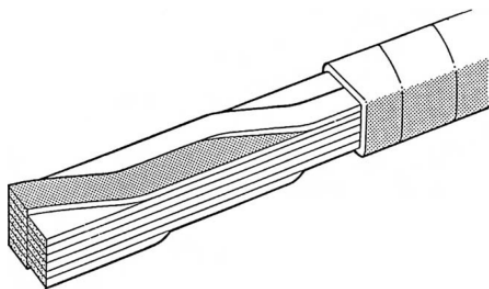


Figura 3.4 - Condutor com filamentos transpostos [18].

Os fluxos magnéticos de fugas podem ainda afetar outros componentes metálicos do transformador, induzindo neles correntes parasitas e perdas por histerese. Este é um problema recorrente em transformadores com elevadas correntes nos enrolamentos e pode ser resolvido através da colocação de shunt de fluxo magnéticos nos enrolamentos (como é esquematizado na Figura 3.5) ou blindagem magnética nas paredes ou noutros componentes do transformador,

como é normal em relação à cuba de transformadores tipo imerso. Estes acessórios encontram-se ligado à terra, pelo que, apesar de não eliminarem o fluxo magnético de fugas, captam parte deste e impedem que afete o resto do transformador [18].

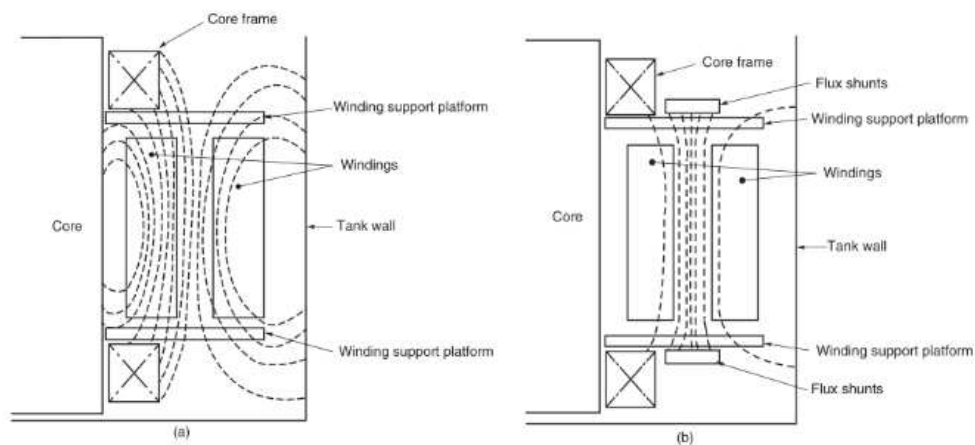


Figura 3.5 - Representação da afecção dos fluxos magnéticos parasitas (a) sem shunt magnético e (b) com shunt magnético [18].

3.2 - Características construtivas

3.2.1 - Enrolamentos

Os enrolamentos constituem o circuito elétrico do transformador e são compostos por condutores de cobre ou alumínio (o cobre possui melhores características mecânicas e condutividade elétrica, o alumínio menor custo e peso), de secção circular ou retangular, e constroem-se de forma tubular (bobinas) ou forma plana (galletes). Estes estão cobertos por uma camada isolante, que pode ser verniz, camadas de fibra de algodão ou ainda papel. Podem-se ainda colocar blocos espaçadores de papel prensado, horizontais ou verticais, entre os enrolamentos ou entre espiras, de modo a melhorar o contacto entre as bobinas e óleo refrigerador e melhorar a sua circulação, bem como a garantir uma robustez mecânica adequada.

Estas bobinas podem ser concêntricas ou alternadas. Se forem concêntricas os enrolamentos têm forma de cilindros coaxiais, onde entre ambos se pode colocar um cilindro isolante de cartão ou outro material, bem como pode se criar um canal para circulação de fluido refrigerante.

Existem três tipos principais de enrolamentos para bobinas concêntricas:

- *Enrolamentos por camada*: as espiras são dispostas ao longo do enrolamento e sem haver espaço entre espiras consecutivas. Cada enrolamento pode ter um ou vários condutores. Este tipo é mais utilizado para pequenos e médios transformadores e observa-se na Figura 3.6.

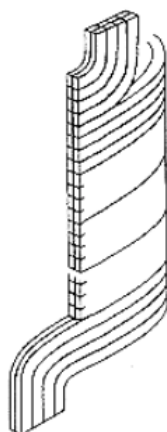


Figura 3.6 - Exemplo de enrolamento por camada [19].

- *Enrolamentos helicoidais*: este tipo de enrolamento pode ser visto como uma variante do enrolamento de várias camadas mas com espaçadores entre espiras. Esta disposição é recomendada para altas correntes, pois a corrente é dividida por condutores paralelos, que podem ser de pequena dimensão de maneira a manter as perdas por correntes parasitas com valor reduzido. Convém ter em atenção a necessidade da transposição de filamentos do mesmo condutor, pelas razões referidas anteriormente. É um tipo de enrolamento mecanicamente robusto, que consegue incluir bastante material condutor e fácil de fabricar, especialmente se forem utilizados cabos continuamente transposto. Um exemplo observa-se na Figura 3.7.

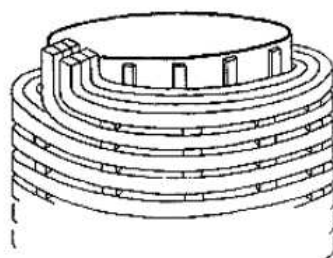


Figura 3.7 - Exemplo de enrolamento duplo helicoidal [19].

- *Enrolamentos em disco*: este estilo é utilizado em enrolamentos com um número elevado de espiras e correntes elétricas baixas, sendo por isso bastante aplicado em altas tensões. Esta bobina é construída com diversos discos ligados em série, onde cada um é enrolado em direção radial, como uma espiral, do interior para o exterior, ou vice-versa, de forma consecutiva, como se observa nas Figuras 3.8 e 3.9. Os enrolamentos em disco são preferidos aos helicoidais quando se pretende um elevado número de espiras pois, enquanto os de forma helicoidal estão restringidos a uma espira por disco, nos enrolamentos em disco pode-se ter mais que uma espira por cada [19].

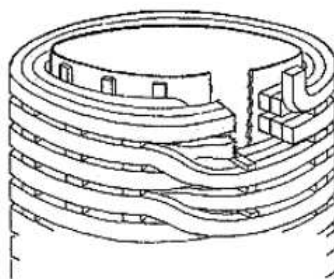


Figura 3.8 - Exemplo de enrolamento em disco [19].

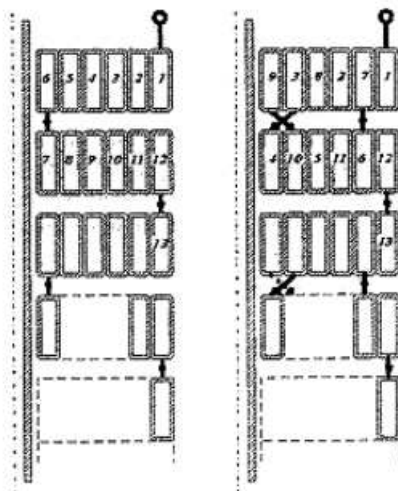


Figura 3.9 - Corte lateral do enrolamento em disco onde se observam as ligações entre níveis [19].

Se forem enrolamentos alternados, este subdividem-se em galletes, tal que as partes dos circuitos de alta e baixa tensão se sucedam alternadamente ao longo do mesmo circuito magnético, tal que os circuitos partilhem melhor o fluxo mútuo e se reduza o fluxo de fugas. Cada secção de alta tensão encontra-se entre duas secções de baixa e, em cada limite da coluna, coloca-se meia bobina de baixa tensão, como se exemplifica na Figura 3.10. [15],[18],[20].

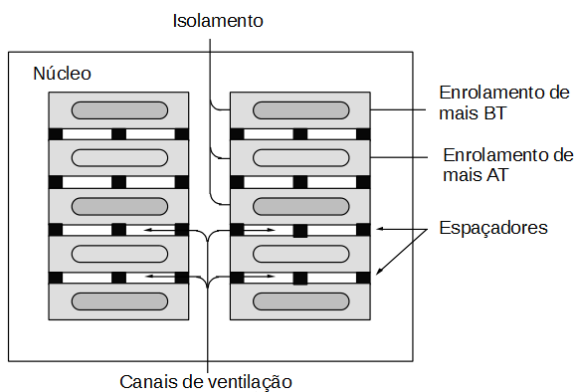


Figura 3.10 - Corte lateral de enrolamentos em galleta [21].

3.2.2 - Isolamento elétrico

Os enrolamentos e terminais de um transformador operam a potenciais elétricos acima dos verificados no núcleo, tanque e outros elementos estruturais. Para além disso, diferentes enrolamentos e até diversas partes do mesmo enrolamento operam com diferentes valores de tensão. Como tal, o isolamento elétrico é um dos aspetos mais importantes no projeto de um transformador elétrico, principalmente na transformação de altas tensões, para prevenir descargas de corrente entre os diversos componentes do aparelho. Quanto maior a diferença de potencial elétrico entre estes componentes, mais isolamento é necessário empregar, donde resulta um aumento do custo total do aparelho, assim como se condiciona o projeto da parte ativa do transformador (enrolamento e núcleo) e, se for o caso, a quantidade de óleo a incluir na cuba.

Pode-se dividir o isolamento de um transformador em duas categorias. O principal consiste no isolamento entre enrolamentos, entre enrolamentos e as colunas ou as travessas e entre os terminais de alta tensão e o potencial à terra; enquanto o secundário compreende o isolamento dentro dos enrolamentos (isolamento entre espiras, entre discos, por exemplo).

Os materiais mais utilizados para o isolamento elétrico dos componentes de um transformador elétrico de potência são:

- *Papel kraft e fibra de algodão*: o papel kraft é um dos melhores materiais para isolamento elétrico pois é flexível, fácil de aplicar, relativamente barato, compatível com o óleo do transformador e resistente ao seu calor transmitido, oferecendo ainda bom isolamento elétrico, mesmo com pequenas espessuras. Comparativamente, a fibra de algodão possui maior poder dielétrico, melhores propriedades mecânicas e maior absorção de óleo do transformador, apesar de ser mais difícil produzir fibra de algodão com boa resistência mecânica, o que se reflete no seu preço mais elevado. É também possível utilizar uma mistura de papel kraft e fibra de algodão, de modo a complementar as boas propriedades elétricas e mecânicas do papel com a absorção de óleo pela fibra de algodão.
- *Papel prensado*: como o nome indica, este material consiste em várias camadas de papel empilhadas e prensadas enquanto húmidas, com posterior aquecimento e secagem. Estas peças são maioritariamente utilizados como plataformas ou blocos de suporte de enrolamentos ou para distanciar componentes da parte ativa, como se observa um exemplo na Figura 3.11.

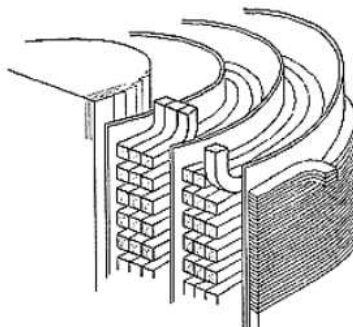


Figura 3.11 - Exemplo de placas de papel prensado a separar e isolar enrolamentos [19].

Antes de lhe aplicar a resina ou impregná-los com o óleo do transformador é necessário secar bem o papel pois é um material que, por natureza, absorve bastante água, o que reduz o poder dielétrico do material e pode provocar pequenas descargas elétricas, assim como acelera o envelhecimento do isolamento. Mais à frente, serão explicadas as funções do óleo do transformador.

Outros materiais isolantes que suportam temperaturas superiores aos descritos atrás incluem madeira (alternativa mais densa que o papel prensado), cápsulas de resina (onde são normalmente colocados os enrolamentos de alta tensão), fibras de vidro, esmaltes e ainda porcelana. Os plásticos e outros materiais sintéticos têm a vantagem de não se criarem bolhas de ar durante a impregnação pelo óleo, como acontece em componentes de base orgânica, como o papel, que, devido ao menor poder dielétrico do ar, prejudicam o isolamento do material [6].

3.2.1 - Óleo de transformador

O óleo de transformador mais comum é um produto derivado de petróleo e atua como meio isolante e como meio de transferência de calor. Como isolador, permite reduzir as distâncias entre os componentes do transformador com diferentes valores de tensão sem que haja descargas elétricas entre eles, sendo possível projetar transformadores com menores dimensões para níveis de tensão maiores. Como auxiliar de refrigeração, por seu lado, o óleo banha as superfícies do núcleo, dos enrolamentos e restantes componentes ativos, absorvendo o calor emitido por estes, e transmitindo-o para as superfícies arrefecidas do transformador, podendo ser necessário empregar um sistema de circulação forçada de óleo para aumentar e acelerar a refrigeração.

Este óleo deve possuir:

- Baixa viscosidade, tal que possa penetrar facilmente dentro dos pequenos espaços entre os vários componentes do aparelho, impregnar os componentes absorventes, de modo a melhorar as suas propriedades dielétricas e as suas transmissões térmicas, e de maneira a facilitar a convecção do óleo dentro do próprio transformador;

- Baixa temperatura de solidificação, que permita utilizar o transformador em climas mais frios sem correr o risco de se impedir a boa fluidez da circulação do óleo;
- Baixa volatibilidade, que é a tendência de algumas substâncias do óleo para se evaporarem, o que provoca alterações na composição química do líquido;
- Baixa temperatura de inflamação, que é a temperatura a partir da qual o óleo emite gases ou vapores em quantidade suficiente para formar, com o ar, misturas que ardem na presença de um estímulo energético;
- Grande estabilidade química, tal que minimize a oxidação e decomposição do óleo, pois podem aumentar a acidez da substância e danificar as peças metálicas do transformador;
- Boas capacidades dielétricas, caloríficas e de condutividade térmica;
- Deve ser não tóxico e compatível com os diferentes componentes do transformador em que entrará em contacto.

O óleo mais utilizado nos transformadores é o mineral, que alia baixo custo com grande poder dielétrico, recupera facilmente após uma descarga elétrica e tem boa capacidade de transferência calorífica. Como alternativa, existem os fluidos sintéticos, que possuem maior temperatura de inflamação que o óleo mineral e torna a operação do transformador mais segura. Estes óleos são mais caros que o mineral, não são biodegradáveis, têm fraca capacidade dielétrica ao transiente elétrico e alguns destes fluidos são bastante viscosos e têm fracas características térmicas. Um destes óleos sintéticos, o “polychlorinated biphenyl”, ou PCB, era bastante utilizado pelas suas boas características gerais mas tem sido substituído por outros devido à sua elevada toxicidade, causando a morte a animais e lesões em diversos órgãos em trabalhadores expostos a este químico. Foi proibido o seu uso e obrigada a sua remoção em vários países a partir do início dos anos 70 [14],[18],[21].

3.2.2 - Tanque e equipamento auxiliar

O tanque ou cuba é o invólucro que contém a parte ativa do transformador e o fluido dielétrico, protegendo-os mecanicamente do ambiente que os rodeia e protegendo também quem opera o aparelho. Se o transformador for de baixa potência e/ou não utilizar de óleo de transformador, pode não ser necessário tanque, como se pode observar o exemplo de um transformador seco na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Transformador elétrico seco [23].

Se o tanque for cheio de óleo, é necessário que as flanges do tanque estejam bem apertadas (normalmente com parafusos e, ocasionalmente, com soldagem) para que não haja fugas de óleo nas juntas do tanque nem entradas de ar que contaminem este fluido isolante.

Algumas das peças mais usuais no tanque são:

- Coberturas móveis, de modo a ser possível uma posterior inspeção do interior da máquina;
- Válvulas de enchimento e drenagem, que permitam recolher amostras do óleo para análises, assim como devem permitir que o óleo circule por filtros externos e equipamento de secagem;
- Olhais, que permitam elevar o transformador e transportá-lo;
- Dispositivos de libertação de pressão interna, como, por exemplo, um diafragma, caso ocorra um aumento súbito de pressão devido a falhas internas;
- Terminais de ligação dos circuitos de alta e baixa tensão, com isoladores de resinas ou cerâmica;
- Reguladores de tensão, que permitam a alteração da relação de transformação do aparelho;
- Termómetro para medição da temperatura do óleo e barómetro para medição da pressão interna.

Para conservar as propriedades do óleo e impedir o seu contacto com água e ar pode-se acrescentar um volume de gás inerte, como o N_2 , para preencher o restante volume do interior do tanque. Outro modo é incluir um tanque de expansão ou conservador junto ao tanque principal, onde é inserido um invólucro de ar que enche e esvazia consoante as necessidades de pressão do óleo. Em vez do invólucro de ar, pode-se incluir, mais uma vez, um volume de gás inerte. Um exemplo desta expansão observa-se na Figura 3.13.

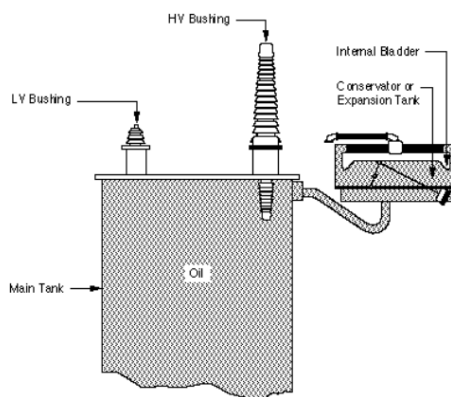


Figura 3.13 - Instalação de um tanque de expansão num transformador [20].

O tanque do transformador alberga vários métodos de dissipação de calor. Para além da dissipação por radiação das paredes planas exteriores, podem-se incluir rugosidades ou outras geometrias que aumentem a superfície exterior do tanque e, como consequência, a dissipação do calor. Outro acrescento, para transformadores que exijam um grande arrefecimento e a superfície do transformador não seja suficiente para tal, é a inclusão de radiadores, com ou sem ventoinhas auxiliares, por onde o óleo do transformador circula e é refrigerado. A desvantagem da inclusão do tanque de expansão e/ou radiadores é, obviamente, o aumento do peso, volume e custo total do transformador, assim como contribui para o ruído transmitido pelo transformador. Para combater estes aumentos, tenta-se tornar a construção o mais compacta possível, sendo costume encontrar a configuração da Figura 3.14 em transformadores de grande potência.

Para finalizar, podem-se ainda incluir tubos ou placas por onde circula água, que permitem uma refrigeração mais eficiente que o ar, mas que tem o grande risco de ocorrer contaminações do óleo pela água, caso haja alguma falha física na fronteira entre os dois fluidos. Um método para minimizar este dano é condicionar a pressão do óleo tal que esta seja sempre superior à da água, para que caso haja uma falha na fronteira entre eles, o óleo infiltrar-se para o reservatório da água e não o oposto [14],[18],[19],[20].



Figura 3.14 - Transformador de potência trifásico, com o tanque de expansão à esquerda em cima e os radiadores com ventoinhas à direita em baixo [24].

3.3 - Núcleo

Como foi explicado no início do capítulo, o aspecto mais importante de um transformador é o fluxo magnético mútuo entre os dois conjuntos de enrolamentos. É portanto essencial condicionar a circulação deste fluxo de modo concentrá-lo num caminho determinado, que neste caso é o interior das bobinas dos enrolamentos. Por isso, o transformador possui um núcleo de material ferromagnético, predominantemente de ligas de aço, caracterizado por possuir uma baixa relutância magnética (resistência do material à passagem de fluxo magnético).

3.3.1 - Qualidade do material do núcleo

Os materiais utilizados em núcleos de transformadores de potência são, hoje em dia, quase exclusivamente ligas de aço dopadas com certo teor de silício ou outros materiais, com alta resistência elétrica e baixas perdas de histerese, preferencialmente laminadas a frio, de grãos orientados e cobertas com uma capa isolante bastante fina. No início da manufatura dos transformadores eram utilizadas chapas de aço de qualidade bastante inferior comparada com as dos dias de hoje e, nessa altura, o envelhecimento magnético era um grande problema pois aumentava bastante a componente da histerese das perdas no núcleo logo nos primeiros dias de utilização do aparelho. Mais tarde, descobriu-se que a adição de outras substâncias melhorava as características magnéticas do material, como por exemplo:

- *Silício*: permite eliminar os átomos de oxigénio da rede cristalina do ferro, aumentando o tempo de vida útil do material. Também aumenta a sua resistividade elétrica, diminuindo as correntes parasitas, e também a magnetostrição. Como desvantagens, diminui a magnetização de saturação, aumenta o ciclo histerético e diminui a ductilidade da liga;
- *Níquel*: torna a liga menos quebradiça em relação ao Fe-Si anterior, o que facilita a sua laminação. As ligas de Fe-Ni podem ser recozidas na presença de um campo magnético, o que provoca o ordenamento direcional dos seus átomos. Este processo resulta em ligas Permalloy, que possuem uma elevada permeabilidade magnética e uma baixa histerese. No entanto, possuem uma indução de saturação menor que do Fe-Si e o seu custo é relativamente alto;
- *Molibdénio*: a inclusão deste elemento no Permalloy (tornando-se Mo-permalloy) aumenta a sua resistividade elétrica. Caso se acrescente também manganésio ao Mo-permalloy (composição Supermalloy), é possível obter ciclos histeréticos mais estreitos que os do Mo-permalloy sem diminuir muito a magnetização de saturação. No entanto, para induções superiores a 0,7 T, a Mo-permalloy apresenta uma permeabilidade superior;

- *Crómio*: a adição deste elemento à liga permalloy aumenta a sua resistividade elétrica e pode aumentar a sua permeabilidade magnética. Ainda assim, esta última característica fica aquém da verificada com a liga Mo-permalloy;
- *Cobalto*: a liga Perminvar, de composição Fe-Ni-Co, apresenta, para campos magnéticos fracos, uma permeabilidade praticamente constante e perdas histeréticas baixas. A sua resistividade é, no entanto, baixa, em relação às outras ligas. Ainda assim, o Permendur (Fe-Co) possui uma elevada saturação de magnetização e relativamente alta permeabilidade em relação ao ferro, tornando este material útil em aplicações com altas induções magnéticas, apesar de ser caro [25].

A qualidade magnética de uma chapa advém, não só da composição química do aço que a constitui, como também dos procedimentos do seu fabrico, particularmente pelo sistema de laminação e os tratamentos térmicos. São agora apresentadas algumas etapas, por ordem cronológica, do desenvolvimento da tecnologia para núcleos magnéticos de transformadores de potência:

- *Laminação a quente*: este foi o primeiro método utilizado para criar chapas de aço. Este processo aquece peças de aço acima da sua temperatura de recristalização que são depois colocadas entre dois rolos, deformando-as e tornando-as menos espessas. Esta deformação tem a desvantagem de resultar numa chapa com estrutura de grãos isotrópica, ou seja, de grãos aleatoriamente orientados, pelo que as propriedades magnéticas têm valores semelhantes em qualquer direção. Pode-se observar um exemplo desta operação na Figura 3.15.



Figura 3.15 - Exemplo de laminação a quente [26].

- *Laminação a frio*: aqui a laminação é efetuada a uma temperatura abaixo da de cristalização, pelo que a deformação força a rede cristalina a alinhar-se no sentido da laminação. Estas chapas de grãos orientados têm uma estrutura anisotrópica, pois as propriedades magnética têm valores mais elevados no sentido da laminação e menores na direção transversal a esta.



Figura 3.16 - Exemplo de laminagem de frio [27].

- *Aço de alta permeabilidade magnética*: o processo da laminação a frio é alterado introduzindo-se uma escassa quantidade de alumínio, visto que este elemento diminui a coercividade magnética, as perdas histeréticas e a magnetização de saturação. Obtém-se chapas com grãos maiores e ainda mais alinhados, conseguindo-se reduzir a histerese magnética entre 30 a 40% em relação ao processo anterior. Ainda através da introdução de revestimentos, que contêm as forças de tração a que são sujeitos, pode-se diminuir as perdas por correntes parasitas e a magnetostricção, ao conter as movimentações deste material de grãos especialmente grandes.
- *Aço de domínios refinados*: acima foi referido que as perdas por correntes parasitas anômalas se devem ao movimento das paredes dos domínios durante os ciclos de magnetização. Foi proposto por R. H. Pry e C. P. Bean [28] que a magnitude destas perdas seria proporcional à distância entre paredes dos domínios e à espessura da chapa. Conclui-se assim que a divisão dos domínios em subdomínios diminui as perdas anômalas e, portanto, as perdas totais no núcleo do transformador. Um método utilizado nas chapas de alta permeabilidade para este efeito consiste em revestir as chapas, durante o arrefecimento (e conseqüente expansão) do material, de modo a aplicar uma tensão mecânica que impeça a expansão e deformando a chapa, tal que diminua o tamanho dos domínios. Outro método é a aplicação de pequenos cortes pouco profundos na chapa, de modo mecânico ou a laser, na direção perpendicular à magnetização, para dividir os domínios. Esta divisão é dependente do valor da força com que o corte é aplicado, embora um valor excessivo de força localizada crie zonas de concentração de fluxo magnético e, conseqüentemente, maiores perdas. O resultado deste processo pode ser observado na Figura 3.17.

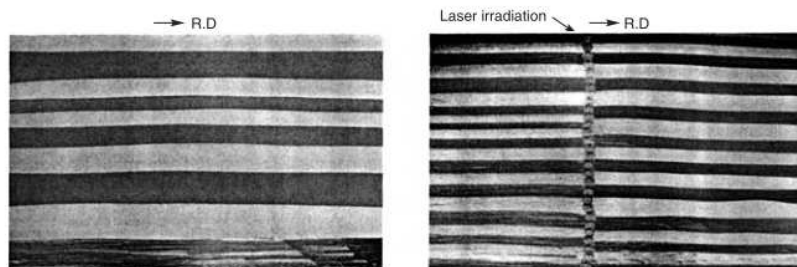


Figura 3.17 - Estrutura dos domínios antes (à esquerda) e depois (à direita) dos cortes a laser [18].

- *Aços amorfos*: outro material com presença recente no desenvolvimento de núcleos magnéticos são os aços amorfos. Estes materiais, como o nome indica, possuem uma estrutura atômica não cristalina, pelos que os átomos que a constituem estão aleatoriamente distribuídos pelo material. Isto é conseguido através do arrefecimento rápido da liga em estado líquido, não permitindo que ocorra o ordenamento da estrutura cristalina. Apesar deste tipo de material apresentar uma potência de perdas baixíssima, a necessidade de incluir elementos não magnéticos na sua constituição (por exemplo, boro) implica que este material seja menos permeável magneticamente e que possua um valor de saturação de indução magnética inferior às chapas de grãos orientados, o que exige o emprego de maior quantidade de aço amorfo num núcleo para igualar os valores de saturação de indução magnética de outros transformadores. Com o desenvolvimento dos aços amorfos, os transformadores com núcleo deste material tem-se tornado sérios concorrentes aos transformadores com núcleo de aço de grãos orientados, como se pode observar no estudo de K. Inagaki et al. [29], ainda que, para já, só para transformadores de distribuição.
- *Aço microcristalino*: ainda outra via para a otimização do rendimento magnético da liga de aço-silício é a produção de aço microcristalino, que possui um método de fabrico de rápido arrefecimento, semelhante ao dos aços amorfos, mas com composição totalmente metálica e estrutura cristalina, o que permite aproximar as suas propriedades magnéticas das dos aços não amorfos. Contém ainda maior concentração de silício e alumínio que as chapas magnéticas comuns [18].

3.3.2 - Formas e secções

O circuito magnético é composto por colunas, onde são colocados os enrolamentos, e as culassas, as partes construtivas que unem as colunas. Os espaços entre colunas e culassas, por onde passam os enrolamentos, denominam-se por janelas do núcleo.

O núcleo pode se construído em dois modelos: construção tipo Core ou de colunas (Figura 3.18) e couraçado (Figura 3.19). No de colunas os enrolamentos rodeiam o núcleo quase por completo, enquanto no tipo couraçado é o inverso, é o núcleo que rodeia os enrolamentos [15].

No tipo Core os enrolamentos de alta e baixa tensão estão repartidos concentricamente por cada coluna do núcleo, com os enrolamentos de baixa tensão quase sempre no interior, mais perto do ferro. Esta disposição deve-se ao facto de que, caso o enrolamento de alta tensão estivesse mais próximo do núcleo, seria necessário colocar dois isolamentos de alta tensão, um entre o circuito magnético e o enrolamento AT e outro entre os enrolamentos BT e AT. Ao trocar os enrolamentos, passam a ser necessários dois isolamentos de baixa tensão, o que fica mais barato [20].

A construção tipo couraçado, coloca os enrolamentos alternadamente em torno de parte do circuito magnético, com o restante núcleo a rodear estes enrolamentos.

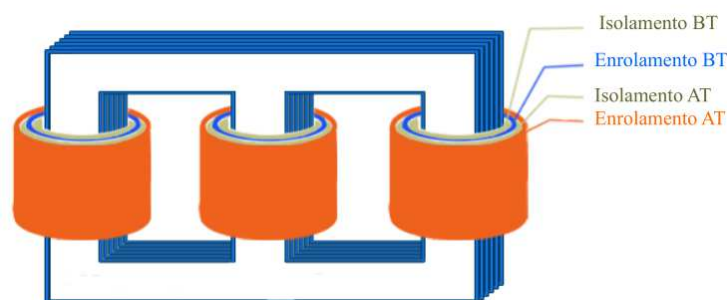


Figura 3.18 - Construção tipo Core de um transformador trifásico [30].



Figura 3.19 - Construção tipo couraçado de um transformador trifásico [30].

Existe ainda a opção de se construir um núcleo de construção couraçada com cinco colunas, como se observa na Figura 3.20. Estas colunas adicionais acrescentam caminhos magnéticos, que permitem que o fluxo magnético se divida por mais caminhos e cada coluna e culassa possa ser dimensionada para transmitir menos fluxo, em relação ao núcleo de três colunas. Na prática, isto permite projetar um transformador com um núcleo com menor altura e a mesma potência de perdas que um transformador com três colunas. Esta é uma alternativa mais cara ao tradicional núcleo com três colunas, sendo indicado caso haja exigências no transporte ou de espaço onde se pretende colocar o aparelho.

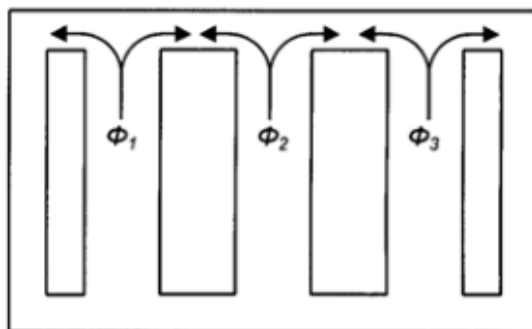


Figura 3.20 - Esquema da circulação dos fluxos magnéticos com núcleo com cinco colunas [19].

Para transformadores de pequeno tamanho, podem-se utilizar colunas de secção retangular no núcleo, onde se colocam bobinas circulares ou retangulares. Com o aumento do tamanho do transformador, a utilização de bobinas circulares torna-se preferida, pois esta geometria permite poupar cobre. Para este propósito, se as colunas do núcleo tiverem secção quadrada, existirá uma grande quantia de espaço não utilizado, visto que o comprimento da circunferência do enrolamento é superior ao perímetro da secção da coluna.

Um melhoramento bastante empregue é a utilização de secções de colunas cruciformes, onde é necessário dois ou mais tamanhos de chapa. Com transformadores cada vez maiores, são introduzidos mais tamanhos de secções de modo a diminuir a diferença entre o comprimento da secção do núcleo e a circunferência do enrolamento (como se pode ver pela Figura 3.21) e, como tal, reduzir a potência de perdas. Esta poupança de energia deve ser ainda equilibrada com o custo do trabalho de corte e montagem de tamanhos adicionais de chapas magnéticas e da redução de espaço para refrigeração entre o núcleo e enrolamento.

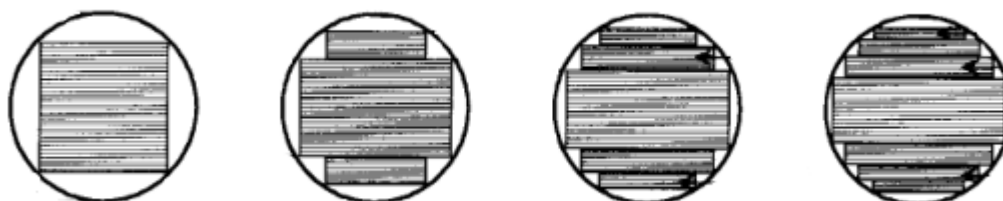


Figura 3.21 - Inserção de diversos tamanhos de chapa e diferença dos preenchimentos da área limitada pelo enrolamento [12].

Em transformadores maiores é impraticável cortar chapas com a forma de circuitos magnéticos completos, pois levaria a desperdícios de material e dificuldades em inserir as bobinas nos núcleos, visto que cada volta deve ser enrolada em separado [15],[20].

3.3.3 - Montagem

O primeiro passo na montagem do núcleo de um transformador é cortar as chapas ferromagnéticas que o constituem em parcelas. De entre os vários métodos de corte, é indicado por W. M. Arshad et al.[31] que o corte por guilhotina é o que causa menos alterações na permeabilidade magnética e perdas de energia. As lâminas da guilhotina devem estar afiadas de modo a diminuir as rebarbas nos limites das chapas, causadas pelo seu corte. Estas podem causar um aumento considerável nas perdas no núcleo, visto que podem perfurar o isolamento entre chapas consecutivas, estabelecendo contacto elétrico e criando caminhos para correntes parasitas. As rebarbas devem ser retiradas antes da montagem do núcleo [15],[18].

De seguida, empilham-se as chapas. Estas são colocadas de maneira a que as uniões das colunas às culassas (as juntas) tenham menor espessura possível para diminuir ao máximo a relutância do circuito magnético na circulação entre chapas. Estas juntas podem ser de topo (ou planas) ou embricadas (entrelaçadas). Na construção plana, as colunas e culassas montam-se separadamente e só depois de unem. Na construção embricada, todo o núcleo magnético se constrói de uma vez, encaixando as chapas, cada uma desfasada em relação à anterior e seguinte. Esta montagem é mais complicada que a anterior mas permite um aumento de estabilidade mecânica no conjunto, bem como uma redução da relutância global do circuito magnético e, conseqüentemente, da componente magnetizante da corrente em vazio e, ainda, das perdas magnéticas nas juntas [15].

A montagem embricada, também denominada de *step-lap*, pode ter várias configurações, dependendo de quantos desfasamentos se deseja empregar. Na Figura 3.22 apresenta-se o SSL ou *Single Step-Lap* e o MSL ou *Multiple Step-Lap*. As juntas MSL permite que o fluxo magnético as percorra de modo mais fluído, o que diminui as perdas nas juntas como diminui também o nível de ruído na operação. Tem como desvantagem o aumento do custo da manufatura de chapas de vários tamanhos, como o custo de uma montagem mais complexa em relação ao SSL [31].

Em ambos os casos, existe zonas nas juntas onde o fluxo não segue a direção da laminagem e origina, no caso das chapas de grão orientado, um aquecimento local devido ao aumento das perdas no ferro. Para evitar isto, as uniões, tanto planas como embricadas, não se realizam a 90° mas a 45°, cuja diferença se encontra na Figura 3.23 [15].

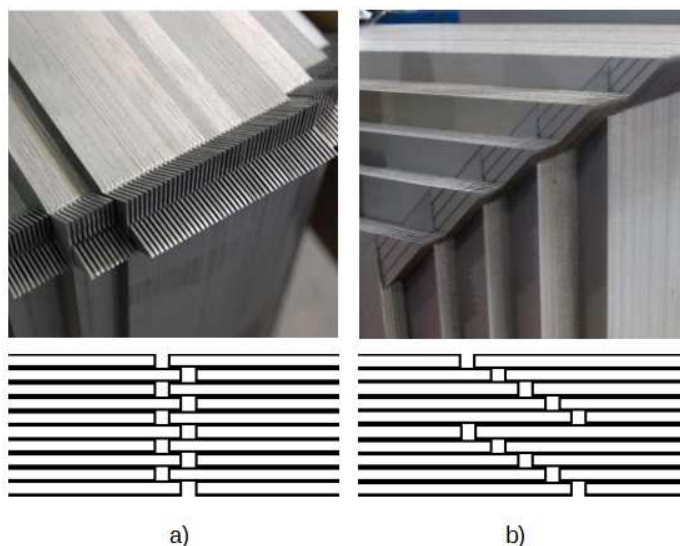


Figura 3.22 - Montagem embricada em a) SSL e b) MSL [31].

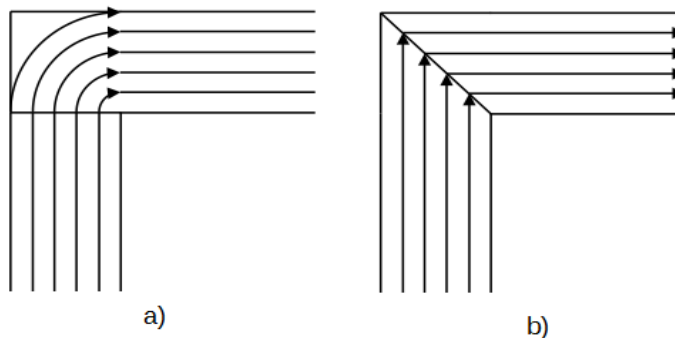


Figura 3.23 - Linhas do fluxo magnético na transição entre chapas a a) 90° e b) 45° [31].

O método mais utilizado para fixar e apertar as chapas dos núcleos em transformadores é através de aperto com estruturas de ferro ou aparafusados. Para este propósito, as chapas possuem furos para acomodar os parafusos ou cavilhas. Os parafusos devem ser isolados eletricamente do núcleo tanto ao comprido como nas pontas para evitar curtos-circuitos nas laminagem ou correntes parasitas. O conjunto de chapas pode ainda ser apertado por meio de blocos de madeira ou perfis de ferro com ajuda de parafusos isolados, ajudando a aumentar a rigidez mecânica do conjunto e evitando vibrações. A existência de furos nestas chapas causa interferências com o fluxo magnético que as percorre, especialmente em chapas de grãos orientados, pelo que se tem procurado substituir os furos e cavilhas por bandas de aço (devidamente isoladas) ou fibra de vidro que rodeiem e apertem as colunas do núcleo. Um exemplo desta aplicação observa-se na Figura 3.24. Por motivos mecânicos, a fixação das culassas são sempre por aparafusamento. São ainda usadas placas de endurecimento para dar mais rigidez à construção e facilitar o uso dos parafusos. Estas placas são isoladas do núcleo e descontinuas das juntas para evitar que o fluxo as use como caminho magnético paralelo às chapas [15],[18],[20].

Para a colocação dos enrolamentos, é necessário retirar a culassa superior para que os enrolamentos sejam elevados e colocados verticalmente nas respectivas colunas. Antes, é necessário que todas as peças do núcleo estejam totalmente fixas, com ajuda de bandas de aço e da culassa inferior. A culassa superior ajuda nesta fase de fixação, daí que esta é retirada antes da colocação dos enrolamentos e reposta depois, ao invés de ser só colocada depois. Com a descida e fixação das bobinas no núcleo, estas bandas podem ser sucessivamente retiradas pois a estrutura dos enrolamentos fornece rigidez ao núcleo.

No fim, é necessário ligar o núcleo à terra, para referenciar o potencial e evacuar as correntes parasitas que nele circulem ou descargas elétricas provocadas por curto-circuitos, e instalar a blindagem magnética, se for esse o caso.

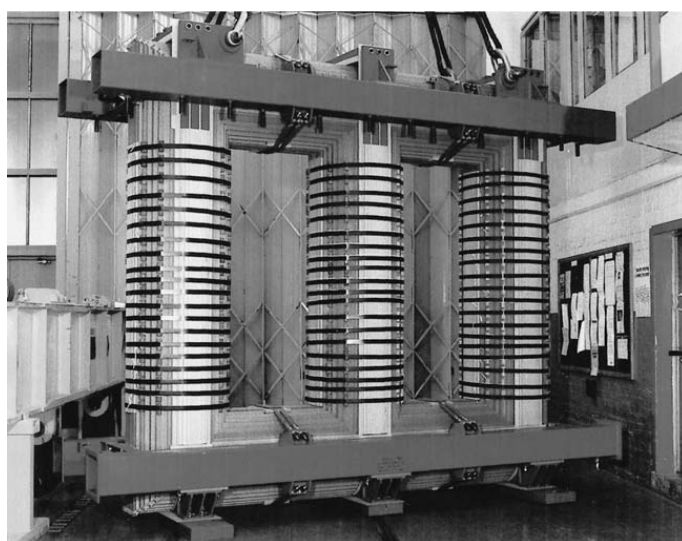


Figura 3.24 - Núcleo de transformador trifásico com culassas e bandas de aço a fixar as chapas [18].

3.4 - Síntese

Neste capítulo explica-se o funcionamento do transformador elétrico, através das leis de Ampère e de Faraday, assim como se apresenta a relação numérica entre forças eletromotrizes dos circuitos primário e secundário, tanto na situação de um transformador ideal como na situação de um transformador real.

Explica-se posteriormente a origem da potência de perdas do transformador, os seus efeitos e medidas para a minimizar, assim como as consequências destas últimas no volume, complexidade e preço do produto final.

Por sim, apresentam-se os diferentes tipos de enrolamentos, os vários métodos de isolamento elétrico, de refrigeração do transformador, o papel do óleo do transformador e os vários componentes do tanque e respetivas funções, sumarizando os vários aspectos construtivos que um transformador contém.

Por último, apresenta-se uma análise da composição química das chapas do núcleo do transformador, a geometria que pode tomar e, por fim, as etapas da sua montagem, que são fatores importantes na geração de ruído do transformador e condicionamento do fenómeno da magnetostricção.

Capítulo 4

Magnetostricção e ruído em transformadores

O transformador elétrico, como todas as máquinas, produz ruído devido à interação entre os seus subsistemas estruturais e à circulação de fluidos por dentro e fora dele. Essas interações produzem vibrações na estrutura do transformador, que por sua vez são transmitidas para as partículas do meio que o rodeia (habitualmente, o ar). No ar, estas vibrações produzem ondas acústicas que se propagam por esse meio até aos ouvidos e geram ruído acústico. Como a emissão contínua de ruído de um transformador prejudica a qualidade de vida de quem vive e trabalha em seu redor, o ruído tem-se revelado ser uma condição cada vez mais requisitada e complexa no projeto destas máquinas, pelo que começam a surgir documentos normativos, como por exemplo o NEMA Standard Publication No. TR 1 - 1993, que apresenta valores máximos de nível sonoro para transformadores de várias potências nominais.

Neste capítulo, o ruído emitido pelo transformador é caracterizado, são apresentadas as suas origens e os fatores de agravamento e de atenuação, para cada caso. São apresentadas soluções para a remoção de ruído e, no final, destaca-se o fenómeno da magnetostricção, tema principal desta dissertação e, segundo diversos livros e artigos científicos, a fonte principal de ruído do transformador elétrico.

4.1 - Caracterização do ruído do transformador

O ruído acústico produzido pelo transformador caracteriza-se por um “*hum*”, conseqüente de vibrações provocadas, nomeadamente, pelo efeito de diversos fenómenos magnéticos nas peças ferromagnéticas que o compõem. Esse som possui frequências definidas, pares e múltiplas da frequência de alimentação (para uma alimentação de frequência 50 Hz, registam-

se valores de 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, etc), pelo que, tendo em conta que a gama habitual de frequências audíveis de uma pessoa saudável está contida, aproximadamente, entre os 20 Hz e os 20 kHz, os componentes tonais do ruído do transformador, que são maioritariamente de baixa frequência, estão contidos precisamente neste intervalo. Por este motivo o ruído emitido por um transformador é uma fonte de incómodo e intrusão, provocando queixas por parte de quem trabalha ou vive em seu redor.

Também, neste contexto, deve-se assegurar que a frequência natural do núcleo (e das restantes peças) não coincida com a frequência de excitação elétrica ou com as frequências do ruído, para que não haja ressonância e amplificação do ruído. As vibrações do núcleo, quando transmitidas pelo ar, óleo ou estrutura, podem também induzir ressonâncias noutros componentes que não sejam fontes diretas de ruído. Estas amplificações devem ser eliminadas na fase do projeto ou deve-se criar uma supressão de vibração de modo a controlar a sua amplitude [33]. Um exemplo deste fenómeno observa-se com as medições das frequências naturais e dos deslocamentos e acelerações que ocorrem no núcleo de um transformador por W. Kitagawa et al. [34]. A Figura 4.1 apresenta o espectro das frequências naturais desta peça, onde o componente com mais amplitude possui o valor de 5430 Hz. Ao excitar eletricamente o transformador para vários valores de frequência (Figura 4.2), observou-se que o valor máximo de deslocamentos e aceleração no núcleo se efetuava com a frequência de alimentação de valor 2700 Hz, que é aproximadamente metade da frequência natural do núcleo (recorde-se que a componente principal do ruído é o dobro da frequência do fluxo de campo magnético, que é igual à frequência da alimentação do transformador).

Deve-se ainda referir que a presença de harmónicos na rede onde se integra o transformador aumenta o nível sonoro do ruído produzido por ele, visto que há um aumento do número de componentes de forças magnéticas (oriundas dos harmónicos da corrente do circuito AT ou BT) e, por isso, aumenta a probabilidade de excitação de vibrações ressonantes nas partes estruturais do transformador (núcleo, enrolamentos, tanque, etc...) e de excitação de ressonâncias acústicas. Neste contexto, e através do estudo de M. Ertl e S. Voss [35], conclui-se que os harmónicos da corrente da carga de maior ordem têm uma maior contribuição no aumento do ruído à carga total do que harmónicos de menor ordem. Também a presença de componente de corrente contínua na alimentação do transformador provoca um aumento da área de histerese (e a perda da sua simetria) e aumenta o ruído produzido por este, segundo a investigação de H. Inoue e S. Okabe [36].

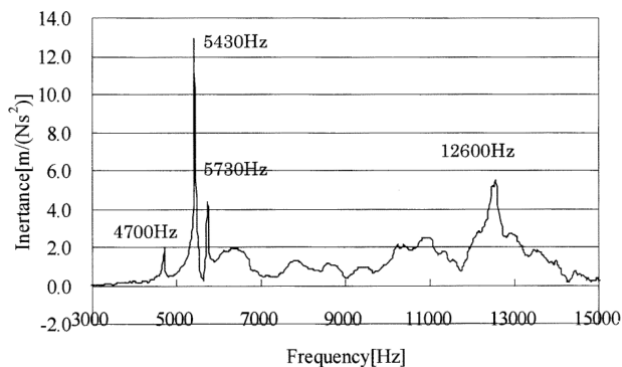


Figura 4.1 - Resultado da medição das frequências naturais no núcleo em estudo [34].

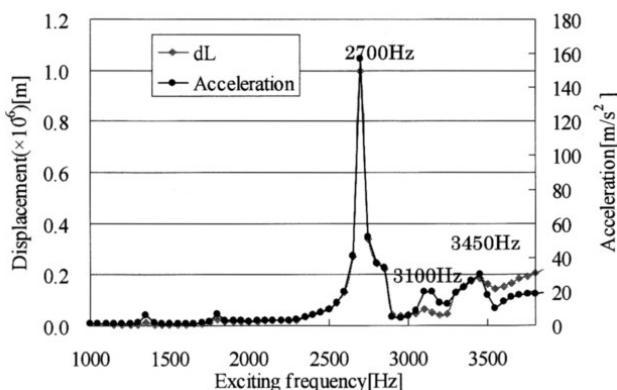


Figura 4.2 - Medição do deslocamento e aceleração da chapa do núcleo excitado magneticamente para vários valores de frequência da tensão de alimentação [34].

4.1.1 - Principais fontes de ruído

Apesar do já referido, a principal fonte da geração de ruído num transformador são deformações mecânicas periódicas, do núcleo do transformador e dos seus enrolamentos, resultantes de fenómenos eletromagnéticos. Estas deformações devem-se a três forças principais: forças repulsivas e atrativas de Maxwell, magnetostrição (que será explicada adiante) e forças de Lorentz.

As forças de Maxwell, ou de relutância, atuam nas fronteiras entre dois meios com propriedades magnéticas diferentes, onde, neste caso, se associa à fronteira entre as chapas magnéticas e o ar ou o óleo. O vetor desta força calcula-se através de [38]:

$$\vec{F}_M = \iint \left(\vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) - \frac{1}{2} (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n} \right) dS \quad (4.1)$$

onde \vec{F}_M é a força de Maxwell, \vec{H} é a intensidade de campo magnético, \vec{B} é a indução magnética e \vec{n} é o vetor normal à superfície S das chapas do núcleo magnético. Através da representação gráfica destas forças, na Figura 4.3 (a), observa-se que, na operação do transformador, registam-se forças de Maxwell (i) repulsivas entre chapas de diferentes planos, (ii) forças

atrativas entre chapas adjacentes no mesmo plano e (iii) forças atrativas entre chapas de planos diferentes na zona próxima do entreferro.

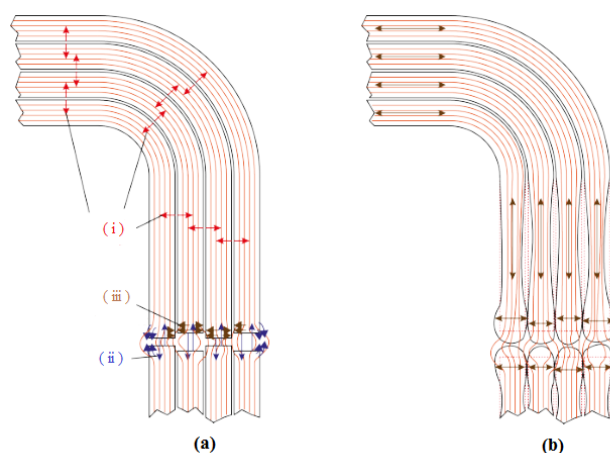


Figura 4.3 - Representação gráfica da atuação das (a) forças de Maxwell e (b) magnetostricção [38].

O impacto entre chapas devido a estas forças depende grandemente da construção do núcleo e dos entreferros existentes entre as chapas, no mesmo plano ou em planos diferentes, pelo que se deve apertar as peças do núcleo ao longo de toda a sua extensão, ao invés de apenas nos canto do núcleo ou só nas culassas, para diminuir o entreferro e, assim, diminuir a movimentação das chapas, frutos das forças de Maxwell [37],[38].

Por seu lado, as forças de Lorentz devem-se à interação dos eletrões da corrente que percorre os enrolamentos com o fluxo de campo magnético que percorre o interior destas bobinas. Estas forças provocam vibrações radiais e axiais nos componentes, que se propagam pelo ar ou óleo e pela restante estrutura do transformador. O seu vetor força \vec{F}_L calcula-se através de $\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B}$, sendo \vec{j} a densidade de corrente do condutor e \vec{B} a indução magnética que o atravessa. O seu efeito apresenta-se na Figura 4.4.

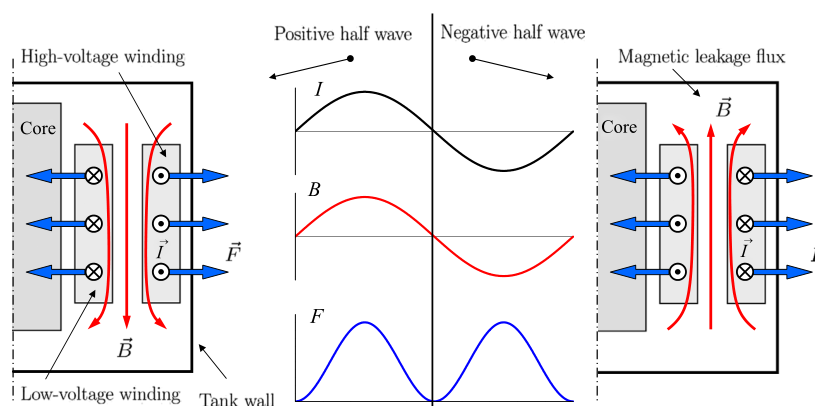


Figura 4.4 - Representação gráfica em vista lateral da atuação das forças de Lorentz nos enrolamentos do transformador [35].

As vibrações e ruído proveniente do núcleo dependem maioritariamente da sua construção, sistema de aperto e qualidade da chapa magnética utilizada. Por exemplo, em termos de construção, D. Snell [40] concluiu que o ruído diminui quanto maior for a sobreposição das chapas na zona das juntas, assim como do estudo de B. Weiser e H. Pfützner [41] resultou que o aumento do número de *step-lap* do núcleo do transformador diminui o ruído total emitido por este. Estas medidas permitem que o fluxo magnético circule por um caminho de menor relutância, evitando que este percorra o entreferro e minimizando a indução de forças de Maxwell, reduzindo as vibrações e ruído total.

No contexto do aperto, exige-se cuidado no modo como se condicionam as chapas no núcleo. As culassas são os principais elementos da estrutura de aperto das chapas e quanto mais apertadas estiverem, mais homogênea será a distribuição da pressão ao longo do núcleo e menor será a deflexão das chapas na zona média entre culassas, devido a vibrações. No entanto, o aperto acima dos valores recomendados pode deformar as chapas do núcleo, que é uma consequência nefasta no que toca a produção de ruído. Uma medida para homogeneizar a distribuição de pressão pelo núcleo é furar as chapas para inserirem cavilhas ou parafusos e impedir a deflexão das chapas nesses locais, tendo a desvantagem, referida anteriormente, de prejudicar a passagem de fluxo magnético pelas chapas [42].

Ainda sobre o aperto, existe o problema da elongação dos metais com o calor, onde, neste caso, as diferentes peças metálicas aumentarão de dimensão a velocidades e proporções diferentes, introduzindo forças de tração e compressão nos componentes do transformador, como as chapas do núcleo. O estudo de Masato Mizokami e Yousuke Kurosaki [43] determinou que a existência de tensão compressora nas chapas do núcleo na direção da laminação quase sempre aumenta os níveis de ruído, ao passo que forças de tração nesta mesma direção não provocam praticamente efeito no ruído. Pelo contrário, forças de tração na direção transversal à da laminação aumentam sempre a magnitude da magnetostrição. De modo a atenuar o efeito das tensões compressivas, pode-se cobrir as chapas com um revestimento de grande resistência a tensões mecânicas [44].

Para finalizar, a qualidade das chapas é bastante importante, principalmente em relação ao fenómeno da magnetostrição. Para exemplificar, com a investigação de S. L. Foster e E. Reiplinger [45], conclui-se que o recozimento do material das chapas do núcleo (Figura 4.5), ou até a sua deformação por impacto de objetos (Figura 4.6), altera profundamente a elongação do material devido ao fenómeno magnético referido, podendo diminuir a sua magnitude ou mesmo inverter o seu sentido. Outra amostra da influência da qualidade da chapa advém do estudo de T. Yamaguchi [46], que revelou que a redução da espessura das chapas de 0,3 mm para 0,05 mm diminui o valor da magnetostrição pico a pico por um quarto.

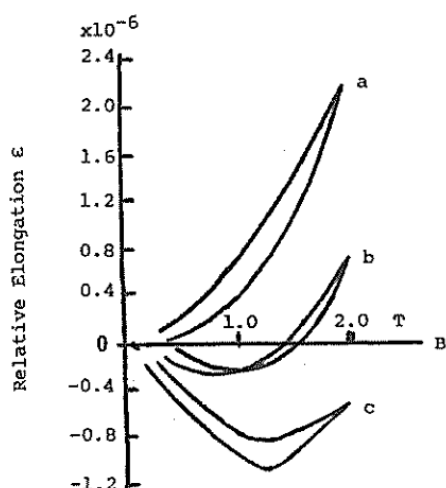


Figura 4.5 - Magnetostricção para uma magnetização DC e recozimento de 5 minutos às temperaturas (a) 780 °C, (b) 820 °C e (c) 850 °C, seguidos de um arrefecimento lento [45].

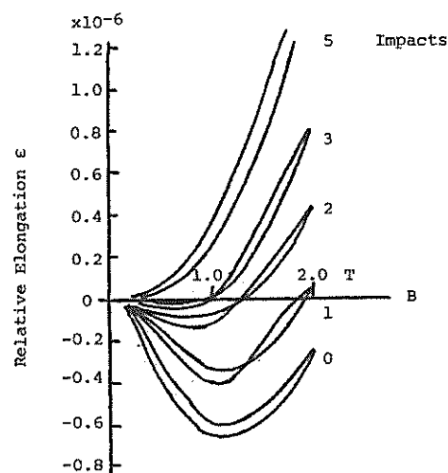


Figura 4.6 - Magnetostricção para uma magnetização DC de uma chapa recozida a 800 °C após sofrer o número de impactos indicados nas curvas de um peso de 330 g, a uma altura de 20m [45].

Quanto aos enrolamentos, as amplitudes das suas vibrações dependem das propriedades elásticas do condutor e do seu isolamento elétrico. Num enrolamento bem montado e bem enrolado, as propriedades elásticas do material isolado são praticamente lineares no intervalo de deslocamentos em que ocorrem e sob condições normais de correntes. Por seu lado, as deflexões destes componentes e as velocidades das suas vibrações são proporcionais à força de Lorentz que neles atua, ou seja, são proporcionais ao quadrado da corrente da carga. Como a potência sonora radiada por um corpo vibratório é proporcional ao quadrado da velocidade de vibração, resulta que a potência sonora variará com a quarta potência da corrente da carga, pelo que, para aplicações que necessitem de transformadores com baixo nível sonoro, o ruído dos enrolamentos, que dependente da carga e tem origem eletromagnética, pode tornar-se uma contribuição significativa para o som total do transformador [47].

Podem-se ainda registar a existência de forças de Lorentz nas chapas do núcleo devido às correntes parasitas que nele circulam e aqui, novamente, a amplitude das forças e, conseqüentemente, do ruído emitido, dependem da conceção do núcleo, de modo a minimizar as correntes parasitas.

4.1.2 - Fontes secundárias de ruído

Para além do núcleo magnético e enrolamentos, existem outras fontes de ruído que, apesar de secundárias, podem ser fator de exclusão na altura de compra do transformador. Estas são as vibrações causadas por outras partes estruturais do transformador, como a blindagem magnética, ruído provocado pelas ventoinhas e bombas de óleo, ruído provocado por descargas elétricas nos isolamentos e ruído provocado pela abertura e fecho de shunts magnéticos. Devido à pouca frequência de ocorrência dos dois últimos casos, dá-se destaque aos primeiros.

Como se referiu no capítulo anterior, transformadores de potência emitem calor considerável devido às perdas no núcleo, bobinas e outros componentes estruturais do transformador. Por exemplo, os sistemas de refrigeração a óleo e ventoinhas emitem ruído. Esta emissão sonora é mais subtil que a dos restantes componentes do transformador e, portanto, menos incomodativo para a vizinhança.

A origem do ruído das ventoinhas vem do fluxo de ar turbulento, resultante das flutuações de pressão. No espectro das frequências, este ruído tem um pico perto da frequência com que as pás da ventoinha passam pelas restantes partes estruturais como os suportes dos motores ou as grelhas protetoras.

Por seu lado, o fluxo de óleo, utilizado como auxiliar de refrigeração, pode causar vibrações nos tubos que atravessa, ainda que estas raramente contribuam significativamente para o ruído emitido pelo transformador, exceto para maiores taxas de fluxo ou em transformadores de baixíssimo ruído.

O ruído produzido por estes componentes secundários é usualmente caracterizado por diversas frequências do espectro, onde não sobressaem baixas, médias ou altas frequências, ao contrário do ruído no núcleo. As ventoinhas de refrigeração normalmente possuem uma maior contribuição para o ruído total em transformadores de menor potência e transformadores que operem com menores níveis de indução no núcleo [47],[48].

4.1.3 - Métodos de controlo de ruído

Devido às perturbações que o ruído do transformador provoca nas pessoas, têm-se desenvolvido métodos de controlo ativo e passivo para o atenuar e tentar mesmo eliminá-lo.

Os métodos passivos operam sempre do mesmo modo, independentemente do resultado, enquanto os ativos registam o resultado do seu sistema e regulam-se de modo a aproximar-se do objetivo que se pretende. O objetivo dos métodos ativos é serem mais abrangentes e responderem com mais rapidez e eficiência ao estado atual do sistema, pelo que costumam ser métodos mais caros que os passivos.

Alguns métodos passivos para a atenuação do ruído já foram referidos anteriormente neste capítulo, como um aperto cuidado das chapas magnéticas e dos enrolamentos, a utilização de chapas magnéticas finas, com elevado nível de saturação magnético, de grãos orientados e sem deformações físicas e a montagem do núcleo magnético com vários *step-lap*. Listam-se aqui outros:

- Deve-se evitar instalar o transformador perto de superfícies refletoras de som. Caso não seja possível evitar, colocar material absorvente de ruído entre o transformador e a superfície refletora;
- É recomendável instalar o transformador em superfícies com massa superior à do transformador e evitar superfícies de madeira ou tijolo;

- Deve-se evitar instalar o transformador em locais apertados ou corredores;
- É recomendável instalar calços anti-vibração nas zonas do transformador que entram em contacto com as superfícies;
- Podem-se instalar painéis e coberturas de atenuação sonora no tanque do transformador, tendo como desvantagens o aumento de volume e custo do aparelho. Esta medida desfavorece as condições térmicas e de manutenção do aparelho e é pouco eficiente na redução de ruído durante a operação à carga e na atenuação de ruído de menor frequência;
- Deve-se colocar isolamento de vibração entre a estrutura de aperto da parte ativa do transformador e o seu tanque [49];
- Segundo A.J. Moses et al. [44], cobrir as chapas magnéticas com revestimento de baixa sensibilidade às tensões mecânicas diminui o efeito da magnetostricção. Também segundo Z. Xian et al [50], o revestimento das chapas com o compósito NSMC (constituído, entre outros, por nanopartículas ferromagnéticas) reduz o ruído e vibrações nas chapas do núcleo, em relação ao revestimento por compósitos sem partículas ferromagnéticas como o *epoxy*.

A primeira tentativa de controlo ativo de ruído de transformadores elétricos foi reportada por Conover em 1956 nos Estados Unidos da América e utilizava um sinal de tensão, originado do lado de baixa tensão do transformador, que era modificado por um retificador total de onda para criar um sinal de referência. Este sinal era transmitido por estreitos filtros passa-banda para isolar o ruído periódico a 120 Hz, 240 Hz e 360 Hz (a frequência da tensão de alimentação nos EUA é de 60 Hz). Antes de ser recombinação e emitido por um altifalante, colocado na parede do tanque, as amplitudes e fases dos três sinais individuais foram ajustadas manualmente, utilizando amplificadores e reguladores de fase variáveis, de modo a que a soma do som emitido pelo transformador e o sinal modificado na fase e amplitude resulte um sinal de valor nulo (pode-se observar o esquema deste sistema na Figura 4.7). Conover conclui que, ainda que se tenham registado, com um microfone, diminuições até 25 dB, esta redução está restrita a um ângulo bastante pequeno entre a linha ligada ao microfone e o centro da parede do tanque. Noutras direções, o ruído invariavelmente aumentou com a operação da coluna de som de controlo. Devido a esta restrição do ângulo de atuação, é necessário um elevado número de microfones e altifalantes a rodear o transformador para aumentar a área de atenuação de ruído e se tornar uma solução prática no contexto urbano.

Outra possibilidade de controlo de transformadores elétricos é o uso ativo de atuadores de força no tanque para suprimir os modos de vibração que contribuem para a maioria da radiação sonora, que possui a mesma desvantagem de ser necessário um número elevado de sensores e atuadores para se conseguir uma boa atenuação [51]. Outro grande entrave à utilização do controlo ativo na eliminação de ruído em transformadores é basear-se na eletrónica, que possui

uma natureza sensível aos agentes exteriores e precisa de mais manutenção que o próprio transformador, que tem uma esperança de vida de dezenas de anos e, espera-se, que possua pouca necessidade de manutenção.

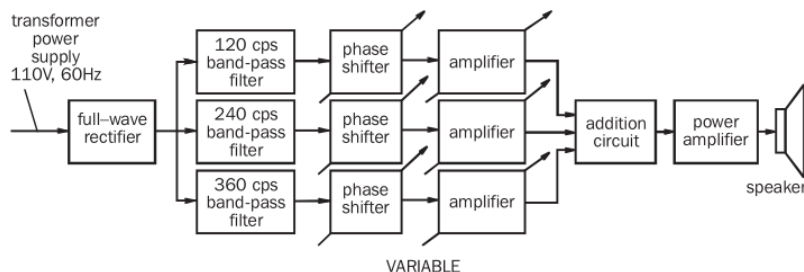


Figura 4.7 - Esquema do Sistema de controlo ativo de Conover [51].

4.1.4 - Análise do ruído do transformador para diagnóstico do seu estado

Apesar de indesejável, o ruído do transformador pode ser útil para diagnosticar o seu estado. A análise da emissão acústica por C. Bartoletti et al. [52] permitiu concluir que, com a idade e aparecimento de anomalias no transformador, o seu ruído apresentava harmónicos com maior amplitude ou até novos harmónicos, relativamente ao espetro das frequências do ruído de um transformador novo. Resumindo:

- *Transformador novo:* na análise de baixas frequências (abaixo de 15 kHz) e em condição de curto-circuito, a forma de onda do sinal da vibração é sinusoidal e de frequência 100 Hz. Na condição de curto-circuito, esta frequência deve-se à fonte principal de vibrações, os enrolamentos, que dependem da corrente que é também praticamente sinusoidal. Na condição de circuito aberto, a fonte principal de vibrações é a magnetostrição, que é um fenómeno não linear, pelo que a forma de onda do sinal do ruído apresenta uma frequência de 100 Hz com interferências e torna o sinal não sinusoidal. Na análise de altas frequências (entre 20 e 100 kHz) o sinal do ruído não apresenta características relevantes, sendo apenas maior que o ruído, tanto em curto-circuito como em circuito aberto.
- *Transformador com idade:* na análise de baixas frequências, o ruído emitido por transformadores com idade revela um aumento da amplitude dos harmónicos com frequências múltiplas da fundamental. Este fenómeno é mais notório na análise de um transformador na condição de circuito aberto.
- *Transformador com anomalia:* considera-se anomalia o caso de enrolamento solto, vibrações excessivas no núcleo, descargas parciais. Nesta situação, e na análise das altas frequências, a razão entre sinal e ruído aumenta, algo que é mais visível na condição de curto-circuito que na condição de circuito aberto.

Os resultados apresentam-se nas Figuras 4.8 e 4.9 onde lf indica as análises de baixas frequências, hf indica as análises de alta frequência, ϵ a amplitude do sinal, a e a' referem-se aos testes do transformador novo, b e b' referem-se aos testes do transformador com idade e c e c' referem-se aos testes do transformador com anomalia.

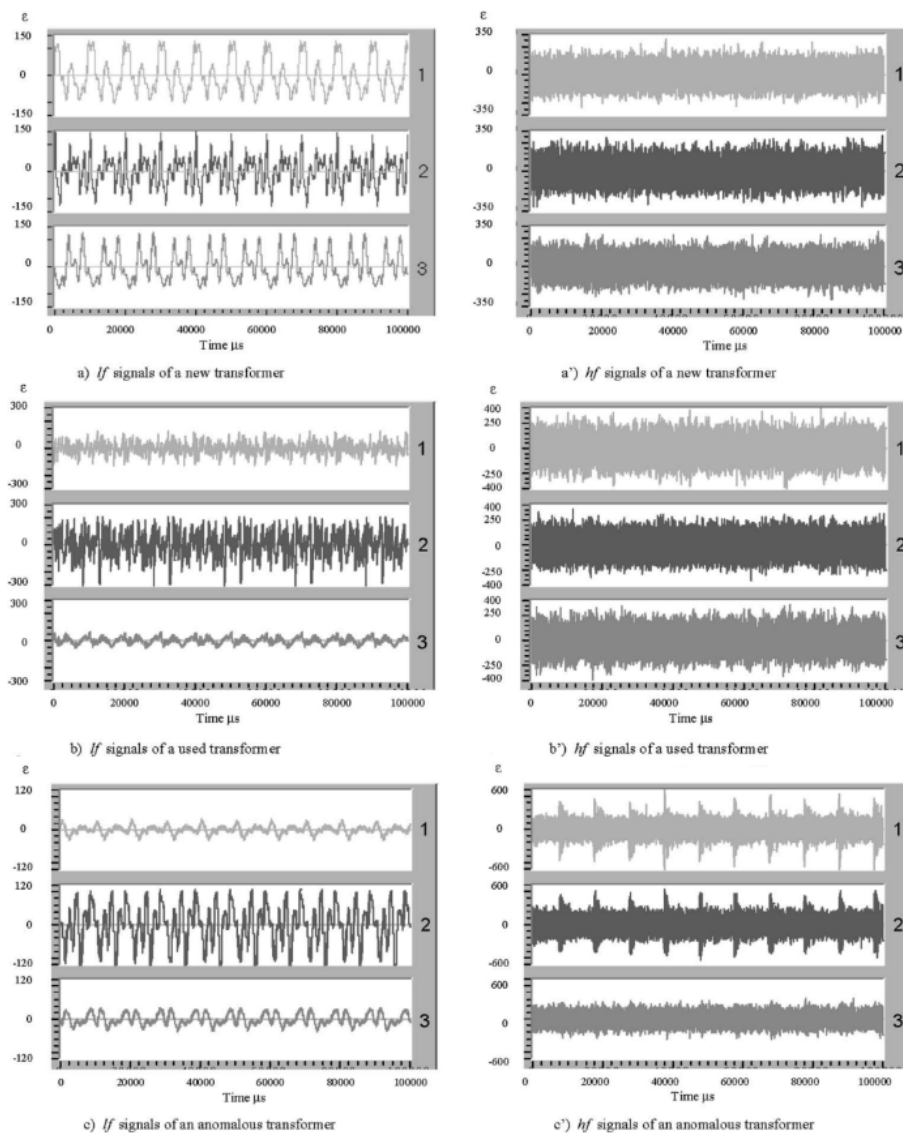


Figura 4.8 - Testes dos transformadores em condição de circuito aberto [52].

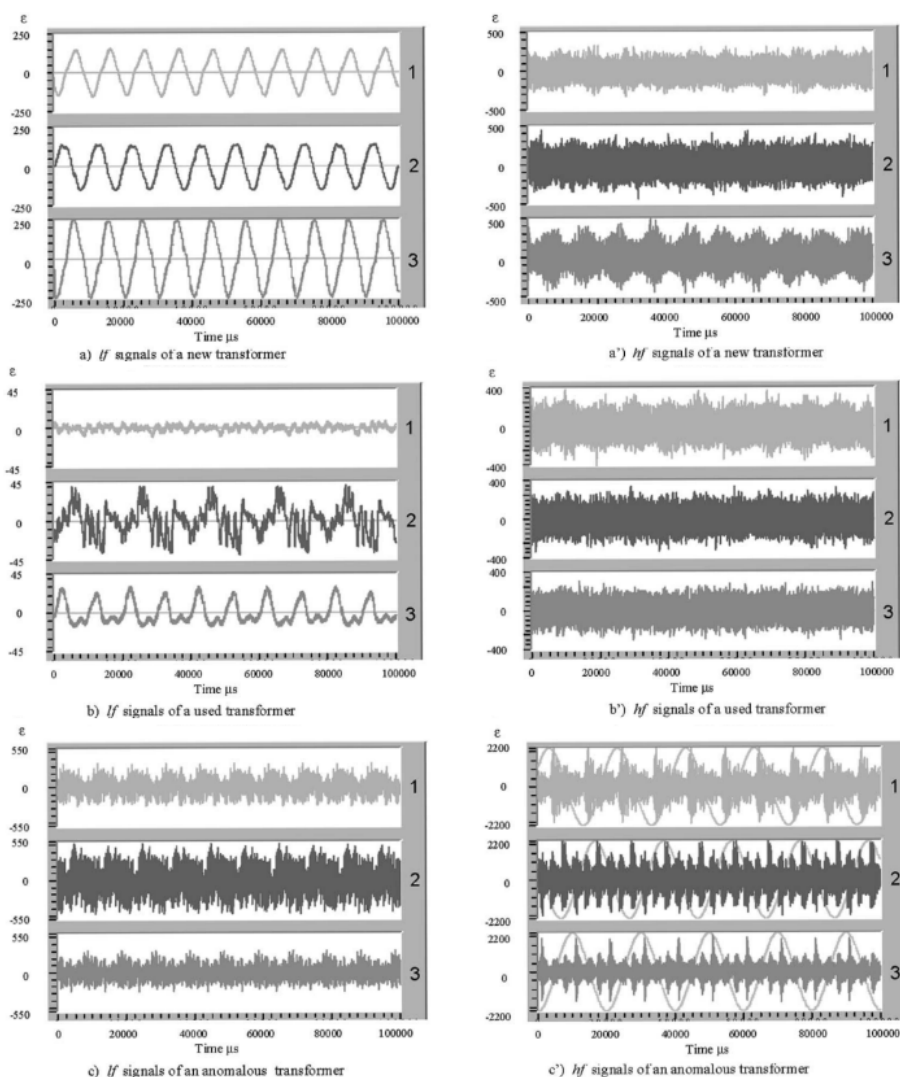


Figura 4.9 - Testes dos transformadores em condição de curto-circuito [52].

4.2 - Fenómeno da magnetostrição

Um material magnetostritivo vê as suas dimensões serem alteradas quando é colocado sob o efeito de um campo magnético, sem alterar o seu volume. A natureza deste fenómeno é ilustrada na Figura 4.10 (a). O tubo de um material magnético de comprimento L é colocado dentro de uma bobina cujo fio transporta corrente elétrica, de modo a induzir um campo magnético no espaço onde o tubo está inserido. Nestas condições, o comprimento do tubo aumenta em ΔL e a razão $\Delta L/L$ é o valor da magnetostrição. Esta figura ilustra, para além do aumento em comprimento na direção do campo, uma diminuição de comprimento em direções perpendiculares a este, onde se observa que a magnetostrição pode ter valores positivos ou negativos, dependendo em que sentido se executa a medição.

A Figura 4.10 (b) revela dois aspetos importantes da magnetostrição: com o aumento de H eventualmente se atingirá o valor máximo, que se denomina de saturação (λ_{sat}), e o sinal de λ é independente do sinal do campo H , pelo que tubo aumenta ou diminui de comprimento tanto

para valores positivos e negativos de campo magnético (magnetostricção é, portanto, um efeito de segunda ordem). Este facto implica também que a magnetostricção possua uma frequência fundamental com o dobro do valor da frequência de magnetização.

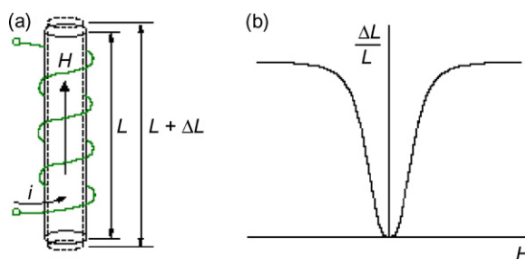


Figura 4.10 - Representação gráfica do fenómeno da magnetostricção. A figura (a) apresenta as alterações dimensionais em resposta a um campo magnético e (b) relaciona a razão $\Delta L/L$ com esse campo magnético [53].

De seguida serão apresentados dois tipos de magnetostricção de Joule nos materiais ferromagnéticos: magnetostricção espontânea, que surge naturalmente para criar a estrutura cristalina do material, e a magnetostricção induzida por um campo magnético externo. Também será mencionada a utilização prática deste fenómeno em atuadores e sensores.

4.2.1 - Magnetostricção espontânea

A magnetostricção é a alteração da estrutura cristalina do material em função da orientação dos seus momentos magnéticos e tem origem na interação entre os movimentos de spins dos eletrões e os movimentos de rotação dos eletrões em torno do núcleo do átomo. Como se explicou no Capítulo 2, a energia dos átomos de materiais ferromagnéticos que apresentem momento magnético é menor que a energia desses átomos com momento magnético nulo, pelo que os eletrões com o mesmo spin tendem a alinhar-se numa direção, formando domínios magnéticos. Para concretizar esta alteração sem interferências entre órbitas dos eletrões de diferentes átomos, as distâncias inter-atómicas têm de se alterar. Esta deformação até ao estado final de menor energia denomina-se de magnetostricção espontânea e é possível observá-la durante o arrefecimento de uma amostra que foi aquecida até à temperatura de Curie, processo representado na Figura 4.11.

Ao ser aquecido até esta temperatura, o alinhamento e magnetização de cada domínio da amostra decresce. Os domínios enfraquecem e os momentos magnéticos dos átomos do material ficam desordenados, tornando o material ferromagnético em paramagnético, como se regista pela Figura 4.11 a). Ao arrefecer a amostra, os momentos magnéticos tornam a surgir, formando-se novamente domínios orientados magneticamente e o material retoma a sua natureza ferromagnética, como mostra a Figura 4.11 b). Caso seja magnetizado até à saturação, os domínios estão maioritariamente ou totalmente direcionados no sentido da indução magnética, situação presente na Figura 4.11 c) [4].

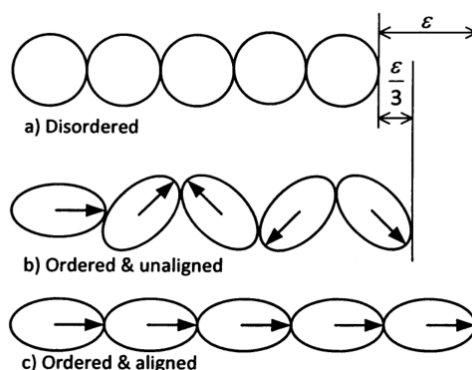


Figura 4.11 - Representação gráfica da magnetostricção espontânea: a) representa o estado desordenado (paramagnético) do material acima da temperatura de Curie, b) corresponde ao estado desmagnetizado e ferromagnético abaixo da temperatura de Curie e c) representa o estado ferromagnético e magnetizado até à saturação [4].

4.2.2 - Magnetostricção induzida por um campo magnético externo

Antes de considerarmos a magnetostricção nos grãos, deve-se explicar a origem das direções de diferentes facilidades de magnetização.

Na estrutura cristalina cúbica (que está presente no ferro e aço), a distância entre átomos ou iões não é igual em todas as direções. Numa direção, podemos registar a menor distância entre dois átomos, mas a distância de um átomo ao mais próximo, a 90° da direção inicial, pode ser maior, tal como a distância ao átomo mais próximo a 45° pode ser ainda superior. Deste modo, quando os eletrões se aproximam e se alinham numa direção específica, formando espontaneamente domínios magnéticos de diferentes tamanhos alinhados em diferentes direções, surgem direções específicas onde o material tem diferentes dificuldades em se magnetizar. Como se observa pela Figura 4.12 a), o caso do ferro (que faz parte da composição da chapa magnética do transformador), a direção de mais fácil magnetização é a $[100]$, a de média dificuldade é $[110]$ e a de mais difícil magnetização é a $[111]$. A representação gráfica desta direções encontra-se na Figura 4.12 b).

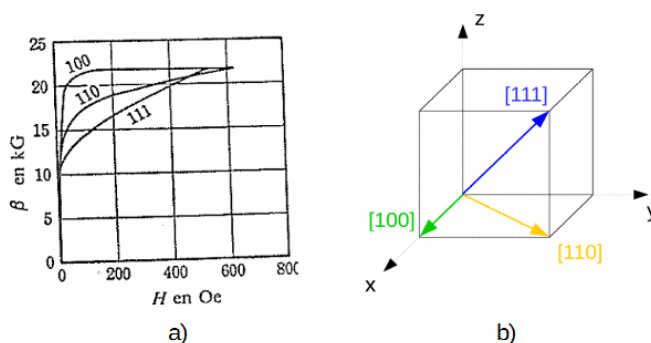


Figura 4.12 - a) Curvas de magnetização em várias direções dum cristal de ferro [1] e b) representação gráfica das direções num cristal cúbico através dos Índices de Miller.

Segundo a equação de Becker-Döring, o valor da magnetostricção de saturação de um cristal obtém-se por [17]:

$$\lambda_s = \frac{3}{2}\lambda_{100}\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - \frac{1}{3}\right) + 3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3) \quad (4.2)$$

onde α_1 , α_2 e α_3 são os cossenos direcionais em relação à direção da magnetização, β_1 , β_2 e β_3 são os cossenos direcionais em relação à direção da medição da deformação, com respeito aos eixos do cristal e λ_{100} e λ_{111} são os valores de saturação da magnetostricção quando o cristal é magnetizado nas direções [100] e [111], respetivamente.

Como referido atrás, a magnetostricção é uma grandeza anisotrópica pois depende da direção em que o campo magnético é aplicado em relação aos eixos cristalinos da amostra. Para uma melhor análise do fenómeno da magnetostricção induzida por um campo magnético externo, utiliza-se como exemplo um grão composto por quatro domínios com paredes a 90°, no seu estado de menor energia, como o exemplo da Figura 4.13. Dois domínios encontram-se magnetizados na direção de mais fácil magnetização ([001]), os restantes na direção transversal ([010]) e o campo magnético tem a mesma direção que a direção de fácil magnetização.

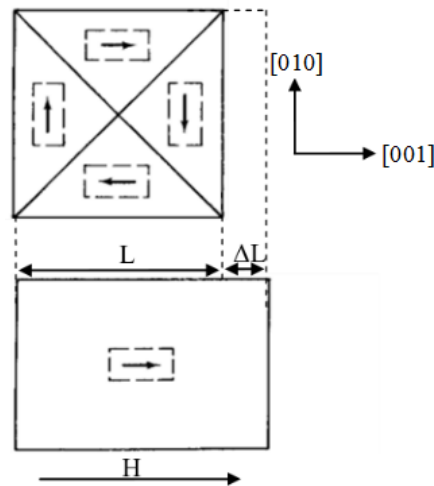


Figura 4.13 - Esquema da elongação provocada pela magnetização de um cristal na direção de fácil magnetização [17].

Analisando os domínios cujos campos magnéticos espontâneos têm a mesma direção do campo externo, estes podem estar orientados no sentido oposto ao campo magnético externo e regista-se um deslocamento de 180° das suas paredes ou podem ter a mesma orientação e não haver alterações nas suas paredes. Na primeira situação, os domínios com direção $[00\bar{1}]$ deslocam-se para a direção [001] ($[00\bar{1}]$ é na mesma direção que [001] mas com sentido oposto). Para o cálculo da diferença de deformação magnetostritiva, considera-se para a posição inicial ($[00\bar{1}]$) que $\alpha_1=\alpha_2=0$ e $\alpha_3=1$, enquanto que na posição final ([001]), $\alpha_3=-1$. Os valores de B mantêm-se durante a deformação [17].

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda_{final} - \lambda_{inicial} = \\ &= \frac{3}{2}\lambda_{100} \left((-1)^2\beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) - \frac{3}{2}\lambda_{100} \left((1)^2\beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Como os valores da magnetostricção inicial e final são iguais, conclui-se que do deslocamento a 180° dos domínios não resultam deformações dimensionais entre os dois estados, pelo que a amostra mantém as suas dimensões. Esta conclusão é bastante evidente, observando a Figura 4.14, que apresenta um grão com dois domínios com direção paralela ao campo externo e com direções opostas.

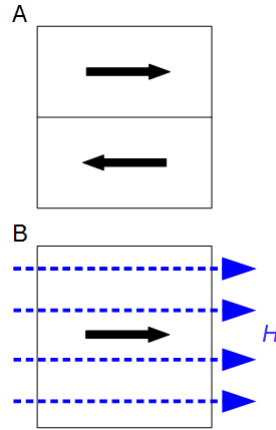


Figura 4.14 - Alteração da orientação dos domínios sem alteração dimensional.

Por outro lado, em grãos com domínios magnetizados em direções transversais à direção do campo externo ([010]), terá de haver um deslocamento de 90° das paredes dos domínios de modo a alinhar com a direção da magnetização externa. Neste caso, a posição inicial [010] caracteriza-se por $\alpha_2=\alpha_3=0$ e $\alpha_1=1$, sendo a posição final [001]. Desta vez, a diferença entre valores de magnetostricção do grão alinhado a [010] é de [17]:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda_{final} - \lambda_{inicial} = \\ &= \frac{3}{2}\lambda_{100} \left((1)^2\beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) - \frac{3}{2}\lambda_{100} \left((1)^2\beta_1^2 - \frac{1}{3} \right) = \\ &= \frac{3}{2}\lambda_{100}(\beta_3^2 - \beta_1^2) \end{aligned} \quad (4.4)$$

No caso dos grãos se encontrarem perfeitamente alinhados, $\beta_1=1$ e $\beta_3=0$, pelo que temos $\Delta\lambda = \frac{3}{2}\lambda_{100}$. Novamente, exemplifica-se este fenómeno com o esquema de um grão com dois domínios, um cuja magnetização é paralela à do campo externo, e o outro cuja magnetização é transversal a esse (Figura 4.15).

Com estes resultados, pode-se afirmar que a principal razão da alteração dimensional dos materiais ferromagnético é a rotação dos seus domínios (que ocorre para valores de indução magnética perto da saturação do material) e deslocamento das paredes de 90° e não pelo deslocamento a 180° dessas mesmas paredes [17]. Por esta razão é que, no contexto da atenuação do ruído, é aconselhável a utilização de chapas de grãos orientados e que não se

saturo o circuito magnético, operando a níveis reduzidos de indução magnética, de modo a maximizar os movimentos a 180° das paredes dos domínios com um mínimo de rotação de domínios e movimentos a 90° .

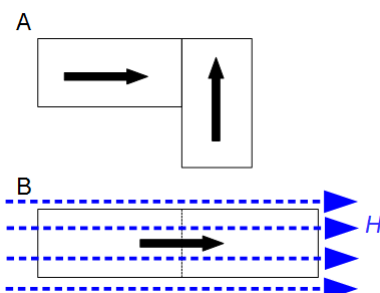


Figura 4.15 - Alteração da orientação dos domínios com alteração dimensional do grão previamente magnetizado na direção transversal ao campo magnético externo.

Relacionam-se agora os movimentos dos domínios com as direções de diferentes facilidades de magnetização dos grãos de ferro que constituem as chapas magnéticas de aço dos transformadores. Analisando a Figura 4.16, quando a magnetização se dá na direção $[100]$ a magnetostricção é exclusivamente positiva e predominam os movimentos de paredes dos domínios de 90° . Quando é magnetizado na direção $[111]$ ocorre resistência ao movimento inicial e a partir de 1T ocorre muita rotação de domínios, com magnetostricção negativa. Finalmente, quando é magnetizado na direção $[110]$ praticamente não há magnetostricção até 0,7 T. Entre 0,7 e 1,5 T ocorre expansão do material, associada ao movimento das paredes de 90° e acima de 1,5 T ocorre contração, associada à rotação dos domínios [54].

É ainda comum medir a magnetostricção sob uma indução magnética alternada e representá-la no que se denomina “curva de borboleta”, que constitui um dos produtos desta dissertação. A Figura 4.17, presente na norma IEC 60076-10, apresenta um exemplo da evolução da curva de borboleta para vários valores de indução magnética. A Figura 4.18, por seu lado, mostra a relação entre o sinal de magnetostricção e o campo de indução magnética que origina a curva da figura anterior.

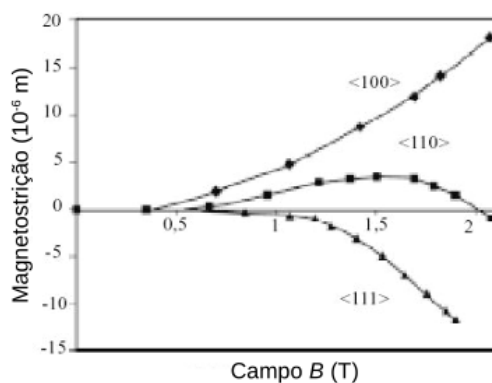


Figura 4.16 - Magnetostricção de um cristal de ferro em função da direção da magnetização por parte de um campo magnético externo [54].

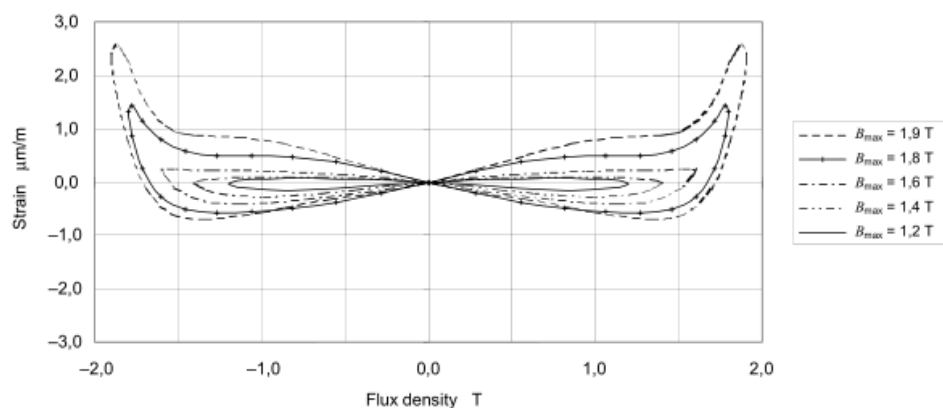


Figura 4.17 - Exemplo de gráfico de borboleta $\lambda(B)$ para vários valores de campo de indução magnética [47].

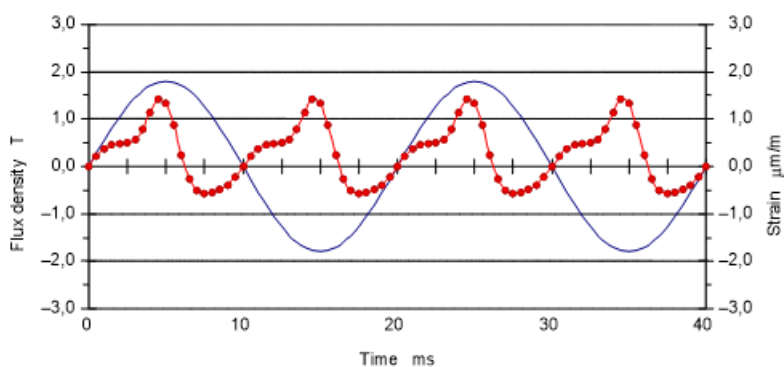


Figura 4.18 - Relação entre a alteração no comprimento de uma amostra (a vermelho) e a indução magnética que a atravessa [47].

Outro exemplo de curva de borboleta encontra-se na Figura 4.19, que apresenta a magnetostrição de uma chapa magnética de grãos orientados na direção da laminação (a cheio) e na direção ortogonal a essa (a tracejado). Verifica-se que na direção da laminação a magnetostrição é positiva e na transversal é negativa, indicando que só há rotação de domínios na direção transversal e que a direção da maioria dos grãos coincide com a de laminação.

Ainda no contexto de fatores que afetam a magnetostrição, a Figura 4.20 apresenta resultados de estudos de S. G. Ghalamestani et al. [55] e de E. C. Pike e A. J. Moses [56] que demonstram, respetivamente, a variação deste fenómeno com a frequência de magnetização (quanto maior a frequência mais histerese a curva de borboleta apresenta) e a temperatura a que o circuito magnético está sujeito (a magnetostrição diminui com o aumento da temperatura, como se previa pela explicação anterior do efeito da temperatura na organização e orientação dos grãos nos materiais).

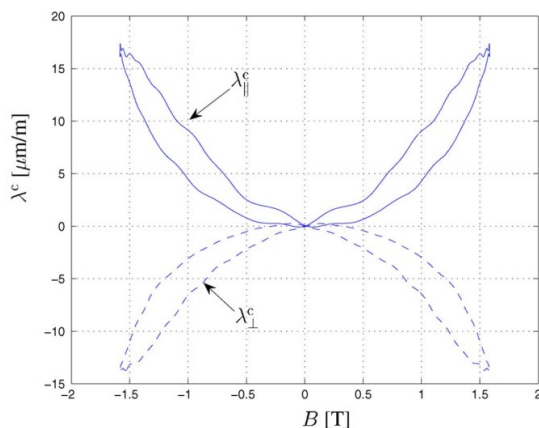


Figura 4.19 - Curvas de borboleta de uma amostra na direção longitudinal (a cheio) e na direção transversal (a tracejado) [55].

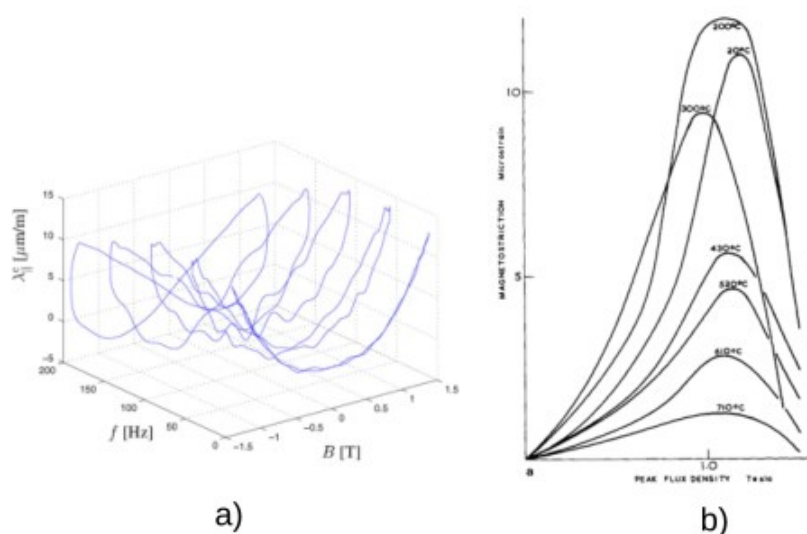


Figura 4.20 - Variação da magnetostricção com a a) variação de frequência [55] e b) variação de temperatura [56].

4.2.3 - Aplicações da magnetostricção

A magnetostricção foi apresentada até aqui essencialmente como um processo inconveniente. Apesar disso, ela possui aplicações muito úteis, especialmente no domínio dos atuadores, a que aqui fazemos referência.

Uma vantagem de atuadores de magnetostricção, em relação aos restantes tipos, é que a sua tensão de funcionamento pode ser bastante baixa, o que os torna úteis para utilizações médicas e, em geral, simplifica o desenho do amplificador de sinal. Quando um material magnetostritivo é sujeito a um campo magnético alternado, este vibra ao dobro da frequência desse campo. Inversamente, se um material for sujeito a tensões mecânicas, a sua permeabilidade magnética irá alterar-se devido ao efeito de Wiedemann. Se um material for sujeito a um campo magnético alternado, produzido por uma bobina e através de uma corrente alternada, o padrão da indução magnética irá alterar-se como resultado de uma mudança na

permeabilidade magnética. Este efeito pode ser detetado por uma bobina separada, onde o fluxo magnético alternado irá induzir uma força eletromotriz alternada, cuja magnitude varia de acordo com a permeabilidade magnética do material. Este efeito é explorado por transdutores magnetostritivos, que são capazes de converter energia elétrica em energia mecânica.

O material magnetostritivo comercial mais utilizado em aplicações de atuador é o Terfenol-D (Tb-DyFe_2) que apresenta uma magnetostrição superior a 1000 ppm à temperatura ambiente (em contraste com a magnetostrição máxima de 8 ppm registada para a chapa magnética de grão orientados utilizada na investigação experimental desta dissertação). Demonstra um desempenho com alta conversão de densidade de energia, grande força e rápida resposta para uma vasta gama de frequências. No entanto, o elevado custo da sua forma não processada, aliada à grande anisotropia das terras raras, limita o seu uso.

Uma ferrite com elevada magnetostrição, como o CoFe_2O_4 , pode ser produzido como pó, que é posteriormente compactado por pressão. Este material consegue atingir valores de magnetostrição de 400 ppm. As constantes elásticas dos vários compósitos neste pó, o método de compactação e o seu recozimento influenciam o valor da magnetostrição medida.

Existem ainda materiais modernos como ligas de Fe-Ga (Galfenol) ou Fe-Al que cumprem este requisito, especialmente o Galfenol que exhibe elevada magnetostrição na direção [100], com valores a rondar o 400 ppm em grãos singulares e 250 ppm em poligrãos.

As aplicações principais de materiais magnetostritivos na atuação são transdutores de sonares, motores lineares, motores rotativos, e aparelhos híbridos magnetostritivos / piezoelétricos. Os sensores mais comuns são os sensores de binário, de posição e de força [53], [57].

4.2.4 - Métodos utilizados para medição da magnetostrição

Apresentam-se aqui os métodos mais utilizados para medição de vibrações, juntamente com as suas vantagens e desvantagens. Dividem-se entre métodos com contacto com a amostra, que pode influenciar a vibração desta última, e métodos sem contacto com a amostra, que não influenciam a vibração da amostra.

O extensómetro é um dos métodos mais utilizados para medição de deslocamentos e funciona como transdutor. É-lhe fornecida energia elétrica e esta é modelada pela afetação de fenómenos físicos.

O modelo mais usual é o de um fio bastante fino enrolado ao longo de uma pequena área, suportada por papel ou plástico, cuja resistência será alterada em proporção com a deformação da superfície onde se encontra: a resistência aumenta com o aumento do comprimento do circuito, que ocorre durante distensão do material, e diminui com a diminuição do comprimento do circuito, que ocorre com a contração do material. Apresenta-se um exemplo na Figura 4.21.

Tem como vantagens o baixo custo e permitir a medição localizada das vibrações. Como desvantagens, o tempo necessário para a preparação e aplicação, a dificuldade em ajustar o sensor numa direção específica e a alta sensibilidade a vibrações noutras direções que não a desejada.

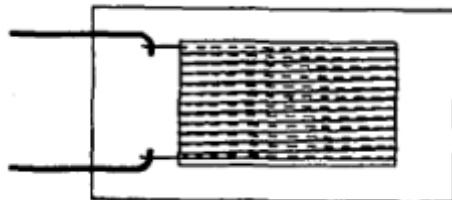


Figura 4.21 - Exemplo de um extensómetro [17].

Os transformadores diferenciais de variação linear são aparelhos eletromecânicos que geram uma diferença de potencial proporcional ao deslocamento mecânico de um núcleo no interior das suas bobinas.

É composto por uma bobina primária de excitação, duas bobinas secundárias conectadas com polaridades opostas no interior da bobina primária e um núcleo magnético no interior das bobinas secundárias, como indica a Figura 4.22. Na posição inicial, V_1 e V_2 possuem os mesmos valores de tensão pois o interior das bobinas secundárias possui a mesma permeabilidade magnética, sendo igualmente induzidas e resultando numa soma de potenciais nula. Como os movimentos na amostra provocam deslocamentos deste núcleo da sua posição inicial, provocando a transmissão de fluxos magnéticos parasitas, induzindo potenciais V_1 e V_2 de valores absolutos diferentes cuja soma resulta numa diferença de potencial nos terminais do circuito secundário.

Tem como vantagem ser um sistema de medição sem contacto, com excelente linearidade e baixa sensibilidade a vibrações indesejadas. Como desvantagens, a possibilidade de interferência de campo magnéticos exteriores nas medições e a dificuldade em ajustar a posição inicial.

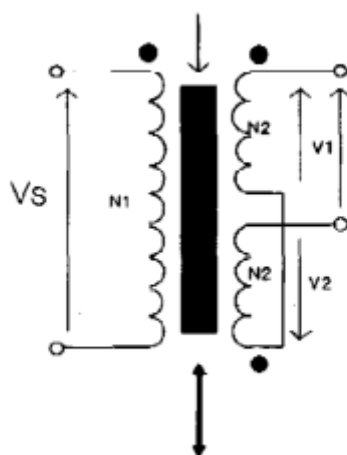


Figura 4.22 - Esquema do funcionamento de um transformador diferencial de variação linear [17]

Os sensores capacitivos de deslocamento geram um sinal elétrico resultante da deformação elástica de uma de duas membranas, separadas a uma distância pré-determinada. A membrana móvel é conectada à amostra e o seu movimento alterará distância entre membranas e a área de transmissão de campo elétrico entre membranas, juntamente com a alteração do valor da capacitância entre as membranas, como se observa a Figura 4.23. Os terminais são ligados a um oscilador, que emite um sinal com determinada frequência e cuja variação revela o deslocamento da amostra, que gera um sinal de tensão com magnitude proporcional ao deslocamento da amostra.

Este método tem como vantagens ser uma medição sem contacto, com baixa sensibilidade à temperatura e possuir relativo baixo custo. Como desvantagens, a necessidade de blindagem de campos elétricos parasitas e o tempo consumido no ajuste preciso do sensor para cada medição.

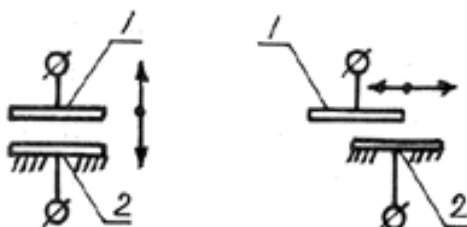


Figura 4.23 - Funcionamento do sensor capacitivo de deslocamento [58].

O transdutor piezoelétrico de deslocamento consiste num elemento piezoelétrico conectado a uma ponta, como mostra a Figura 4.24, onde o deslocamento desta provoca uma carga elétrica. Na medição de vibrações, colocam-se dois transdutores deste tipo em contacto com a amostra, a uma determinada distância, e o deslocamento da amostra entre as pontas dos sensores é detetado pela diferença de potenciais entre os dois sensores.

Tem como vantagens a possibilidade de medição de deslocamentos entre dois pontos definidos, a aplicação de baixa pressão mecânica na amostra e não se influenciar por campos magnéticos externos. Como desvantagens, é sensível a vibrações noutras direções e existe contacto direto do sensor com a superfície.

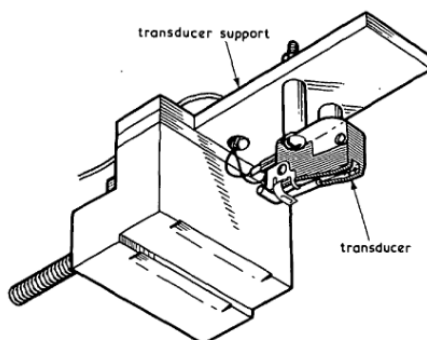


Figura 4.24 - Exemplo de transdutor piezoelétrico [17].

O acelerómetro piezoelétrico, como apresenta o exemplo da Figura 4.25, inclui numa peça de cerâmica ferroelétrica artificialmente polarizada que gera uma carga elétrica proporcional à forças das tensões mecânicas a que é sujeita. Este sinal sofre, posteriormente, uma dupla integração de modo a se obter o valor do deslocamento. Para se eliminar vibrações de ruído, podem-se utilizar dois sensores, onde um é colocado num ponto de referência e a aceleração da vibração obtém-se por subtração dos dois sinais.

Tem como vantagens o relativo baixo custo, a baixa sensibilidade a campos magnéticos parasitas (devido à blindagem incluída no sensor), a preparação simples da amostra e a baixa sensibilidade a vibrações noutras direções. Como desvantagens, existe contacto direto com a amostra [17].

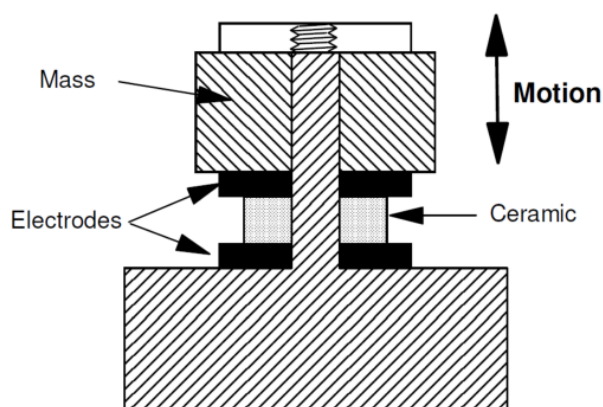


Figura 4.25 - Corte transversal de um acelerómetro piezoelétrico [17].

Apresentam-se agora os sistemas de medição de deslocamentos a laser referidos na norma IEC 62581.

O interferómetro de Michelson possui um conjunto de espelhos e espelhos parciais, que refletem e dividem um feixe de luz em dois: um feixe de luz estacionário, o de referência, e um móvel, refletido por um espelho colocado na amostra. Caso haja deslocamentos na amostra, surgirão diferenças na amplitude e fase da sobreposição dos dois feixes de luz, recebida por um sensor ótico. Um esquema da montagem apresenta-se na Figura 4.26.

Este método tem como vantagem não sofrer interferência de campos magnéticos externos e ser um método sem contacto direto com a amostra. Como desvantagens, o tempo consumido na preparação do sistema, a complexidade na colocação dos espelhos nas posições específicas e o custo relativamente elevado.

O vibrómetro de laser Doppler, como o nome indica e à semelhança do método anterior, deteta diferenças de velocidade entre um feixe estacionário e um móvel (refletido pela peça ótica colocada na amostra) através do efeito de Doppler. Possui, aproximadamente, as mesmas vantagens e desvantagens que o método de interferometria de Michelson [59].

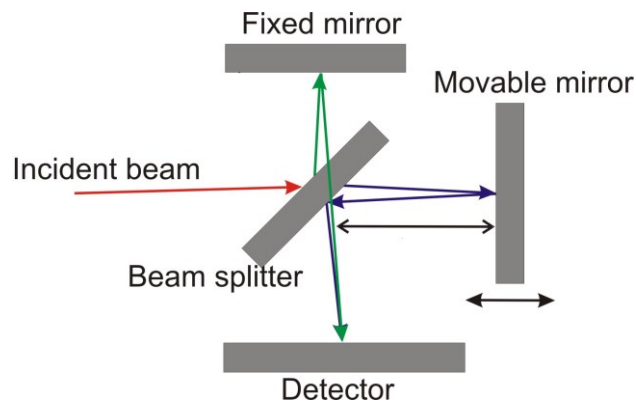


Figura 4.26 - Esquema de um interferômetro de Michelson [60].

4.3 - Síntese

Neste capítulo caracterizou-se o ruído emitido pelo transformador, detalhando as suas fontes primárias e secundárias.

Apresentaram-se medidas de controlo de ruído ativas e passivas e um método de diagnóstico do transformador através da análise do ruído emitido por este.

Foi explicada a origem da magnetostrição, o seu efeito das chapas do núcleo do transformador e possíveis aplicações para sensores e atuadores.

Finalmente, foram descritos alguns processos para medir a magnetostrição em amostras de materiais ferromagnéticos excitados magneticamente.

Capítulo 5

Investigação experimental sobre magnetostricção

Este capítulo descreve a investigação experimental que se realizou no decurso desta dissertação, em colaboração com a empresa EFACEC, que disponibilizou todo o equipamento elétrico utilizado durante a investigação experimental. A primeira parte consiste na caracterização da principal aparelhagem utilizada na medição da magnetostricção. Na segunda parte relatam-se os passos do processamento de dados recebidos pelo equipamento anterior, visto que o sinal original da magnetostricção das amostras contém bastante distorção e é necessário condicioná-lo para atingir o objetivo de criar a curva de borboleta, associada aos valores de magnetostricção de cada amostra, composta por chapas magnéticas, induzidas com um certo valor de campo de indução magnética.

Por último, estas curvas e os valores máximos absolutos de magnetostricção para cada valor de indução magnética são expostos, acompanhados com a comparação e análise crítica de resultados.

5.1 - Caracterização do equipamento

O equipamento principal utilizado neste estudo foi uma ponte de Epstein, amostras compostas por chapas magnéticas, sensores de deformação e uma placa de aquisição de sinal. Estes componentes serão pormenorizados de seguida.

5.1.1 - Ponte de Epstein

A ponte de Epstein é um pequeno transformador monofásico criado com o objetivo de medir as propriedades magnéticas de amostras de chapas magnéticas. É constituída por enrolamentos primário e secundário, com o mesmo número de voltas, que se dividem em quatro bobinas cada um. Cada bobina secundária é colocada no interior de uma bobina primária, concentricamente, e são enroladas em torno de cada braço da ponte. Estes braços são prismas retangulares ocós onde se inserem as amostras no seu interior. Estas são magneticamente induzidas pelas bobinas que as rodeiam e é possível estudar o seu comportamento através dos terminais dos enrolamentos primário e secundário. Para que as chapas formem um circuito fechado, os braços da ponte estão dispostos num quadrado e as juntas entre chapas possuem forma *double step-lap*, como se observa na Figura 5.1.

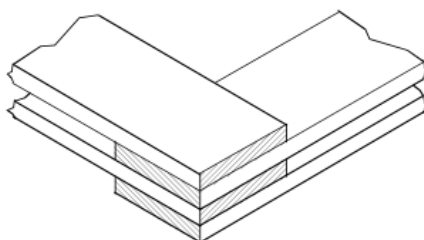


Figura 5.1 - Esquema de juntas em *double step-lap* [61].

O valor do campo de indução magnética B que percorre a amostra calcula-se através de [59]:

$$|\overline{V}_2| = f \times N_2 \times A \times B_M \Leftrightarrow B_M = \frac{|\overline{V}_2|}{f \times N_2 \times A} \text{ (V)} \quad (5.1)$$

onde $|\overline{V}_2|$ é o valor médio da tensão retificada nos terminais do circuito secundário, em volt, f é o valor da frequência da tensão, em hertz, N_2 é o número de espiras do enrolamento secundário, A é a área transversal da amostra, em m^2 e B_M é o valor de pico da indução magnética, em tesla.

Esta indução magnética resulta da soma do campo de indução magnética na amostra e no ar que a circunda, pelo que, a partir do momento em que o valor da indução magnética ultrapassa o de saturação da amostra, $|\overline{V}_2|$ passará a aumentar proporcionalmente ao campo magnético no ar, o que interferirá com a obtenção de informações acerca das propriedades magnéticas da amostra. Para resolver isto, podem ainda ser incluídas bobinas de compensação da indução magnética no ar, que constituem um circuito primário e secundário de um pequeno transformador onde, à semelhança das restantes bobinas da ponte, estas duas são concêntricas e a bobina secundária ocupa a posição interior. A bobina primária é conectada em série ao circuito primário da ponte, enquanto a bobina secundária é conectada em série com as

restantes bobinas secundárias mas em oposição de fases, de modo a anular a força eletromotriz do circuito secundário da ponte induzido pela indução magnética no ar.

Este efeito explica-se com o exemplo da Figura 5.2, onde a linha 1 representa a magnitude da força eletromotriz induzida no circuito secundário da ponte, a linha 2 representa a magnitude da força eletromotriz induzida no circuito secundário da compensação e a linha 3 representa a diferença entre os valores da linha 1 e 2. Para este material, e a partir de 30 kA/m, o valor da força eletromotriz no enrolamento secundário (linha 1) aumenta linearmente com o campo magnético H , o que significa que a amostra se encontra saturada e o aumento da f.e.m. induzida se deve apenas à indução magnética no ar. Ao subtrair-se a f.e.m. do circuito secundário da ponte (linha 1) com a f.e.m. da bobina secundária de compensação (linha 2), obtém-se o valor da f.e.m. induzida pela amostra (linha 3), que se mantém constante a partir da saturação, que corresponde ao anterior valor 30 KA/m [62].

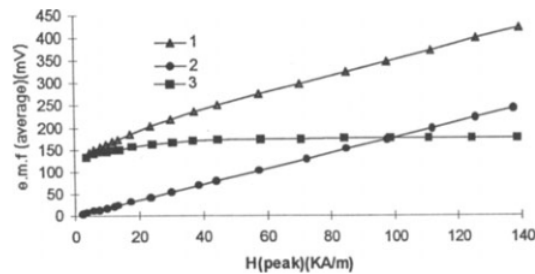


Figura 5.2 - Efeito da compensação da indução magnética no ar [62].

A ponte de Epstein foi concebida inicialmente para a medição da potência de perdas elétricas da chapa magnética em teste. A montagem encontra-se na Figura 5.3, onde as bobinas designadas por M referem-se às de compensação da indução magnética no ar. Com os valores medidos com a aparelhagem própria, calcula-se a potência de perdas da amostra através de [61]:

$$P_c = \frac{n_1}{n_2} P_m - \frac{(1,111|\bar{V}_2|)^2}{R_i} \quad (\text{W}) \quad (5.2)$$

onde P_c é o valor total da potência de perdas da amostra, em watt, n_1 é o valor total de voltas dos enrolamento do circuito primário, n_2 é o valor total de voltas dos enrolamento do circuito secundário, P_m é o valor da potência medida pelo wattímetro, em watt, R_i é o valor da resistência total no circuito secundário, em ohm e $|\bar{V}_2|$ é o valor médio da tensão retificada nos terminais do circuito secundário em volt.

Existem aparelhos alternativos a esta ponte para a medição da potência de perdas no núcleo como a ponte de Lloyd-Fisher, a ponte de Churcher e aparelhos para teste de chapa única. A ponte de Lloyd-Fisher é semelhante à de Epstein, exceto que as chapas são colocadas de modo a que as suas superfícies fiquem perpendiculares à superfície da ponte e as juntas das chapas

são peças separadas e de material semelhante à da amostra, que são fixas às chapas das amostras, como exemplifica o esquema da Figura 5.5 a). Esta alteração torna as medições mais exatas em relação às da ponte de Epstein pois melhora o *step-lap* nas juntas, zonas com valores do campo de indução magnética diferentes dos obtidos nos braços do aparelho, o que prejudica a distribuição das perdas pela amostra.

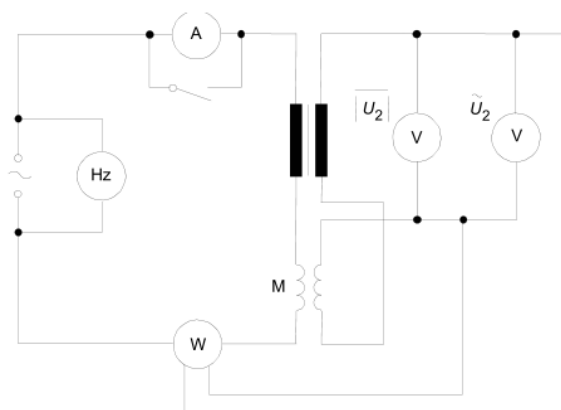


Figura 5.3 - Esquema de montagem da ponte de Epstein para medição da potência de perdas pelo método do wattímetro [61].

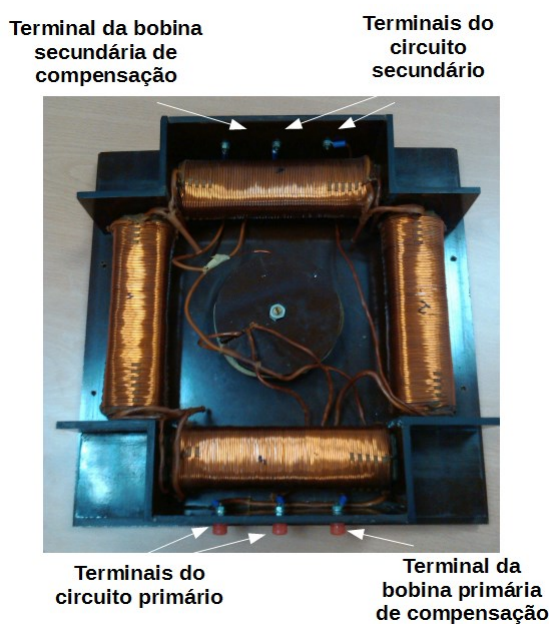


Figura 5.4 - Fotografia da ponte de Epstein a utilizar no estudo da dissertação e a identificação dos terminais dos seus circuitos.

A ponte de Churcher é, desta vez, semelhante à ponte de Lloyd-Fisher mas distribui melhor os enrolamentos ao longo do caminho magnético, de modo a uniformizar a magnetização da amostra. Como se observa pela Figura 5.5 b), em vez de canto amovíveis, esta ponte tem peças em forma de U.

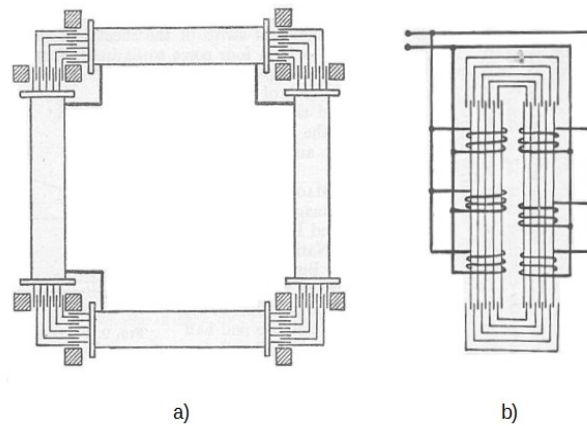


Figura 5.5 - Esquemas de a) ponte Lloyd-Fisher [63] e b) ponte de Churcher [64].

Por fim, existe o teste de peça única que, na configuração mais recente, permite medir a potência de perdas de uma amostra através do contacto desta com uma ponta de prova, que contém os enrolamentos primário, secundário e um terceiro circuito que deteta a indução magnética na amostra.



Figura 5.6 - Exemplo de aparelho digital para teste de chapa única [65].

No início do estudo da ponte de Epstein disponibilizada pela EFACEC, procuraram-se saber as características elétricas dos circuitos que a compõem, de modo a simular o seu funcionamento em suporte informático para, posteriormente, se preverem os valores de tensão nos terminais, a intensidade de corrente elétrica nos circuitos e a indução magnética nas amostras durante os testes de magnetostricção. As medições das características elétricas foram obtidas alimentando a ponte com dois auto-transformadores *variatic*, ligados em série (como se mostra na Figura 5.7) e alimentados com a corrente elétrica da rede doméstica. O circuito resultante apresenta-se na Figura 5.8, uma imagem da simulação com o *software* Micro-Cap.



Figura 5.7 - Montagem da ponte de Epstein com a aparelhagem de alimentação elétrica e de medição das características elétricas, nas instalações da Efacec e da FEUP.

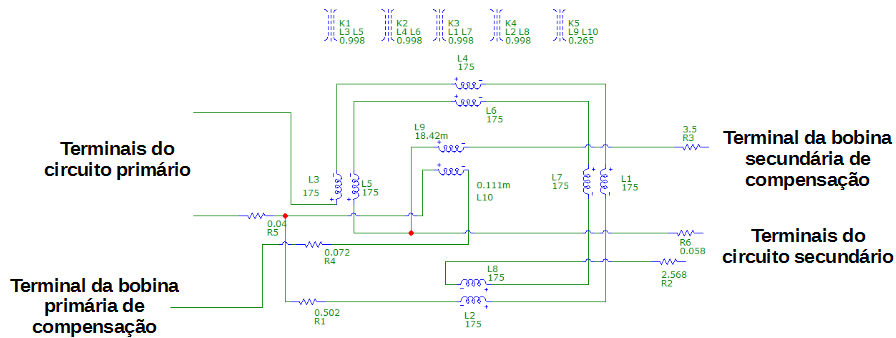


Figura 5.8 - Circuito da ponte de Epstein simulado em Micro-Cap.

5.1.2 - Chapa magnética

As chapas a testar nesta dissertação são amostras da liga aço de grão altamente orientados PowerCore® H 105-30 da marca ThyssenKrupp, que se observam na Figura 5.9 e possuem as seguintes características [66]:

- Valor de saturação de indução magnética: 2,03 T;
- Valor de campo magnético de coerção: 5 A/m;
- Temperatura de Curie: 745 °C;
- Densidade: 7,65 Kg/dm³;
- Resistividade elétrica: 0,48 μΩm.
- Comprimento: 300 mm;
- Largura: 30 mm;
- Espessura: 0,3 mm.



Figura 5.9 - Chapas magnéticas utilizadas nesta investigação.

Sabendo o valor de saturação de campo magnético de indução, decidiu-se recolher informações acerca da magnetostricção das amostras para os valores de indução magnética de 0,5T; 1T; 1,25T ; 1,5T; 1,6T; 1,7T, 1,8T, 1,9T e 2T. Para além disso, existem quatro tipos de amostra em teste: circuitos magnéticos com 4 chapas (uma por braço), com 8 chapas (duas por braço), 24 chapas (6 por braço, aproximadamente 0,5 Kg de chapa magnética) e 52 chapas (treze por braço, aproximadamente a 1 Kg de chapa magnética), numa tentativa de correlacionar a variação da magnetostricção com o número de chapas no circuito magnético.

A amostra de 4 chapas magnéticas terá apoios entre a superfície da ponte de Epstein e as juntas do circuito magnético, de modo a prevenir o contacto e atritos entre o circuito e a própria ponte, que podem interferir nas medições de vibrações. As restantes amostras não terão apoios e todas as chapas estarão em contacto entre si. Em todas as amostras serão colocados pequenos pesos de cerâmica nas juntas, de modo a reduzir a vibração vertical à superfície das chapas.

É ainda preciso ter em conta que, chegando à saturação magnética da amostra, a corrente no circuito primário eleva-se de modo acentuado. Como se sabe, um valor de corrente demasiado elevado pode danificar o equipamento, pelo que decidiu-se que só se fariam medições para valores de corrente eléctrica inferiores a 2 A. Este valor surge através de valores recolhidos do catálogo de fios de cobre esmaltados da marca Eberle [67] onde, para fios de cobre com o diâmetro aproximado ao dos fios dos enrolamentos da ponte de Epstein (1,45 mm), a intensidade de corrente eléctrica máxima é de 3,3 A e a de segurança 2,2 A.

5.1.3 - Principal aparelhagem de medição utilizada

Para a medição da magnetostricção da amostra, utilizou-se um extensómetro HBM K-XY31-3/350 (apresentado na Figura 5.10) para medir os alongamentos e contrações ao longo do tempo, tanto na direcção da laminação (longitudinal) como na direcção ortogonal a esta (transversal). Houve o cuidado em adquirir um sensor de material semelhante ao da amostra (neste caso, de aço) para que os efeitos térmicos afetassem de igual forma a amostra e o sensor.

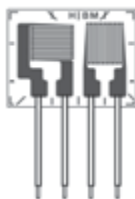


Figura 5.10 - Extensómetro utilizado na investigação experimental desta dissertação [68].

Estes extensómetros estão ligados a uma placa de aquisição NI cDAQ-9188, uma plataforma portátil de aquisição de dados com dispositivos modulares de entrada e saída de dados. Este equipamento receberá os sinais elétricos do extensómetro através do módulo NI 9236 e traduzi-los-á em valores de deformação física (razão do valor da alteração de dimensões pelo valor da dimensão original, ou seja, o valor da magnetostricção $\Delta L/L$), que serão registados num computador. Também se adquirirão os valores de pico da corrente no circuito primário da ponte ao longo do tempo, através do módulo NI 9227, como segurança durante a operação, e os valores de pico ao longo do tempo da diferença de potencial entre os terminais de entrada e entre os de saída da ponte com o módulo NI 9244. Através do sinal da tensão no circuito secundário, obtém-se o valor da indução magnética da amostra pois a relação da equação (1) é válida até perto da saturação e pretende-se fazer medições antes de se atingir esse ponto. Não se utilizou o circuito de compensação do campo magnético do ar pois, como acabou-se de referir, pretende-se estudar o comportamento da amostra abaixo da saturação, pelo que se obtém resultados satisfatórios sem utilizar este circuito. A placa de aquisição com os seus módulos encontra-se na Figura 5.11 e a montagem completa do equipamento na Figura 5.12.

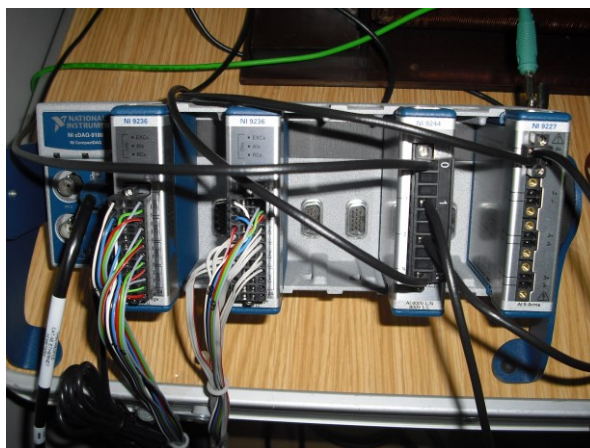


Figura 5.11 - Placa de aquisição de sinal e seus módulos

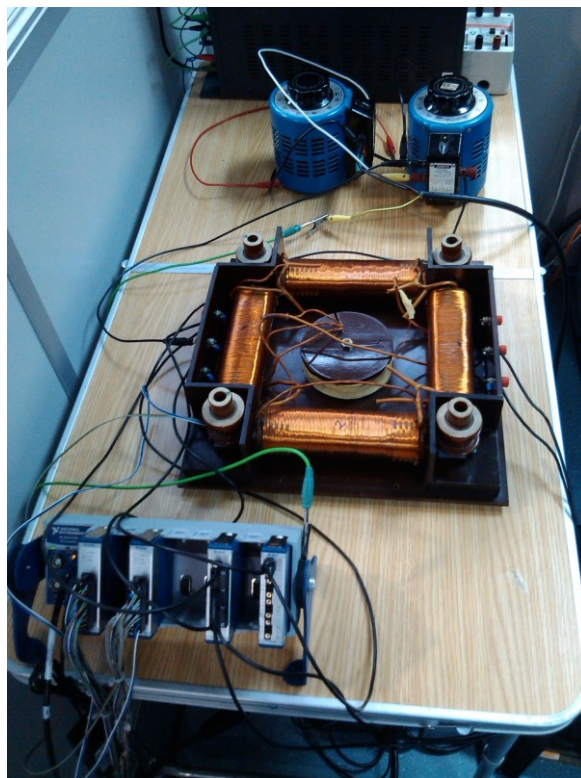


Figura 5.12 - Montagem do circuito para medição da magnetostricção com placa de aquisição em baixo.

5.2 - Processamento do sinal obtido pela placa de aquisição

Através da análise dos sinais da magnetostricção das amostras, concluiu-se que contêm diversas interferências de campos magnéticos e elétricos externos. Para o demonstrar, relembrem-se as Figura 4.17 e 4.19 e apresenta-se na Figura 5.13 o sinal da magnetostricção na direção longitudinal à laminação e o espectro das frequências FFT deste últimos sinal até aos 800 Hz, obtidos para o circuito de 4 chapas magnéticas a 1,7 T. Como se conclui, a curva obtida é uma versão bastante distorcida da que surge na norma.

Voltando às primeiras considerações do Capítulo 4 desta dissertação, afirmou-se que a magnetostricção possui o dobro da frequência da indução magnética (cada valor máximo da magnetostricção ocorre durante o máximo do valor absoluto da indução magnética). Assim sendo, o sinal da deformação física deveria ser uma sinusoidal com frequência de 100 Hz. Pelo espectro FFT da Figura 5.13 regista-se que surgem outras componentes para além da fundamental (100 Hz), que são causadas por harmónicos da magnetostricção, da rede ou por interferência de campos elétricos e magnéticos parasitas. Deste modo, para obter uma curva de borboleta definida, decidiu-se proceder à filtragem dos sinais da magnetostricção na sua frequência fundamental, processo que será explicado de seguida.

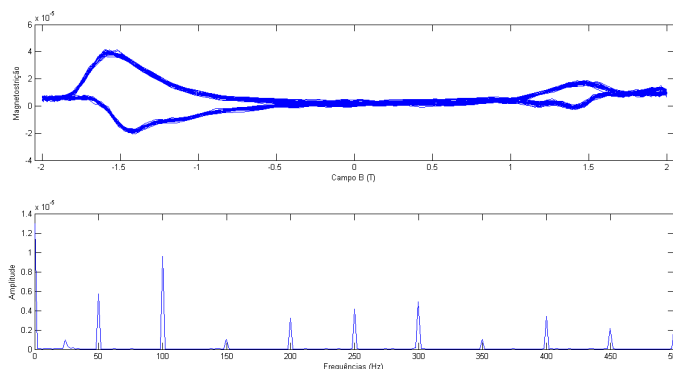


Figura 5.13 - Curva de boroleta e espetro FFT do sinal de magnetostricção original.

5.2.1 - Considerações iniciais acerca de filtragem de sinais

Ao aplicar-se um filtro no sinal original, repara-se que a amplitude máxima do sinal filtrado aumenta de valor desde o instante 0 segundos até um certo instante. Este efeito é representado no exemplo da Figura 5.14, onde a amplitude máxima do sinal da magnetostricção após a filtragem (a preto) aumenta até o instante 0,03 segundos, onde esta característica atinge um valor aproximadamente constante, e explica-se pelo princípio de filtragem de sinais.

A filtragem de sinal é um processo que altera as amplitudes relativas de componentes de frequências do sinal ou pode até mesmo suprimi-las. Este ato constitui um sistema linear e invariável no tempo, onde o sinal de saída resulta da convolução do sinal de entrada $x(t)$ com a resposta impulsional do sistema $h(t)$, cujo integral de convolução é [69]:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau \quad (5.3)$$

Como este integral compreende todos os valores ao longo do tempo, nos primeiros instantes o sinal de saída terá pouca magnitude pois a atuação da resposta impulsional é multiplicada pelos valores nulos do sinal de entrada em $t < 0$ segundos. Após um certo tempo, a magnitude aumenta e atinge um valor permanente pois a resposta impulsional passa a ser multiplicada exclusivamente pelos valores do sinal de entrada de $t > 0$ segundos. Para se obter uma análise de um sinal com o mínimo de distorções, torna-se necessário retirar o transiente inicial do sinal filtrado e analisando a restante fração do sinal, com amplitude máxima praticamente constante e começando e acabando com o mesmo valor de magnetostricção, ou seja, com ciclos completos. Esta seleção é visível na Figura 5.14 no sinal a vermelho.

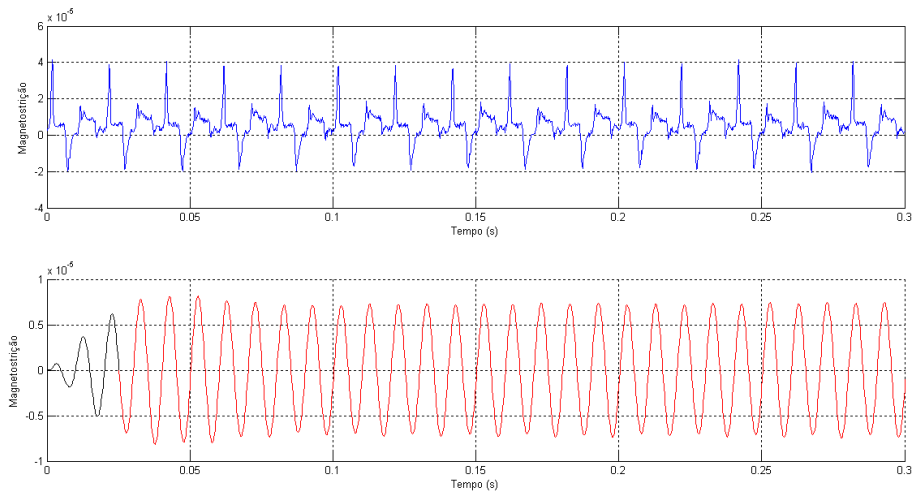


Figura 5.14 - Sinal de magnetostrição original (acima, a azul), sinal de magnetostrição filtrado total (abaixo, a preto) e componente estacionária do sinal de magnetostrição filtrado (abaixo, a vermelho).

No entanto, ao retirar esta parte, a componente a 100 Hz da análise FFT do sinal truncado pode ter menor amplitude que a componente correspondente do sinal filtrado não alterado, visto que a transformação FFT é também uma convolução entre dois sinais, o que implica que se o sinal de entrada contiver menos componentes de 100 Hz que o sinal filtrado original, a amplitude da componente FFT correspondente será menor. A Figura 5.15 apresenta um exemplo da amplitude do componente a 100 Hz do sinal de magnetostrição original (a azul), do sinal filtrado total (a preto) e do sinal filtrado e truncado (a vermelho), onde se regista que a componente que possui o valor máximo pertence ao sinal original, seguido do sinal filtrado total e a componente com valor menor pertence ao sinal filtrado e truncado.

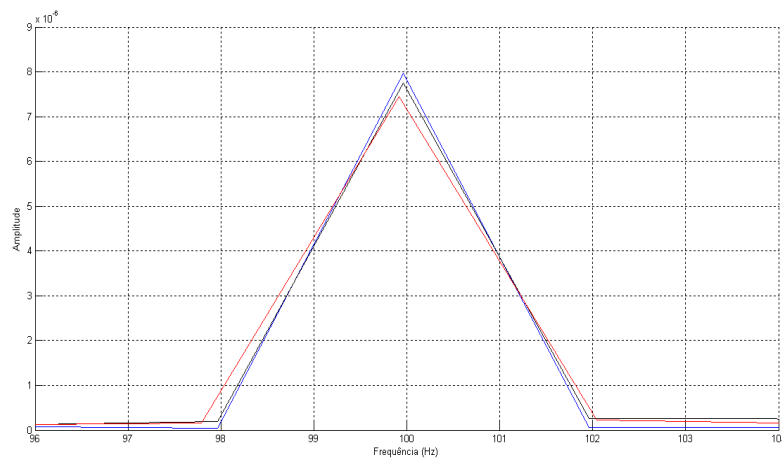


Figura 5.15 - Comparação entre os gráficos dos espectros FFT do sinal de magnetostrição original (a azul), sinal total filtrado (a preto) e sinal filtrado truncado (a vermelho).

5.2.2 - Escolha dos parâmetros do filtro a utilizar

Devido aos factos atrás expostos, é importante uma escolha cuidada do filtro para o processamento dos sinais da magnetostricção recolhidos, com o objetivo de obtermos um sinal de saída pouco atenuado em relação ao de entrada e com a frequência de 100 Hz tão isolada quanto possível. Assim, os sinais foram submetidos a um filtro passa-banda para eliminar todas as frequências que não a fundamental da magnetostricção e obter uma onda sinusoidal com essa mesma frequência. As variáveis dos filtros estudadas foram: o tipo de filtro, a ordem do filtro e a janela do filtro passa-banda.

O *software* MATLAB disponibiliza diversos tipos de filtros, tendo sido comparados os filtros Butterworths, Chebyshev Tipo I e Elliptic. A Figura 5.16 apresenta o comportamento destes três filtros (mais o Chebyshev Tipo II) em modo filtro passa-baixo e conclui-se que o filtro Butterworth possui uma atenuação de banda mais abrangente e plana, ao passo que os filtros Chebyshev Tipo I e Elliptic têm uma atenuação mais acentuada mas introduzem um sinal de *ripple*.

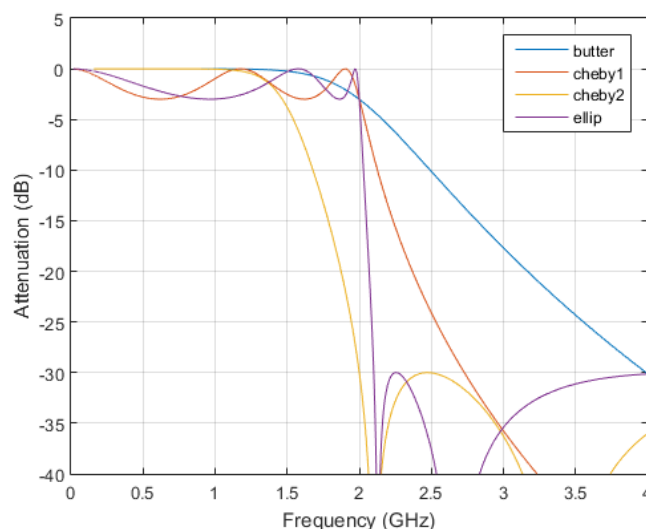


Figura 5.16 - Comparação do comportamento dos filtros Butterworth, Chebyshev Tipo I, Chebyshev Tipo II e Elliptic em modo passa-baixo [70].

A Figura 5.17 apresenta a comparação dos resultados de um sinal de magnetostricção original e sinais filtrados por:

- filtro Butterworth de ordem 4 e janela entre 90 e 110 Hz;
- filtro Butterworth de ordem 2 e janela entre 90 e 110 Hz;
- filtro Butterworth de ordem 4 e janela entre 95 e 105 Hz;
- filtro Chebyshev Tipo I de ordem 4 e janela entre 90 e 110 Hz (os resultados com o filtro Chebyshev Tipo I e Elliptic foram praticamente idênticos).

Entre o filtro Butterworth de ordem 4 e 2, o de ordem 4 consegue isolar de modo mais eficaz a frequência 100 Hz que o de ordem 2, onde as frequências 50 e 200 Hz não estão

totalmente atenuadas. Em relação ao filtro Butterworth de ordem 4 e janela entre 90 e 110 Hz e entre 95 e 105 Hz, o entre 95 e 105 Hz atenua totalmente a componente 200 Hz mas também atenua a própria componente de 100 Hz, o que não se pretende. Finalmente, e comparativamente ao filtro Butterworth de ordem 4 e janela entre 90 e 110 Hz, o filtro Chebyshev Tipo I de ordem 4 e janela entre 90 e 110 Hz atenua a componente de 100 Hz e atenua menos as componentes de 50 e 150 Hz.

Tendo o objetivo de atenuar todas as componentes de frequências que não a de 100 Hz, o filtro Butterworth de ordem 4 e janela entre 90 e 110 Hz mostrou ser o mais indicado e, por isso, foi utilizado para todos os sinais.

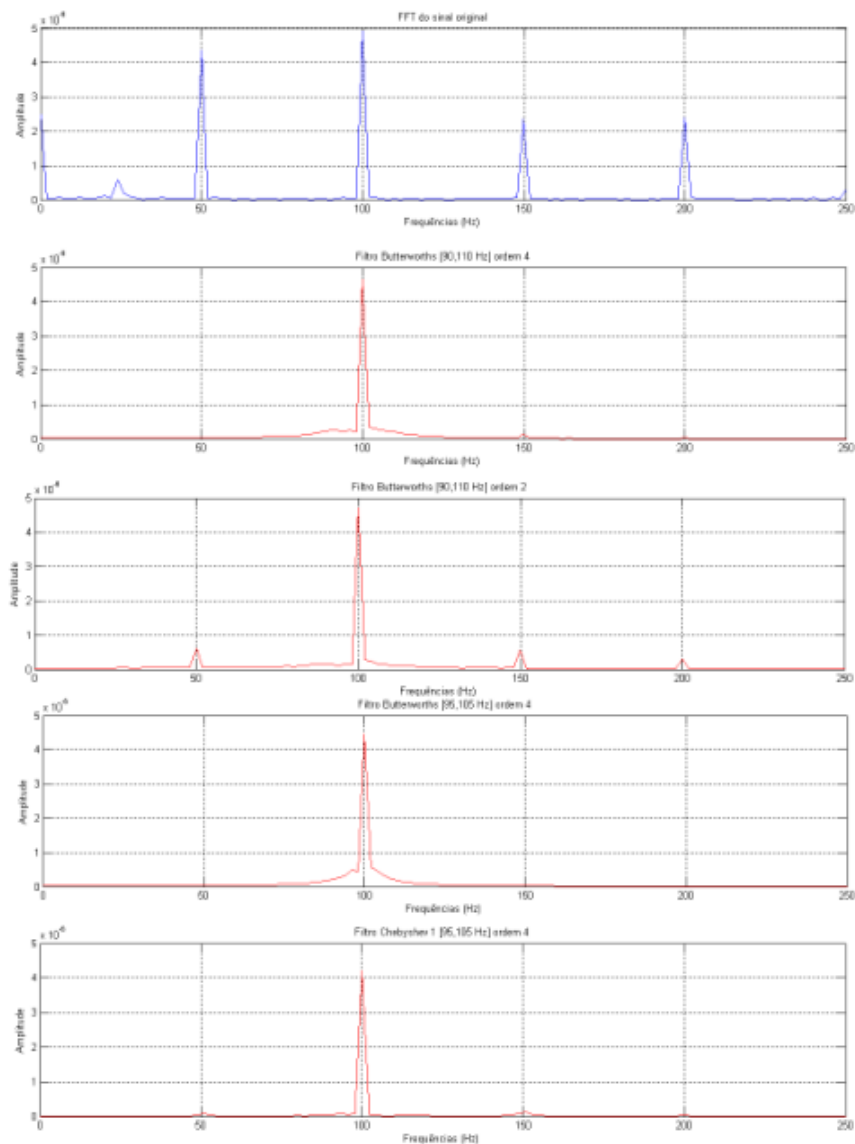


Figura 5.17 - Comparação entre os espectros FFT dos sinais de magnetostrição filtrados por diferentes filtros.

5.2.3 - Código MATLAB utilizado para filtragem e corte de sinal

O processamento de sinal, através do *software* MATLAB, filtra o sinal nas condições descritas anteriormente e trunca o sinal.

Acima referiu-se que o sinal truncado de começar e acabar sensivelmente no mesmo valor de magnetostrrição. Neste aspeto, o código MATLAB criado nesta investigação delimita o sinal filtrado entre o menor valor absoluto de magnetostrrição entre 0,49 s e 0,5 s (todos os sinais originais analisados abrangem um intervalo de tempo de 0,5 segundos) e o menor valor absoluto de magnetostrrição entre valores temporais colocados pelo utilizador, tal que o primeiro instante do sinal filtrado e truncado se ajuste ao momento em que o sinal filtrado se torna estacionário.

Apresenta-se de seguida o código MATLAB utilizado para filtragem, corte de sinal e obtenção de curva de borboleta, devidamente comentado. Para além dos limites do intervalo em que se encontra o instante inicial do sinal truncado, os dados de entrada do programa são:

- `strainlong`: vetor com os valores de magnetostrrição na direção longitudinal;
- `straintrans`: vetor com os valores de magnetostrrição na direção transversal;
- `campo`: vetor com os valores de indução magnética;
- `tempo`: vetor de tempo com os instantes de tempo a que correspondem os sinais de magnetostrrição e de indução magnética.

Código de filtragem de sinal:

```
%% Filtro Butterworth

function [strainButt] = filtButt(st,ordem,min,max)
h = fdesign.bandpass('N,F3dB1,F3dB2', ordem, min, max,5000);
Hd = design(h, 'butter');
strainButt=filter(Hd,st);
end
```

Código de corte de sinal e exibição das curvas de borboleta:

```
%% Processamento de sinal na direção longitudinal

long=filtButt(strainlong,4,90,110); %flong -> sinal de magnetostrrição na
direção longitudinal filtrado
i1=(INPUT DO UTILIZADOR); %limite inferior do intervalo onde se encontra o
instante inicial do sinal truncado
i2=(INPUT DO UTILIZADOR); %limite superior do intervalo onde se encontra o
instante inicial do sinal truncado
k1=find(tempo>=i1 & tempo<=i2); %vetor com os índices dos elementos do vetor
"tempo" entre i1s e i2s
vetor=long(k1(1):k1(end)); %vetor com os elementos do vetor "tempo" entre i1s
e i2s
primeiro=min(abs(vetor)); %menor valor absoluto de "long" entre i1s e i2s
```

```

indprimeiro=find((long==-primeiro)|(long==primeiro)); %índice do valor de
magnetostricção correspondente ao instante de tempo "primeiro"

k2=find(tempo>0.49 & tempo<0.5);%vetor com os índices dos elementos do vetor
"tempo" entre 0,49s e 0,5s
vetor=long(k2(1):k2(end)); %vetor com os índices dos elementos do vetor
"tempo" entre 0.49s e 0.5s
segundo=min(abs(vetor)); %menor valor absoluto de "long" entre 0,49s e 0,5s
indsegundo=find((long==segundo)|(long==segundo)); %índice do valor de
magnetostricção correspondente ao instante de tempo "segundo"

trunclong=long(indprimeiro:indsegundo); %sinal de magnetostricção na direção
longitudinal filtrado e truncado
tempolong=tempo(indprimeiro:indsegundo); %fração do vetor "tempo"
correspondente a "trunclong"
campolong=campo(indprimeiro:indsegundo); %fração do vetor "campo"
correspondente a "trunclong"

figure(1)
plot(campolong,trunclong); %cria a curva de borboleta
xlabel('Campo B (T)');
ylabel('Magnetostricção');
title('Curva de borboleta na direção longitudinal')
grid on
set(gca,'xlim',[min(campo)-0,05 max(campo)+0,05])

%% Processamento de sinal na direção transversal

trans=filtButt(straintrans,4,90,110); %trans -> sinal de magnetostricção na
direção transversal filtrado

i1=(INPUT DO UTILIZADOR); %limite inferior do intervalo onde se encontra o
instante inicial do sinal truncado
i2=(INPUT DO UTILIZADOR); %limite superior do intervalo onde se encontra o
instante inicial do sinal truncado
k1=find(tempo>=i1 & tempo<=i2); %vetor com os índices dos elementos do vetor
"tempo" entre i1s e i2s
vetor=trans(k1(1):k1(end)); %vetor com os elementos do vetor "trans" entre i1s
e i2s
primeiro=min(abs(vetor)); %menor valor absoluto de "trans" entre i1s e i2s
indprimeiro=find((trans==-primeiro)|(trans==primeiro)); %índice do valor de
magnetostricção correspondente ao instante de tempo "primeiro"

k2=find(tempo>0.49 & tempo<0.5);
vetor=trans(k2(1):k2(end)); %vetor com os índices dos elementos do vetor
"tempo" entre 0.49s e 0.5s
segundo=min(abs(vetor)); %valor de strain entre 0.49s e 0.5s mais próximo de
zero
indsegundo=find((trans==segundo)|(trans==segundo)); %índice do valor de
strain "segundo"

trunctrans=trans(indprimeiro:indsegundo); %sinal de magnetostricção na direção
transversal filtrado e truncado
tempotrans=tempo(indprimeiro:indsegundo); %fração do vetor "tempo"
correspondente a "trunctrans"
campotrans=campo(indprimeiro:indsegundo); %fração do vetor "campo"
correspondente a "trunctrans"

figure(2)
plot(campotrans,trunctrans); %cria a curva de borboleta
xlabel('Campo B (T)');
ylabel('Magnetostricção');
title('Curva de borboleta na direção transversal')
set(gca,'xlim',[min(campo)-0,05 max(campo)+0,05])
%%

```

5.3 - Análise de resultados

Obtiveram-se resultados parcialmente satisfatórios em termos de curvas de borboleta e não se conseguiu encontrar uma relação clara entre valores de magnetostricção e a quantidade de chapa magnética no circuito magnético. É feita aqui uma crítica às curvas de borboleta obtidas e aos valores de magnetostricção para as várias amostras.

5.3.1 - Curvas de borboleta

Depois dos sinais obtidos durante os vários ensaios terem sido devidamente tratados, criaram-se as curvas de borboleta, através dos gráficos da magnetostricção em relação à indução magnética, que de seguida se apresentam.

As curvas de borboleta da amostra com 8 chapas magnéticas encontram-se nas Figuras 5.18 e 5.19, as curvas da amostra de 24 chapas encontram-se nas Figuras 5.20 e 5.21 e as curvas da amostra de 36 chapas nas Figuras 5.22 e 5.23. São bastante semelhantes entre si e à curva de borboleta da Figura 4.19 do capítulo anterior, partilhando a simetria no eixo YY, a concavidade para cima da curva da magnetostricção longitudinal e a concavidade para baixo da curva da magnetostricção transversal. A forte distinção entre as magnetostricções na direção longitudinal e transversal confirmam a anisotropia dos grãos do material que compõe as amostras.

A grande diferença entre a curva da Figura 4.19 e as obtidas neste estudo observa-se com maior claridade nos gráficos da magnetostricção correspondentes à indução magnética acima de 1,25 T, onde o valor de magnetostricção nula não coincide com o ponto de indução magnética nula, como seria de esperar para a medição da magnetostricção em qualquer material. A explicação deste desvio surge da magnetização remanescente das amostras entre medições, o que as deforma logo no início da medição. Este valor de magnetização remanescente não está presente no eixo da indução magnética dos gráficos destas curvas porque os valores desta grandeza são obtidos através da diferença de potencial dos terminais do circuito secundário da ponte de Epstein. Tendo em conta que esse valor de diferença de potencial depende da variação do fluxo magnético nos enrolamentos da ponte, a magnetização remanescente e praticamente constante da amostra não é suficiente para induzir as bobinas da ponte e é considerado um ponto de indução magnética nula.

Corrigindo este desvio e trasladando os gráficos das curvas de modo a que o valor de magnetostricção nulo coincida com o valor de indução nulo, observam-se valores de magnetostricção positivos nas medições da deformação na direção da laminação e valores de magnetostricção negativos nas edições das deformações na direção transversal à primeira. Como explicado no capítulo 4 acerca da magnetostricção dos cristais de ferro, estes resultados indicam que na direção da laminação ocorrem deslocamentos das paredes dos domínios da amostra com valores de 180°, associados a valores de magnetostricção nula, e de 90°, associados a valores de

magnetostricção positiva. Conclui-se assim que a direção de fácil magnetização dos grãos das chapas coincide com a sua direção da laminação, como seria de esperar de um material de grãos altamente orientados. A rotação de domínios, que pode ocorrer para valores de indução magnética perto da saturação, não se evidencia nos gráficos obtidos.

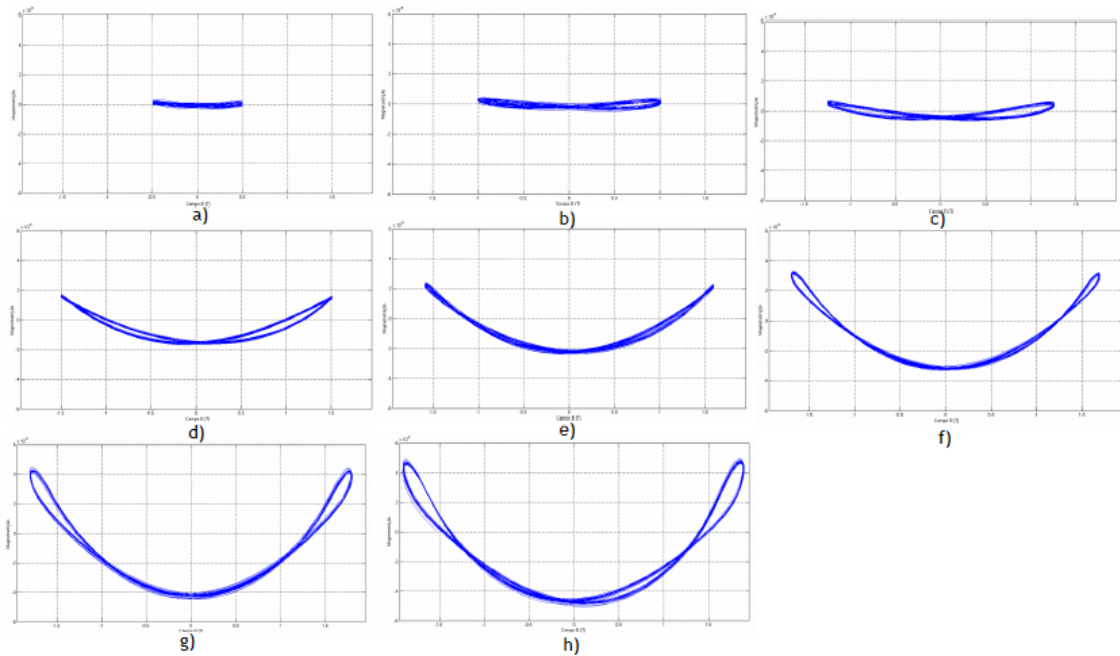


Figura 5.18 - Curvas em borboleta do circuito de 8 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T e h) 1,9 T.

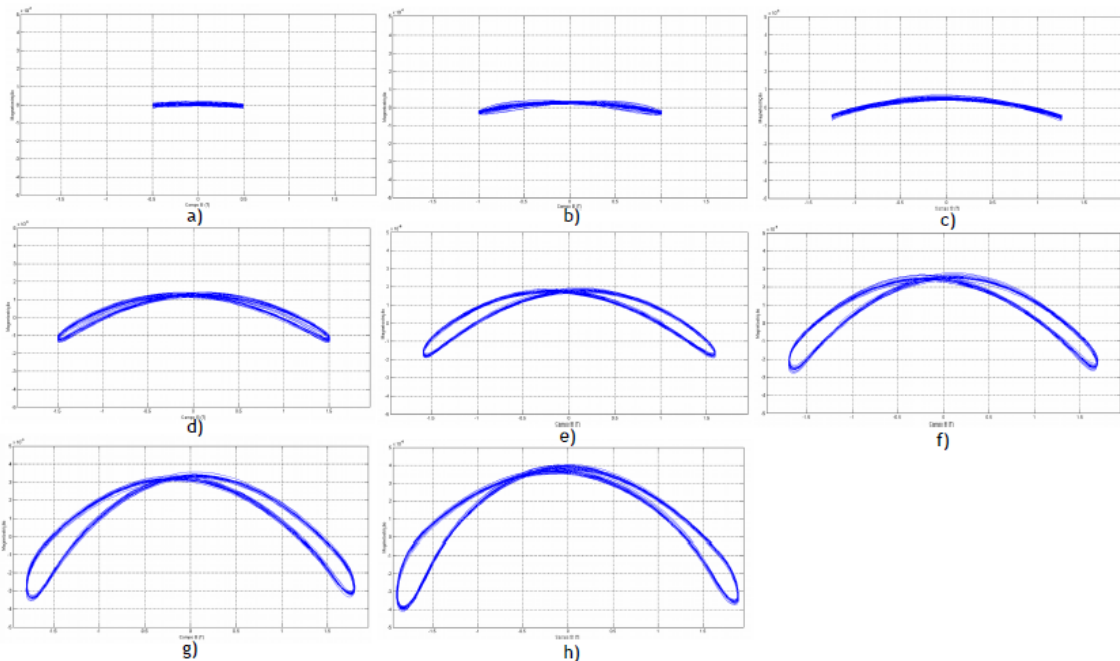


Figura 5.19 - Curvas em borboleta do circuito de 8 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T e h) 1,9 T.

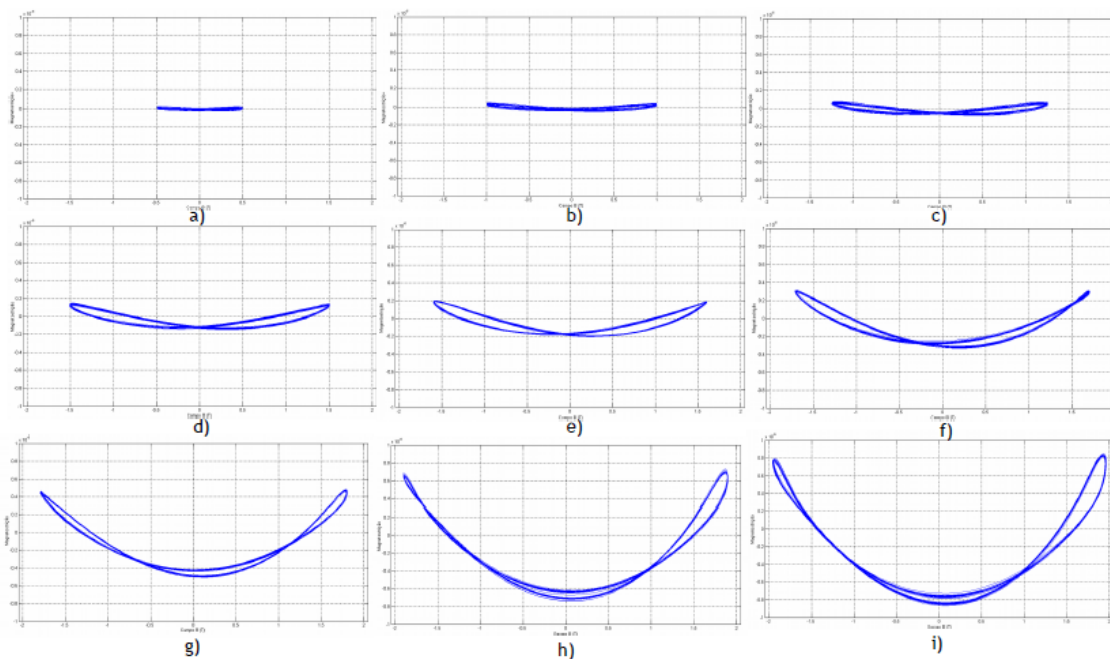


Figura 5.20 - Curvas em borboleta do circuito de 24 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.

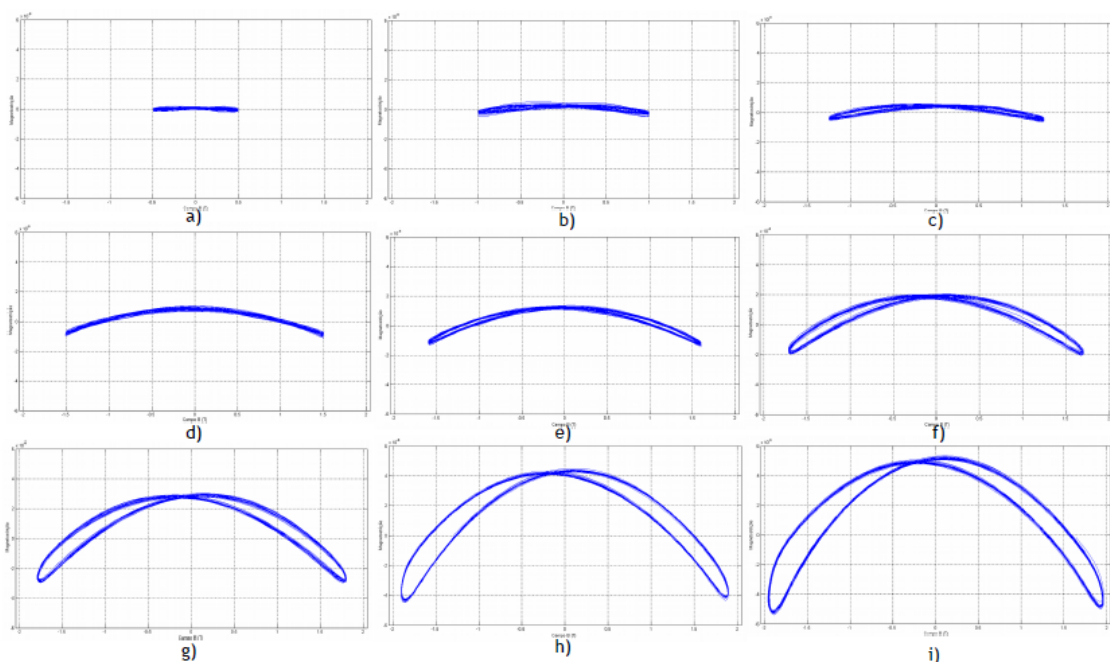


Figura 5.21 - Curvas em borboleta do circuito de 24 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.

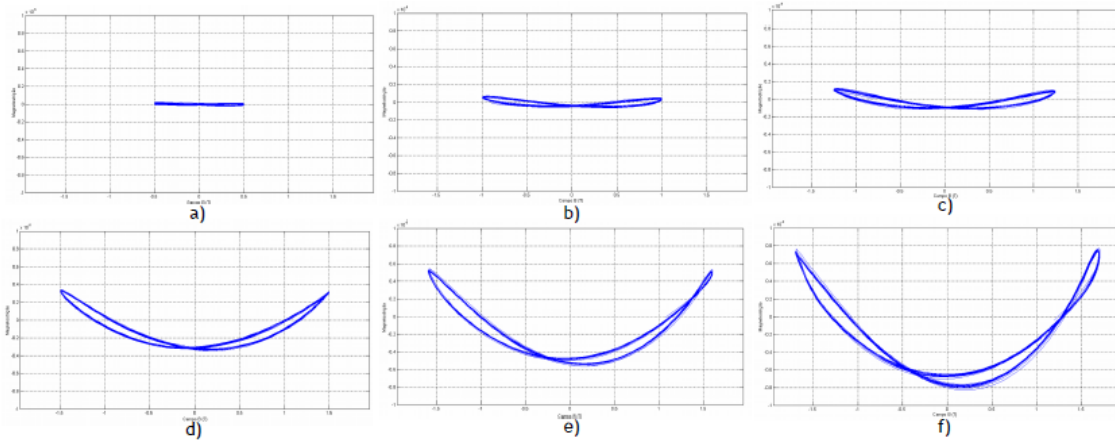


Figura 5.22 - Curvas em borboleta do circuito de 36 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T e f) 1,7.

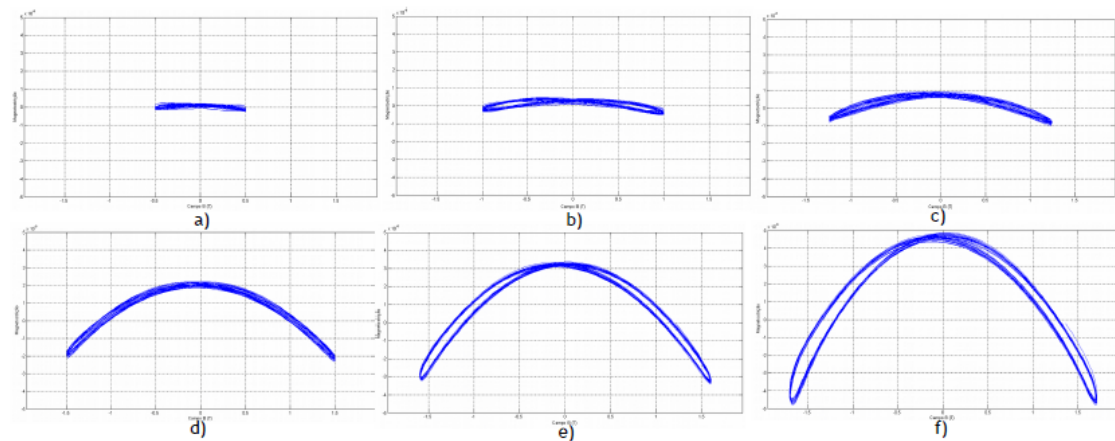


Figura 5.23 - Curvas em borboleta do circuito de 36 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T e f) 1,7.

Quanto aos gráficos das curvas de borboleta da amostra de 4 chapas, os que correspondem à direção transversal são semelhantes aos das restantes amostras, na mesma direção, como mostra a Figura 5.25, ao passo que os gráficos das curvas de borboleta na direção longitudinal são notoriamente diferentes dos gráficos das curvas das restantes amostras na mesma direção, como se observa pela Figura 5.24.

Em relação aos restantes gráficos das curvas na direção longitudinal, os da amostra de 4 chapas apresentam valores praticamente nulos de magnetostricção para valores nulos e máximos de indução magnética, ou seja, nos valores extremos da indução. Pode-se ainda observar uma grande simetria vertical e horizontal nos gráficos das curvas de borboleta nesta direção na amostra de 4 chapas até à indução magnética de 1,25 T. A partir de 1,5 T a simetria horizontal diminui progressivamente, revelando que na direção da laminação predomina a magnetostricção positiva e na direção transversal predomina a magnetostricção negativa, para maiores valores de indução.

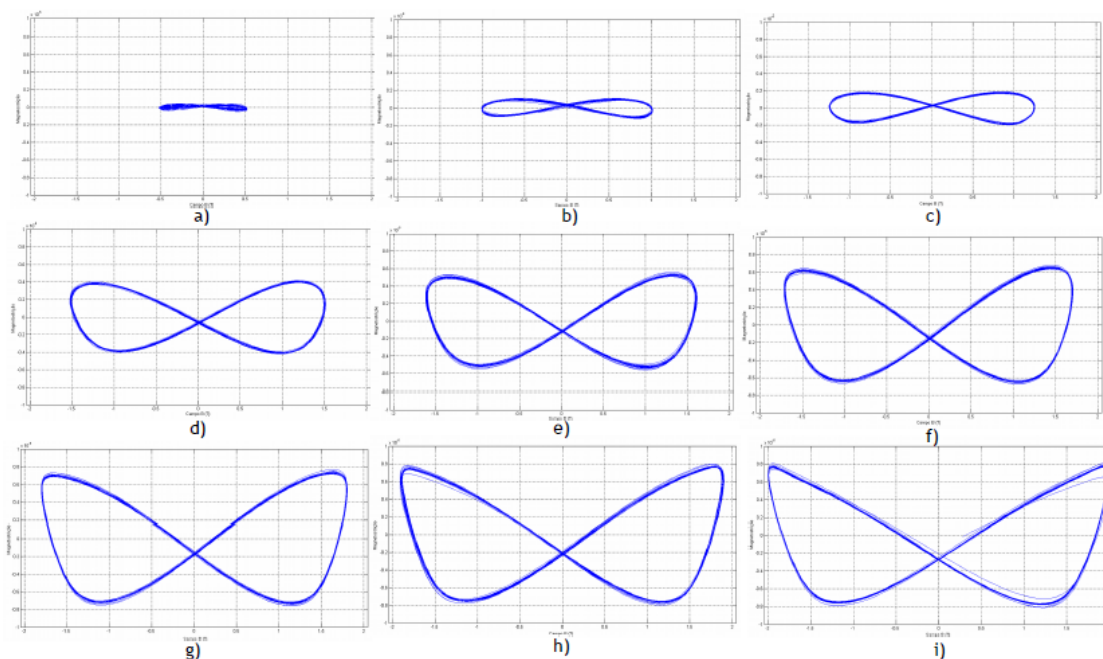


Figura 5.24 - Curvas em borboleta do circuito de 4 chapas magnéticas na direção longitudinal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.

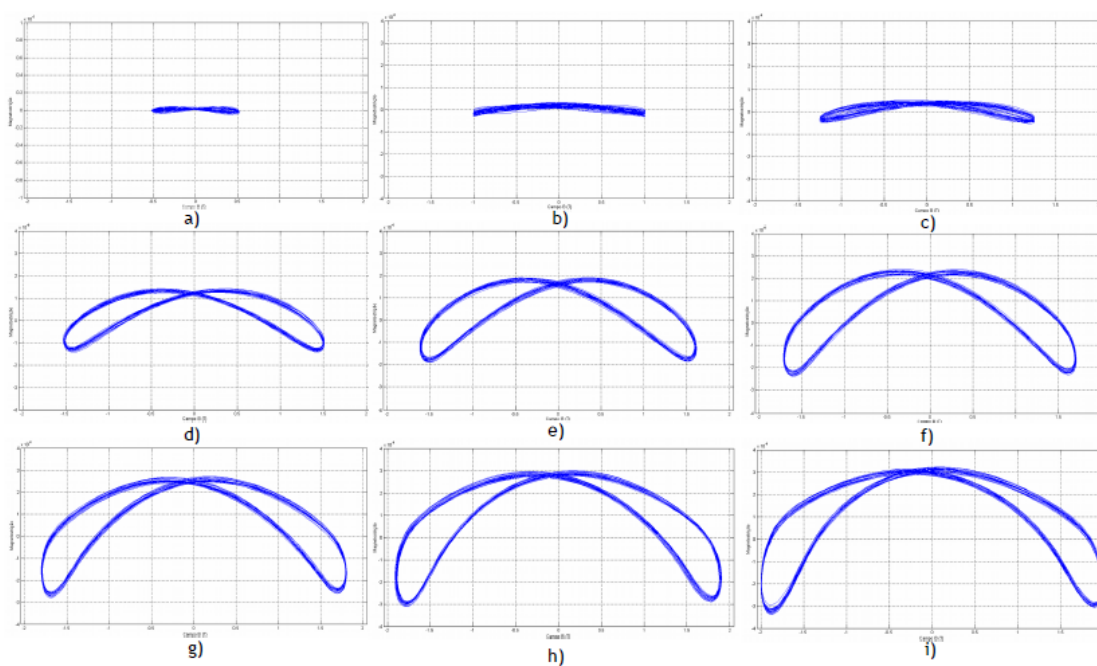


Figura 5.25 - Curvas em borboleta do circuito de 4 chapas magnéticas na direção transversal para os valores de indução magnética a) 0,5 T; b) 1 T; c) 1,25 T; d) 1,5 T; e) 1,6 T; f) 1,7 T; g) 1,8 T; h) 1,9 T e i) 2 T.

Os gráficos das curvas na direção longitudinal da amostra de 4 chapas são ainda semelhantes ao da Figura 4.17, sendo ainda possível relacionar as curvas nas direções longitudinal e transversal às obtidas no estudo de B. Bai e J. Wang [71]. Ainda que os gráficos das curvas resultantes deste estudo e os do de B. Bai e J. Wang sejam simétricos no eixo XX, a semelhança é notória e apresenta-se através das Figuras 5.26 e 5.27.

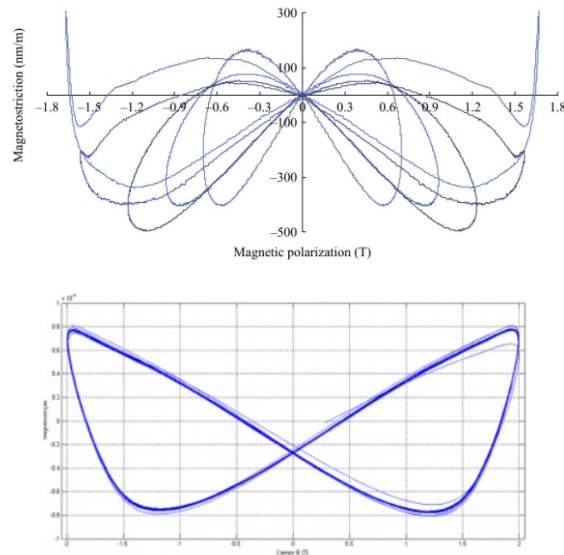


Figura 5.26 - Comparação entre curvas de borboleta na direção da laminação obtida por B. Bai e J.Wang [71] e a curva de borboleta obtida neste estudo na mesma direção, para a amostra de 4 chapas magnéticas.

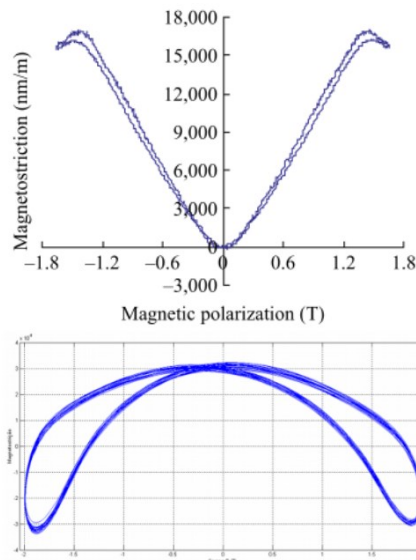


Figura 5.27 - Comparação entre curvas de borboleta na direção transversal á da laminação obtida por B. Bai e J.Wang [71] e a curva de borboleta obtida neste estudo na mesma direção, para a amostra de 4 chapas magnéticas.

Para finalizar, compara-se a relação entre o sinal de indução magnética (à escala) com o sinal de magnetostricção na direção longitudinal da amostra de 4 chapas e a mesma relação para uma amostra de 8 chapas, assim como os gráficos das curvas de borboleta resultantes nas Figuras 5.28 e 5.29, respetivamente. Observa-se que durante meio período de indução magnética a amostra de 4 chapas magnéticas alonga e contrai, retornando à dimensão inicial. No caso da amostra de 8 chapas, para valores de indução nulos, a amostra encontra-se no estado de máxima contração, acompanhando o aumento e diminuição do valor absoluto da indução com uma respetiva alongação e contração. A justificação para a diferença entre estas curvas de borboleta recai na diferente montagem do circuito magnético de 4 chapas, que revelou

influenciar bastante os gráficos da curva de borboleta e, como se apresenta de seguida, também os valores máximo de magnetostricção.

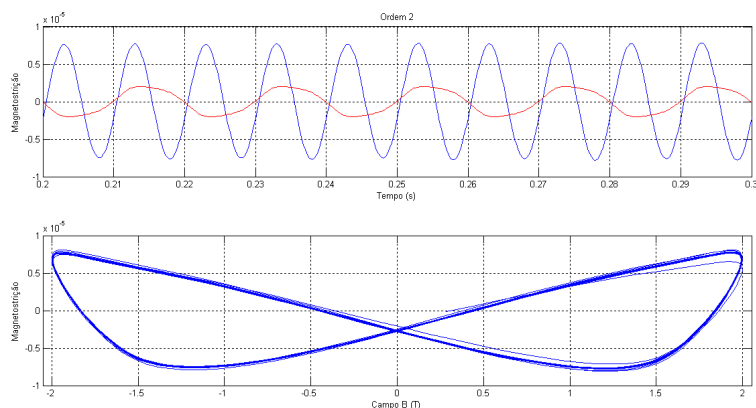


Figura 5.28 - Relação entre o sinal de magnetostricção longitudinal e o sinal de indução magnética, juntamente com a respetiva curva de borboleta $\lambda(B)$, resultante de medições na amostra de 4 chapas.

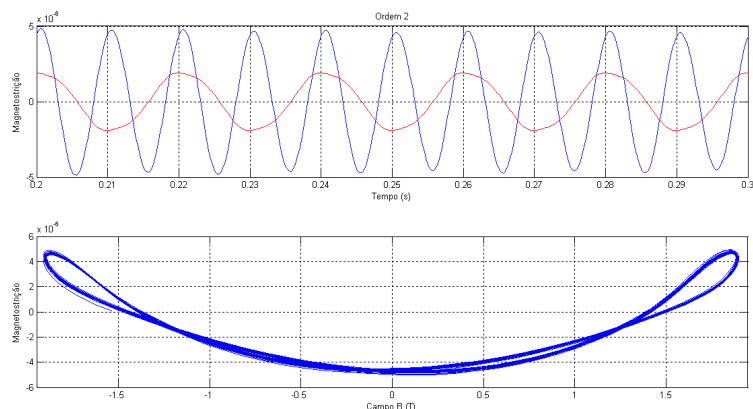


Figura 5.29 - Relação entre o sinal de magnetostricção longitudinal e o sinal de indução magnética, juntamente com a respetiva curva de borboleta $\lambda(B)$, resultante de medições na amostra de 8 chapas.

5.3.2 -Valores máximos absolutos da magnetostricção

Para o circuito com 4 chapas (1 por cada braço da ponte), como referido anteriormente, colocaram-se apoios por baixo das juntas das chapas, de modo a elevar o circuito magnético e reduzir o atrito entre as chapas e a superfície da ponte de Epstein. Os resultados apresentam-se na Figura 5.30 e tabela 5.1.

Nesta situação, os valores de magnetostricção na direção longitudinal são mais elevados que os na direção transversal para todos os valores de indução magnética. Este é um resultado esperado para chapas de grãos orientados pois espera-se que os movimentos dos domínios se concentrem na direção da laminação e que haja pouca rotação de domínios que estejam orientados na direção transversal.

Tabela 5.1 – Valores máximos de magnetostrição para um circuito com 4 chapas magnéticas.

Valor máximo absoluto de indução magnética [T]	Valor máximo absoluto de magnetostrição na direção	Valor máximo absoluto de magnetostrição na direção
	longitudinal	transversal
0,5	$5,2026 \times 10^{-7}$	$1,7942 \times 10^{-7}$
1	$1,1851 \times 10^{-6}$	$3,31096 \times 10^{-7}$
1,25	$1,9846 \times 10^{-6}$	$5,3676 \times 10^{-7}$
1,5	$4,2198 \times 10^{-6}$	$1,4288 \times 10^{-6}$
1,6	$5,5383 \times 10^{-6}$	$1,9007 \times 10^{-6}$
1,7	$6,78667 \times 10^{-6}$	$2,4167 \times 10^{-6}$
1,8	$7,6948 \times 10^{-6}$	$2,7936 \times 10^{-6}$
1,9	$8,0075 \times 10^{-6}$	$3,1148 \times 10^{-6}$
2	$8,11033 \times 10^{-6}$	$3,3790 \times 10^{-6}$

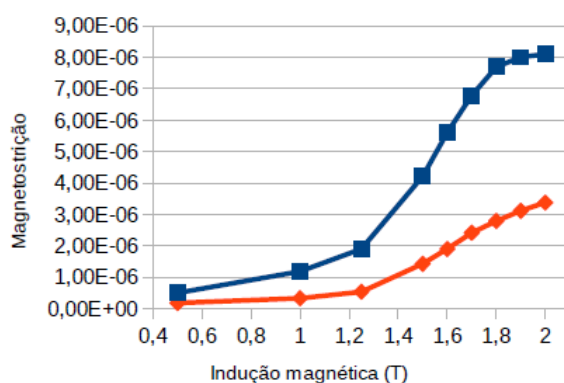


Figura 5.30 - Evolução dos valores máximos de magnetostrição para os circuitos de 4 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).

Para o circuito com 8 chapas (2 por cada braço da ponte), colocou-se a chapa com os sensores de deformação no topo das restantes chapas, em total contacto com essas. Para esta amostra o valor máximo de indução magnética é 1,9T pois coincidiu com o valor máximo de corrente elétrica de 2A no circuito primário da ponte, como se pode observar pela Figura 5.31 e Tabela 5.2. Aqui os valores de magnetostrição na direção de laminação e na direção transversal são bastante semelhantes até 1,25 T, distanciando-se a partir deste valor e mostrando que a magnetostrição longitudinal é superior à transversal.

Tabela 5.2 – Valores máximos de magnetostricção para um circuito com 8 chapas magnéticas.

Valor máximo absoluto de indução magnética [T]	Valor máximo absoluto de magnetostricção na direção	Valor máximo absoluto de magnetostricção na direção
	longitudinal	transversal
0,5	$3,2780 \times 10^{-7}$	$2,0728 \times 10^{-7}$
1	$5,0663 \times 10^{-7}$	$4,119 \times 10^{-7}$
1,25	$6,7936 \times 10^{-7}$	$7,1681 \times 10^{-7}$
1,5	$1,6919 \times 10^{-6}$	$1,4051 \times 10^{-6}$
1,6	$2,4113 \times 10^{-6}$	$1,9546 \times 10^{-6}$
1,7	$3,3057 \times 10^{-6}$	$2,7950 \times 10^{-6}$
1,8	$4,4775 \times 10^{-6}$	$3,5679 \times 10^{-6}$
1,9	$5,0254 \times 10^{-6}$	$4,1142 \times 10^{-6}$

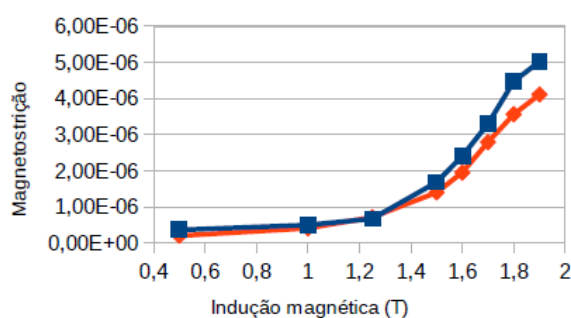


Figura 5.31 - Evolução dos valores máximos de magnetostricção para os circuitos de 8 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).

Para o circuito com 24 chapas (8 por cada braço da ponte) voltou a colocar-se a chapa com os sensores de deformação no topo das restantes chapas, em total contacto com essas. Nesta situação foi possível atingir a saturação da amostra sem ultrapassar a intensidade de corrente de 2 A. A Figura 5.32 e Tabela 5.3 apresentam os valores máximos absolutos de magnetostricção correspondentes aos valores absolutos de indução magnética. Novamente os valores de magnetostricção na direção de laminação e na direção transversal são bastante semelhantes até 1,25 T, distanciando-se a partir deste valor e mostrando que a magnetostricção longitudinal é superior à transversal. Esta diferença é superior que no caso da amostra de 8 chapas magnéticas.

Tabela 5.3 – Valores máximos de magnetostrição para um circuito com 24 chapas magnéticas.

Valor máximo absoluto de indução magnética [T]	Valor máximo absoluto de magnetostrição na direção	Valor máximo absoluto de magnetostrição na direção
	longitudinal	transversal
0,5	$2,5792 \times 10^{-7}$	$2,2051 \times 10^{-7}$
1	$5,0446 \times 10^{-7}$	$5,1003 \times 10^{-7}$
1,25	$7,965 \times 10^{-7}$	$6,0524 \times 10^{-7}$
1,5	$1,4893 \times 10^{-6}$	$1,1142 \times 10^{-6}$
1,6	$2,0526 \times 10^{-6}$	$1,3984 \times 10^{-6}$
1,7	$3,3365 \times 10^{-6}$	$2,0516 \times 10^{-6}$
1,8	$5,0507 \times 10^{-6}$	$3,0318 \times 10^{-6}$
1,9	$7,4352 \times 10^{-6}$	$4,5163 \times 10^{-6}$
2	$8,6737 \times 10^{-6}$	$5,3801 \times 10^{-6}$

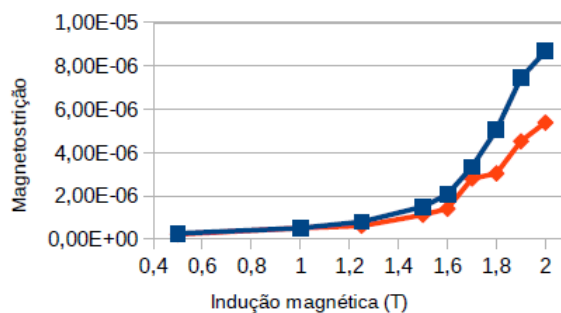


Figura 5.32 - Evolução dos valores máximos de magnetostrição para os circuitos de 24 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).

Com o circuito com 36 chapas (13 por cada braço da ponte) a montagem do sensor é igual para as duas situações anteriores. Desta vez só foi possível atingir os 1,7 T pois, como se verifica na Figura 5.33 e Tabela 5.3, a saturação magnética foi atingida. Os valores de magnetostrição na direção de laminação e na direção transversal continuam semelhantes até 1,25 T, distanciando-se a partir deste valor e mostrando que a magnetostrição longitudinal é superior à transversal. Esta diferença é superior que no caso da amostra de 24 chapas magnéticas, logo também superior ao caso da amostra de 8 chapas.

Tabela 5.4 – Valores máximos de magnetostrrição para um circuito com 36 chapas magnéticas.

Valor máximo absoluto de indução magnética [T]	Valor máximo absoluto de magnetostrrição na direção longitudinal	Valor máximo absoluto de magnetostrrição na direção transversal
0,5	$2,5564 \times 10^{-7}$	$2,5027 \times 10^{-7}$
1	$7,1464 \times 10^{-7}$	$7,1582 \times 10^{-7}$
1,25	$1,2518 \times 10^{-6}$	$1,0239 \times 10^{-6}$
1,5	$3,4526 \times 10^{-6}$	$1,4051 \times 10^{-6}$
1,6	$5,6342 \times 10^{-6}$	$3,3867 \times 10^{-6}$
1,7	$8,2741 \times 10^{-6}$	$4,8843 \times 10^{-6}$

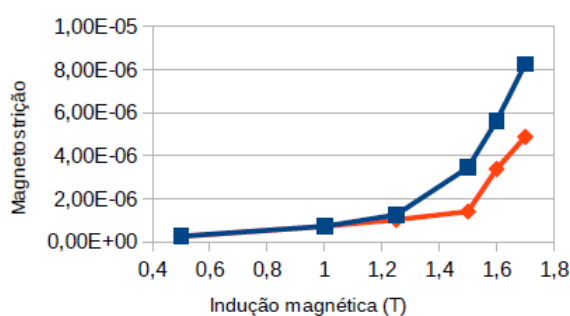


Figura 5.33 - Evolução dos valores máximos de magnetostrrição para os circuitos de 36 chapas magnéticas na direção longitudinal (a azul) e transversal (a laranja).

Como se esperava, em todas as situações, os valores absolutos de magnetostrrição aumentam com o aumento da amplitude da indução magnética. Em todas as amostras, entre os 0,5T e os 1,25T o aumento do valor de magnetostrrição é relativamente baixo, pelo que o processo de magnetização será composto por movimentos de 180° e alguns de 90°. A partir deste valor, a indução magnética tem valor suficiente para provocar movimentos de 90° das paredes dos domínios ou a sua rotação, o que explica o aumento abrupto dos valores absolutos máximos de magnetostrrição das amostras.

Comparando os valores absolutos da magnetostrrição das várias configurações de circuitos magnéticos as conclusões são menos evidentes, como se observa pelas Figuras 5.34 e 5.35. Devido à diferente montagem do circuito de 4 chapas, a evolução dos valores da magnetostrrição desta amostra, em ambas direções, não possui praticamente relação com as restantes, variando entre ser o circuito magnético com mais magnetostrrição para induções menores e um dos circuitos com menos magnetostrrição para 2T.

Descartando os valores para 4 chapas, na direção longitudinal, observa-se alguma tendência para o aumento da magnetostrrição com o aumento do número de chapas, onde o circuito com 36 chapas se destaca mais dos de 24 e 8 chapas, que possuem valores praticamente iguais até 1,8T. Na direção ortogonal à da laminação, os valores de magnetostrrição são praticamente

iguais até aos 1,5T, a partir do qual os valores para 36 chapas são mais elevados que para as restantes chapas. Nos restantes casos os valores confundem-se, pelo que não é possível tirar conclusões definitivas.

Como se conclui, esta tentativa de correlação não foi especialmente sucessiva, podendo dar azo a novos estudos com uma montagem mais uniforme de todas as amostras.

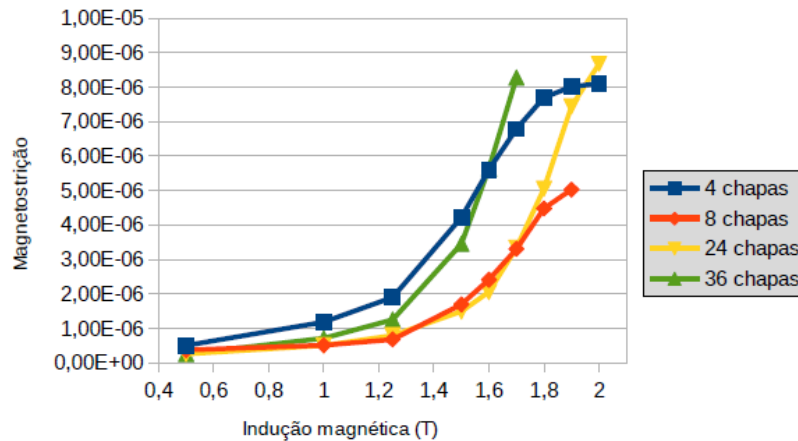


Figura 5.34 - Valores máximos absolutos de magnetostrição a direção longitudinal das amostras analisadas.

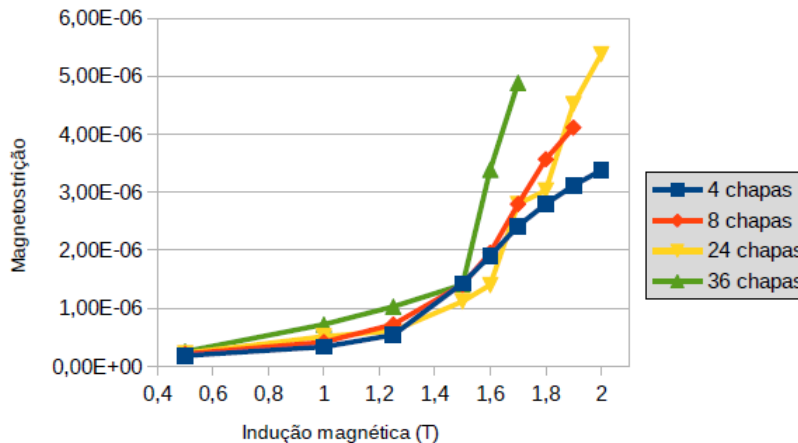


Figura 5.35 - Valores máximos absolutos de magnetostrição a direção transversal das amostras analisadas.

5.4 - Síntese

Neste capítulo, caracterizou-se o equipamento principal utilizado na indução magnética das amostras de núcleo magnético e na medição das suas deformações devido à magnetostrição.

Detalhou-se o processo de aquisição de sinais das alterações dimensionais das chapas e dos sinais elétricos da própria ponte de Epstein e justificou-se a necessidade da filtragem dos sinais de magnetostrição adquiridos. Apresentaram-se alguns princípios da atuação dos filtros em sinais e explicou-se a escolha dos vários parâmetros que caracterizam o filtro aplicado nos sinais de magnetostrição.

Por último, apresentaram-se e justificaram-se os resultados da investigação experimental, tanto as curvas de borboleta como a evolução dos valores máximos absolutos da magnetostricção com o aumento da indução magnética, não tendo sido possível encontrar uma relação explícita entre a quantidade de chapas no circuito magnético e a variação dos valores da magnetostricção.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 - Síntese e conclusões

Conseguiram-se efetuar medições da magnetostricção das chapas magnéticas em teste com a ponte de Epsteins fornecida, havendo necessidade de algum condicionamento das chapas das amostras magnéticas para minimizar as interferências ao seu movimento e os possíveis erros resultantes.

O sistema de extensómetros mostrou-se capaz de medir deformações nos materiais na ordem dos micrómetros, abaixo do qual as medições confundiam-se com o ruído. O processamento de sinal revelou-se necessário para a obtenção de características de magnetostricção mais definidas e com o mínimo de interferências, ainda que os resultados tenham ficado aquém do esperado.

As curvas de borboleta, apesar de definidas e de, na maior parte das situações, possuírem a forma esperada, encontravam-se deslocadas em relação ao que seria expectável devido à magnetização remanescente entre medições. Também a diferença na montagem entre amostras mostrou ser bastante influente nos resultados, não permitindo comparações entre situações. Conseguiu-se, contudo, interpretar as suas variações.

As curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminação da amostra são drasticamente diferentes das curvas de borboleta da magnetostricção na direção ortogonal à da laminação, confirmando a natureza anisotrópica dos domínios magnéticos das chapas magnéticas. Na maioria dos casos, as curvas de borboleta na direção da laminação são simétricas às curvas na direção transversal, sendo que os valores máximos da magnetostricção na direção da laminação são positivos e os valores máximos da magnetostricção na direção transversal são negativos. Daqui conclui-se que, para valores de indução magnética perto da saturação da amostra, os movimentos de 90° das paredes dos domínios magnéticos predominam

na direção da laminação, o que é esperado de amostras de grão orientados. Observando-se a distinção entre os gráficos de curva de borboleta nas direções longitudinal e transversal das amostras, reforça-se a anisotropia da orientação dos grãos nas chapas.

Aliando as conclusões anteriores ao facto dos valores de magnetostricção serem relativamente baixos, revela-se que as chapas magnéticas que constituem as amostras são de boa qualidade e indicadas para uso em núcleos magnéticos de transformadores.

A tentativa de relacionar a quantidade de chapa magnética com a magnetostricção produzido não teve tanto sucesso pela falta de distinção notória entre valores de deformação para cada valor de indução magnética.

Apesar dos resultados não serem totalmente esclarecedores, o trabalho alcançou os seus objetivos essenciais na medida em que se partiu de um ponto de grande desconhecimento perante um problema complexo e real estudado para uma base intermédia de conhecimento que servirá de plataforma fundamental para o aprofundamento do estudo.

6.2 - Perspetivas de trabalhos futuros

O estudo realizado mostrou algumas oportunidades de continuação e desenvolvimento, em diferentes linhas do trabalho já realizado, das quais se pretendem destacar as seguintes:

- Estudo experimental com diferentes blindagens de campos elétricos e magnéticos nos fios e sensores, para remover as frequências indesejadas do sinal elétrico;
- Estudo de diversas configurações de amostras com montagens que ofereçam o mínimo de interferência ao movimento destas;
- Estudo experimental com diferentes tipos de sensores e sistemas de aquisição de sinal para obter medições mais exatas.

Referências

- [1] C. Heck, *Magnetic Materials and Their Applications*, London, United Kingdom: Butterworths, 1974.
- [2] A. Michaud, “On the Einstein-de Haas and Barnett Effects”, *The General Sci. J.*, 2007.
- [3] M. A. Moro, *Los Materiales Magnéticos en la Industria Eléctrica*, Bilbao, Spain, 1970.
- [4] S. Somkun, “Magnetostriction and Magnetic Anisotropy in Non-oriented Electrical Steels and Stator Core Laminations”, M.S. thesis, Wolfson Centre of Magnetics, Cardiff School of Eng., Cardiff Univ., Cardiff, United Kingdom, 2010.
- [5] L. Santi, “Dinâmica da Magnetização e Ruído Barkhausen em Filmes Finos Magnéticos Amorfos”, M.S. thesis, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2006.
- [6] P. Klimczyk *et al.*, “Comparison of Uniaxial and Rotational Magnetostriction of non-Oriented and Grain-Oriented Electrical Steel”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011.
- [7] *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 7th ed. NY: McGraw-Hill, 1941.
- [8] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo*, 1st ed., São Paulo, Brasil: Edgard Blücher Ltda., 1997.
- [9] K. Civetta, J. V. Hove, *Physics for Scientists and Engineers*, 5th ed., New York: W. H. Freeman and Company, 2004.
- [10] D. Fleisch, *A Student's Guide to Maxwell's Equations*, Cambridge, United Kingdom: Cambridge Univ. Press, 2008.
- [11] Technische Fakultät, *Magnetostrictive Materials*, Kiel, Germany: Christian-Albrechts-Univ. Zu Kiel, 2010.
- [12] M. E. Fromy, “The Relation Between the Wiedemann Effect and the Joule Magnetostriction Effect”, NASA, Washington, D.C., 1968.
- [13] J. F. Ferrer, *Circuitos Magnéticos y Transformadores*, Barcelona: Editorial Reverté, 1965.
- [14] I. Dasgupta, *Power Transformers: Quality Assurance*, New Delhi, India: New Age International, 2009.
- [15] J. F. Moira, *Máquinas Eléctricas*, 5th ed., Madrid, Spain: McGraw-Hill, 2003.
- [16] R. M. D. Vecchio *et al.*, *Transformer Design Principles With Applications to Core-Form Power Transformers*, Florida: CRC Press, 2002.
- [17] S. Tabrizi, “Study of Effective Methods of Characterisation of Magnetostriction and its Fundamental Effect on Transformer Core Noise”, PhD thesis, Cardiff School of Eng., Cardiff Univ., Wales, United Kingdom, 2013.

- [18] M. J. Heathcote, *The J.&P. Transformer Book*, 12th ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2007.
- [19] *ABB Transformer Handbook*, ABB Power Technologies Division, Zurich, Switzerland, 2004.
- [20] M. G. Say, *The Performance and Design of Alternating Current Machines*, 2nd ed., London, United Kingdom: Sir Isaac Pitman & Sons, 1955.
- [21] *Engineering Encyclopedia: Power Transformers*, Saudi Aramco, Saudi Arabia.
- [22] F. Caldeira, *Introdução às Questões Ambientais: Cultura, Ciência, Tecnologia*, Porto, Portugal: Edições Fernando Pessoa, 2014.
- [23] China Transformers Electric Co., Limited, “Dry-type Transformer Without Enclosure”. Disponível em: <http://www.china-power-transformer.com/Dry-type-Transformer-Without-Enclosure-p-10.html>. Acesso em 12/05/2015.
- [24] Sandeep Soni, “Electric Transformer”. Disponível em: <http://www.sandeepengineering.com/electric-transformer.htm>. Acesso em 12/05/2015.
- [25] L. C. Pinho, “Materiais Magnéticos e suas Aplicações”, M.S. Thesis, DEEC, FEUP, Porto, Portugal, 2009.
- [26] Jan's Metal Works, “Rolling Services”. Disponível em: <http://www.jansinc.com/rolling.html>. Acesso em: 10/04/2015.
- [27] Steelscape, “Cold Rolling Mill”. Disponível em http://www.steelscape.com/processes/cold_rolling_mill. Acesso em: 10/04/2015.
- [28] R. H. Pry, C. P. Bean, “Calculation of Energy Loss in Magnetic Sheet Materials Using a Domain Model”, *J. of Applied Physics*, 29, 1958.
- [29] K. Inagaki *et al.*, “Amorphous Transformer Contributing to Global Environmental Protection”, *Hitachi Review*, Vol. 60, No. 5, 2011.
- [30] Kiran Daware, “Three Phase Transformer” . Disponível em: <http://www.electricaleasy.com/2014/04/three-phase-transformer.html> . Acesso em 10/04/2015.
- [31] W. M. Arshad *et al.*, “Incorporating Lamination Processing and Component Manufacturing in Electrical Machine Design Tools”, ABB Corporate Research, Västerås, Sweden.
- [32] Q. Tang, “Investigation of Magnetic Properties of Electrical Steel and Transformer Core at High Flux Densities”, Ph.D. dissertation, Sch. Elect. and Elec. Eng., Univ. Manchester, Manchester, United Kingdom, 2015.
- [33] R. S. Masti *et al.*, “On the Influence of Core Laminations Upon Power Transformer Noise”, Dept. Mech. Eng., K. U. Leuven, Leuven, Belgium, 2004.
- [34] W. Kitagawa *et al.*, “Analysis of Structural Deformation and Vibration of a Transformer Core by Using Magnetic Property of Magnetostriction”, *Elec. Eng. in Japan*, Vol.172, 2010.
- [35] M. Ertl, S. Voss, “The Role of Load Harmonics in Audible Noise of Eletrical Transformers”, SIEMENS Transformers, Nuremberg, Germany, 2013.
- [36] H. Inoue, S. Okabe, “Magnetic Properties of Grain Oriented Eletrical Steel in Model Transformer under Direct Current-Biased Magnetization”, *Steel Res. Lab.*, JFE Steel Corp., Kurashiki, Japan, 2014.
- [37] M. V. Der Veen *et al.*, “Measuring Acoustic Noise Emitted by Power Transformers”, AES 109th Convention, LA, 2000.
- [38] P. Shuai, J. Biela, “Investigation of Acoustic Noise Sources in Medium Frequency, Medium Voltage Transformers”, *Lab. High Power Elec. Sys.*, ETH Zurich, Germany.

- [39] O. A. Mohammed *et al.*, “Study of Magnetostriction Effects in Electrical Machinery”, Prog. in Electromagnetic Res. Symp., Pisa, Italy, 2004.
- [40] D. Snell, “Noise Generated by Model Step Lap Core Configurations of Grain Oriented Electrical Steel”, J. Mag. and Mag. Mat., 2008.
- [41] B. Weiser, H. Pfützner, ”Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise of Transformer Cores”, IEEE Trans. Magn., Vol. 36, No. 5, 2000.
- [42] D. Batan *et al.*, “Effect of Core-Clamp Pressure on the Sound Level Emitted by the Cores of Dry-Type Distribution Transformers”, Int. Trans. Corp., Montebello, Canada, 1989.
- [43] M. Mizokami, Y. Kurosaki, “Noise Variation by Compressive Stress on the Model Transformers”, Steel. Res. Lab., Chiba, Japan, 2014.
- [44] A. J. Moses *et al.*, “Contribution of Magnetostriction to Transformer Noise”, Inst. Ener., Cardiff Univ., Cardiff, United Kingdom, 2010.
- [45] S. L. Foster, E. Reiplinger, “Characteristics and Control of Transformer Sound”, IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-100, No. 3, 1981.
- [46] T. Yamaguchi, “Effect of Sheet Thickness on Magnetostriction Characteristics of 3 percent Si-Fe Single Crystal with Slightly Inclined (110)[001] Orientation”, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-20, 1984.
- [47] IEC, “IEC 60076-10 - Power Transformers - Part 10-1 Determination of sound levels - Application Guide”, 2005.
- [48] R. Negi, “Causes of Noise Generation & Its Mitigation in Transformer”, Dept. Elec. Eng., MIT, Moradabad, India, 2013.
- [49] R. S. Girgis *et al.*, “Development of Ultra-Low-Noise Transformer Technology”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 26, No. 1, 2011.
- [50] Z. Xian *et al.*, “Numerical Estimation and Optimization of Vibration Noise due to Magnetostriction and Magnetic Forces for Laminated Core Structures”, 17th ICEMS, Hangzhou, China, 2014.
- [51] C. Hansen, *Active Control of Noise and Vibration*, Florida: CRC Press, 2012.
- [52] C. Bartoletti *et al.*, “Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers”, IEEE, Trans. Power Del., Vol. 19, No. 1, 2004.
- [53] N. B. Ekreem *et al.*, “An Overview of Magnetostriction, Its Use and Methods to Measure these Properties”, J. Mat. Proc. Tech., 2007.
- [54] F. Bohn, “Magnetostricção e Ruído Barkhausen em Aços Elétricos de Grão Não-Orientado,” MS. dissertation, U. F. Santa Maria, Santa Maria, Brazil, 2005.
- [55] S. G. Ghalamestani *et al.*, “Magnetostriction Measurement by Using Dual Heterodyne Laser Interferometers”, IEEE Trans. Magn., Vol 46, No.2, 2010.
- [56] E. C. Pike, A, J, Moses, “Effects of temperature on a.c. magnetostriction in grain oriented silicon-iron”, J. of Material Sci. 12, 1977.
- [57] R. Grossinger *et al.*, “Magnetostriction Measurements on Soft Magnetic Ribbons”, J. Elec. Eng., Vol. 63, No.7, 2012.
- [58] National Instruments, “Capacitive Transducer”. Disponível em <http://www.ni.com/white-paper/14782/en/>. Acesso em 25/Agosto/2015.
- [59] IEC, “IEC 62581 - Eletrical steel - Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens”, 2010.
- [60] OpenStax CNX, “The Application of VSI (Vertical Scanning Interferometry) to the Study of Crystal Surface Processes“. Disponível em <http://cnx.org/contents/7b4dfcf8-b28e-4141-8f2f-1ff39052669f@13.5:41/The-Application-of-VSI-Vertica>. Acesso em 25/Agosto/2015.

- [61] IEC, "IEC 60404-2 - Magnetic Material - Part 2: Methods of Measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame", 2008.
- [62] G. H. Shirkoohi, J. Z. Cao, "Thickness Evaluation for Steel Sheets Using Saturation Magnetization", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, New York, 1998.
- [63] M. B. Stout, *Basic Electrical Measurements*, 2nd Ed. NJ: Prentice-Hall, 1960.
- [64] C. T. Baldwin, *Fundamentals of Electrical Instruments*, 2nd Ed. London, United Kingdom: Harrap, 1973.
- [65] Indiamart, "Digital Single Sheet Tester". Disponível em :
<http://www.indiamart.com/gopalelectronics-ahmedabad/digital-single-sheet-tester.html>.
Acesso em 10/08/2015.
- [66] Eberle, "Fios Esmaltados", 2005.
- [67] ThyssenKrupp, "Grain oriented electrical steel PowerCore® Typical physical properties". Disponível em:
http://www.tkes.com/web2010/tkeswebcms.nsf/www/en_typische_Werkstoffeigenschaften_H.html. Acesso em 15/08/2015.
- [68] HBM, *Strain Gages and Accessories: SG with connection cable K-LI.../K-XY.../K-RY...*
- [69] H. P. Hsu, *Schaum's Outlines of Theory and Problems of Signals and Systems*, NY: McGraw-Hill, 1995.
- [70] MathWorks, "Comparison of Analog IIR Lowpass Filters". Disponível em:
<http://www.mathworks.com/help/signal/ug/comparison-of-analog-iir-lowpass-filters.html>.
Acesso em: 20/08/2015.
- [71] B. Bai, J. Wang, "Research on magnetostriction of grain-oriented electrical silicon-steel sheet", *COMPEL*, Vol. 33, no. 1/2, 2014.