

André Peres dos Reis

**A análise do fluxo homopolar como ferramenta no diagnóstico  
de avarias em transformadores trifásicos**



Instituto Superior de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrónica



André Peres dos Reis

**A análise do fluxo homopolar como ferramenta no diagnóstico  
de avarias em transformadores trifásicos**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Especialidade em Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Luís Manuel Ramos de Oliveira



Instituto Superior de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrónica

2024



# **A análise do fluxo homopolar como ferramenta no diagnóstico de avarias em transformadores trifásicos**

## **DECLARAÇÃO DE AUTORIA DE TRABALHO**

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

---

(André Peres dos Reis)

Copyright © 2024 por André Peres dos Reis

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos

# Resumo

Os transformadores de potência constituem um elemento vital para a produção, transporte e distribuição de energia elétrica. Dada a sua importância é necessário realizar manutenção preventiva para garantir a continuidade e eficiência operacional do sistema elétrico, visto que ao longo da sua vida os mesmos estão sujeitos a diferentes tipos de desgastes. Caso contrário, a ausência de manutenção adequada pode desencadear avarias inesperadas, acarretando custos elevados, não apenas para reparar ou substituir o equipamento, mas também devido à perda de receita pela energia não vendida e às possíveis compensações devido à interrupção do fornecimento de energia. Dado esse cenário, diversos métodos de análise têm sido desenvolvidos e investigados com o objetivo de detetar qualquer avaria na sua fase inicial, evitando assim eventos catastróficos.

A presente dissertação dá continuidade ao trabalho iniciado anteriormente no Laboratório de Projeto Sistemas Elétricos de Energia, onde foi proposto um método de diagnóstico baseado na monitorização dos fluxos homopolares utilizando bobinas de teste. O principal objetivo agora é aprofundar essa análise com recurso a um modelo tridimensional do transformador com base em elementos finitos. Serão considerados as deformações mecânicas e os defeitos de isolamento (curto-circuito entre espiras) mais comuns nos enrolamentos. Os resultados de simulação serão validados experimentalmente com recurso a um modelo à escala de um transformador trifásico.

Palavras-chave: Transformadores, Diagnóstico de avarias, Fluxo homopolar, Bobinas de teste.

# Abstract

Power transformers are a vital element in the generation, transmission, and distribution of electrical energy. Given their importance, preventive maintenance is necessary to ensure the continuity and operational efficiency of the electrical system, as they are subject to various types of wear throughout their lifespan. Otherwise, the lack of proper maintenance can lead to unexpected failures, resulting in high costs—not only for repairing or replacing the equipment but also due to revenue losses from unsold energy and potential compensation for power supply interruptions. Given this scenario, various analysis methods have been developed and investigated to detect failures at an early stage, thereby preventing catastrophic events.

This dissertation continues the work previously initiated at the Electrical Energy Systems Laboratory, where a diagnostic method based on monitoring zero-sequence fluxes using test coils was proposed. The main objective now is to further develop this analysis using a three-dimensional transformer model based on finite element methods. The study will consider mechanical deformations and the most common insulation defects (inter-turn short circuits) in the windings. The simulation results will be experimentally validated using a scaled model of a three-phase transformer.

Keywords: Transformers, Fault diagnosis, Zero-sequence flux, Test coils.

# Índice

Resumo.....	i
Abstract .....	ii
Índice.....	iii
Índice de Figuras .....	v
Abreviaturas .....	x
Lista de Símbolos .....	xi
1. Introdução .....	1
2. Transformadores de Potência .....	3
2.1. Princípio de Funcionamento.....	3
2.2. Constituição .....	8
2.2.1. Núcleo .....	8
2.2.2. Enrolamentos.....	9
2.2.3. Cuba .....	10
2.3. Distribuição de fluxos .....	10
2.4. Componentes Simétricas .....	12
3. Avarias em transformadores e métodos de monitorização e diagnóstico .....	13
3.1. Avarias em transformadores.....	13
3.2. Métodos de Monitorização e Diagnóstico.....	14
3.2.1. Teste do óleo .....	14
3.2.2. Teste do fator de potência de isolamento.....	15
3.2.3. Resistência dos enrolamentos .....	15
3.2.4. Relação entre espiras .....	16
3.2.5. Análise termográfica .....	16
3.2.6. Indutância de Fugas .....	16
3.2.7. Corrente de excitação .....	16
3.2.8. Análise de resposta em frequência.....	17
3.2.9. Descargas parciais.....	17
3.2.10. Medição de tensão de restabelecimento.....	17
3.3. Princípio do método proposto e bobinas de teste.....	18
4. Caracterização experimental e modelo computacional do sistema em estudo .....	19
4.1. Caracterização do transformador.....	19
4.1.1. Equipamento complementar.....	22
4.2. Modelo computacional do transformador utilizando o método dos elementos finitos	

4.3.	Caracterização do funcionamento do transformador .....	27
4.3.1.	Ensaio em vazio - Ligação Yyn0.....	29
4.3.2.	Ensaio em curto-circuito - Ligação Yy0.....	33
4.3.3.	Ensaio homopolar em vazio – Caracterização do fluxo homopolar.....	36
4.4.	Dimensionamento das bobinas de teste .....	38
4.4.1.	Ferramenta de cálculo para determinar o fluxo numa área fechada.....	38
4.4.2.	Localização e dimensão das bobinas de teste .....	39
4.4.3.	Resultados das tensões induzidas nas bobinas de teste para o ensaio homopolar	45
5.	Aplicação do método diagnóstico .....	51
5.1.	Características de funcionamento sem defeito.....	51
5.1.1.	Ligação Yyn0 .....	51
5.1.1.1.	Ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga equilibrada.....	51
5.1.1.2.	Ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga desequilibrada .....	56
5.1.2.	Ligação Dyn11.....	63
5.1.2.1.	Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada .....	63
5.1.2.2.	Ligação Dyn11 com alimentação assimétrica e carga equilibrada.....	71
5.2.	Defeitos internos no transformador.....	78
5.2.1.	Deformações mecânicas nos enrolamentos.....	78
5.2.1.1.	Deslocamento ascendente do enrolamento de 230 V da fase A.....	80
5.2.1.2.	Deslocamento ascendente do enrolamento de 230 V da fase B.....	90
5.2.1.3.	Deslocamento ascendente do enrolamento de 230 V da fase C.....	92
5.2.1.4.	Deslocamento descendente do enrolamento de 230 V da fase A.....	93
5.2.1.5.	Deslocamento ascendente do enrolamento de 132 V da fase A.....	95
5.2.1.6.	Deslocamento descendente do enrolamento de 132 V da fase A.....	97
5.2.1.7.	Alongamento superior do enrolamento de 230 V da fase A.....	98
5.2.1.8.	Alongamento superior do enrolamento de 132 V da fase A.....	100
5.2.1.9.	Alongamento simétrico do enrolamento de 230 V da fase A.....	102
5.2.1.10.	Enrolamento de discos: deslocamento de um disco no enrolamento de 132 V da fase A.....	104
5.2.1.11.	Assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A	106
5.2.2.	Ocorrência de defeitos de isolamento nos enrolamentos .....	112
5.2.2.1.	Curto-circuito entre espiras na fase A.....	113
5.2.2.2.	Curto-circuito entre 74 espiras na fase B .....	124
6.	Conclusões.....	129
7.	Referências.....	131

# Índice de Figuras

Figura 1 – Transformador em condição de vazio [2].	4
Figura 2 – Representação do transformador real [2].	5
Figura 3 – (a) Circuito equivalente; (b) Circuito equivalente referido ao primário [2].	6
Figura 4 – Circuito equivalente de <i>Thévenin</i> .	7
Figura 5 – Principais constituintes de um transformador trifásico [4].	8
Figura 6 – Transformador trifásico de três colunas com enrolamentos concêntricos [4].	9
Figura 7 – Transformador couraçado trifásico com enrolamentos alternados [4].	9
Figura 8 – Distribuição dos fluxos no transformador de três colunas com dois enrolamentos por coluna (Enrolamentos numerados de 1 a 6) [6].	11
Figura 9 – Decomposição de um sistema trifásico assimétrico em três sistemas trifásicos simétricos: (a) Sistema assimétrico; (b) Sistema direto; (c) Sistema inverso; (d) Sistema homopolar [7].	12
Figura 10 – Curva da banheira [6].	13
Figura 11 – Transformador em estudo: (a) vista frontal; (b) vista posterior [6].	19
Figura 12 – Transformador: (a) cuba aberta; (b) cuba fechada.	20
Figura 13 – (a) Dimensões do circuito magnético; (b) designação dos terminais dos enrolamentos [6].	21
Figura 14 – Características dos enrolamentos de 230 V e 132 V (fase U): (a) tomadas; (b) camadas e disposição [6].	21
Figura 15 – Bancada e equipamento.	22
Figura 16 – (a) Banco de resistências; (b) chapa de características do banco de resistências.	23
Figura 17 – (a) Autotransformador; (b) chapa de características do autotransformador.	23
Figura 18 – Wattímetro.	24
Figura 19 – Sondas de corrente.	25
Figura 20 – Amplificador de isolamento.	25
Figura 21 – (a) Modelo Transformador Trifásico; (b) malha dos elementos finitos [14].	27
Figura 22 – Índices horários [15].	28
Figura 23 – Esquema da ligação Yy0 em vazio.	29
Figura 24 – Resultados obtidos para a ligação Yy0, condição em vazio. Ensaio experimental: linha contínua; Simulação: linha a tracejado. Forma de onda de: (a) tensões simples no primário; (b) correntes de linha no primário.	29
Figura 25 – Transitório das correntes nos enrolamentos primários para o ensaio em vazio.	31
Figura 26 – Esquema da ligação Yy0 em curto-circuito.	33
Figura 27 – Resultados obtidos para a ligação Yy0, condição curto-circuito. Ensaio experimental: linha contínua; Simulação: linha a tracejado. Forma de onda de: (a) tensões simples no primário; (b) correntes de linha no primário.	34
Figura 28 – Esquema da ligação para o ensaio homopolar.	37
Figura 29 – Resultados obtidos para o ensaio homopolar em vazio. Ensaio experimental: linha contínua; Simulação: linha a tracejado. Forma de onda de: (a) tensões de entrada e saída; (b) correntes de linha no primário.	37
Figura 30 – Fluxo encadeado no enrolamento.	39
Figura 31 – (a) Bobina de teste no topo da cuba; (b) dimensões da bobina de teste.	40
Figura 32 – Bobina de teste no topo da cuba e transformador.	40
Figura 33 – Tensão aos terminais da bobina de teste.	42
Figura 34 – Localização das bobinas de teste no interior da cuba.	43

Figura 35 – Bobinagem das bobinas de teste. ....	43
Figura 36 – Vista superior do transformador, com a cuba aberta, e disposição das bobinas de teste. ....	44
Figura 37 – Identificação das tensões induzidas nas bobinas de teste. ....	44
Figura 38 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio homopolar: (a) lateral esquerda; (b) lateral direita; (c) topo e base. ....	45
Figura 39 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio homopolar. (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. ....	46
Figura 40 – Comparação entre $v_{outN2}$ , $v_{BTsupNBT}$ e $v_{BTinfNBT}$ : (a) experimental; (b) simulação. ....	48
Figura 41 – Esquema da ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga equilibrada resistiva. ....	52
Figura 42 – Resultados obtidos para a ligação Yyn0, regime equilibrado: (a) tensões simples de alimentação; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. ....	53
Figura 43 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime equilibrado: (a) lateral esquerda; (b) lateral direita; (c) topo e base. ....	54
Figura 44 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime equilibrado: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. ....	55
Figura 45 – Esquema da ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga desequilibrada resistiva. ....	57
Figura 46 – Circuito magnético de 3 colunas. ....	58
Figura 47 – Resultados obtidos para a ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada: (a) tensões simples de alimentação; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. ....	59
Figura 48 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. ....	61
Figura 49 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. ....	62
Figura 50 – Esquema da ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada resistiva. ....	65
Figura 51 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, regime equilibrado: (a) tensões compostas de alimentação; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de fase no primário; (d) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. ....	65
Figura 52 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime equilibrado: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. ....	66
Figura 53 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime equilibrado: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. ....	67
Figura 54 – Tensões na bobina de teste E1 para diversos níveis de carga. ....	69
Figura 55 – Tensões na bobina de teste E1 para diversos níveis de carga: (a) sem normalização; (b) com normalização. ....	70
Figura 56 – Esquema da ligação Dyn11 com alimentação assimétrica e carga equilibrada resistiva. ....	71
Figura 57 – (a) Fluxos nas colunas; (b) diagrama fasorial. ....	72

Figura 58 – Circuito magnético de 3 colunas.....	73
Figura 59 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica: (a) tensões compostas; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de fase no primário; (d) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. .....	74
Figura 60 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime alimentação desequilibrada: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. .....	75
Figura 61 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita.....	77
Figura 62 – Linhas de fluxo e forças magnéticas [18].....	79
Figura 63 – Efeitos típicos de forças nos enrolamentos do transformador: (a) encurvamento forçado; (b) encurvamento livre; (c) inclinação de condutores; (d) curvatura de condutores entre espaçadores [20]. ....	79
Figura 64 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento primário (interno), fase A.....	81
Figura 65 – Tensão nas bobinas de teste: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.....	81
Figura 66 – Tensão nas bobinas de teste: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.....	82
Figura 67 – Configuração diferencial das bobinas de teste (bobinas horizontais omitidas).....	84
Figura 68 – Sinais das tensões aos terminais das bobinas de teste (configuração diferencial). Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A. ....	85
Figura 69 – Configuração agrupada das bobinas de teste.....	87
Figura 70 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A. ....	87
Figura 71 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 2.95 mm e 5.9 mm do enrolamento primário da fase A. ....	89
Figura 72 – Comparação do valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste (configuração agrupada) para deslocamentos ascendente de 2.95 mm e 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.....	89
Figura 73 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento primário (interno), fase B. ....	90
Figura 74 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase B. ....	91
Figura 75 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento primário (interno), fase C. ....	92
Figura 76 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase C. ....	93

Figura 77 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A. ....	94
Figura 78 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento secundário (externo), fase A. ....	95
Figura 79 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A. ....	96
Figura 80 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A. ....	98
Figura 81 – Alongamento superior do enrolamento primário (interno), fase A. ....	99
Figura 82 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A. ....	100
Figura 83 – Alongamento superior do enrolamento secundário (externo), fase A. ....	101
Figura 84 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A. ....	102
Figura 85 – Alongamento simétrico do enrolamento primário (interno), fase A. ....	103
Figura 86 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento simétrico de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A. ....	104
Figura 87 – Deslocamento axial ascendente do disco superior da fase A do enrolamento secundário (externo), fase A. ....	105
Figura 88 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento de 5.9 mm de um disco do enrolamento secundário da fase A. ....	106
Figura 89 – Assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A. ...	107
Figura 90 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A: (a) correntes de fase no primário; (b) correntes de fase no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. ....	108
Figura 91 – Comparação dos resultados experimentais e de simulação dos sinais das tensões induzidas nas bobinas de teste (configuração detalhada): (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada, com exclusão de 2 espiras no enrolamento primário da fase A. ....	108
Figura 92 – Comparação dos resultados experimentais e de simulação dos sinais das tensões induzidas nas bobinas de teste (configuração detalhada): (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada, com exclusão de 2 espiras no enrolamento primário da fase A. ....	109
Figura 93 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A. ....	112
Figura 94 – Esquema da ligação Dyn11 com curto-circuito entre os terminais U e U <sub>B</sub> . ....	114
Figura 95 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase A: (a) correntes de linha no primário; (b) correntes de fase no primário; (c) correntes de fase no secundário (d) correntes associadas ao defeito. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. ....	114

Figura 96 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.....	115
Figura 97 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com $I_b \approx 14$ A: (a) correntes de linha no primário; (b) correntes de fase no primário; (c) correntes de fase no secundário (d) correntes associadas ao defeito. Linha contínua; experimental. Linha a tracejado: simulação.; .....	117
Figura 98 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com $I_b \approx 14$ A. ....	118
Figura 99 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com $I_b = 45$ A: (a) correntes de fase no primário; (b) correntes associadas ao defeito. ....	119
Figura 100 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com $I_b = 126$ A: (a) correntes de fase no primário; (b) correntes associadas ao defeito. ....	120
Figura 101 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A para várias correntes de defeito.....	121
Figura 102 – Comparação do valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste (configuração agrupada) para condição normal e presença de defeitos de isolamento: (a) Resultados experimentais; (b) resultados de simulação. ....	123
Figura 103 – Esquema da ligação Dyn11 com curto-circuito entre os terminais V e $V_B$ .....	124
Figura 104 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase B: (a) correntes de linha no primário; (b) correntes de fase no primário; (c) correntes de fase no secundário (d) correntes associadas ao defeito. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação. ....	125
Figura 105 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase B. ....	126

# Abreviaturas

AC	–	<i>Alternate Current;</i>
AT	–	Alta Tensão;
BT	–	Baixa Tensão;
DP	–	Descarga Parcial;
DGA	–	<i>Dissolved Gas Analysis;</i>
D1	–	Bobina lateral do lado direito do topo;
D2	–	Bobina lateral do lado direito da base;
E1	–	Bobina lateral do lado esquerdo do topo;
E2	–	Bobina lateral do lado esquerdo da base;
FD1	–	Bobina frontal-direita do topo;
FD2	–	Bobina frontal-direita da base;
FC1	–	Bobina frontal-centro do topo;
FC2	–	Bobina frontal-centro da base;
FE1	–	Bobina frontal-esquerda do topo;
FE2	–	Bobina frontal-esquerda da base;
FEM	–	<i>Finite Element Method;</i>
LabVIEW	–	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench;</i>
RVM	–	<i>Recovery Voltage Measurement;</i>
TD1	–	Bobina traseira-direita do topo;
TD2	–	Bobina traseira-direita da base;
TC1	–	Bobina traseira-centro do topo;
TC2	–	Bobina traseira-centro da base;
TE1	–	Bobina traseira-esquerda do topo;
TE2	–	Bobina traseira-esquerda da base;

## Lista de Símbolos

$a$	– Razão de transformação;
$A_f$	– Área da superfície ( $\text{mm}^2$ );
$B$	– Indução magnética (T);
$E_p$	– Valor eficaz da tensão induzida no enrolamento primário (V);
$\bar{E}_p$	– Fasor da tensão induzida no enrolamento primário (V);
$e_p$	– Valor instantâneo da tensão induzida no primário (V);
$E_s$	– Valor eficaz da tensão induzida no enrolamento secundário (V);
$e_s$	– Valor instantâneo da tensão induzida no secundário (V);
$f$	– Frequência (Hz);
$\mathcal{F}_{0EH}$	– Força magnetomotriz homopolar por coluna no ensaio homopolar (Ae);
$\mathcal{F}_{0Dyn11}$	– Força magnetomotriz homopolar por coluna no ensaio em regime assimétrico (Ae);
$\mathcal{F}_{0Yyno}$	– Força magnetomotriz homopolar por coluna no ensaio em regime desequilibrado (Ae);
$I$	– Valor eficaz da intensidade de corrente (A);
$i$	– Valor instantâneo da intensidade de corrente (A);
$I_0$	– Valor eficaz da corrente de excitação (A);
$\bar{I}_0$	– Valor instantâneo da corrente de excitação (A);
$i_0$	– Valor instantâneo da corrente de excitação (A);
$I_1 \dots I_3$	– Valor eficaz da intensidade de corrente nos enrolamentos do primário (A);
$\bar{I}_1 \dots \bar{I}_3$	– Fasor da intensidade de corrente nos enrolamentos do primário (A);
$i_1 \dots i_3$	– Valor instantâneo da intensidade de corrente nos enrolamentos do primário (A);
$I_4 \dots I_6$	– Valor eficaz da intensidade de corrente nos enrolamentos do secundário (A);
$\bar{I}_4 \dots \bar{I}_6$	– Fasor da intensidade de corrente nos enrolamentos do secundário (A);
$i_4 \dots i_6$	– Valor instantâneo da intensidade de corrente nos enrolamentos do secundário (A);

$I_b$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente nas espiras em curto-circuito (A);
$i_b$	–	Valor instantâneo da intensidade de corrente nas espiras em curto-circuito (A);
$I_{cc}$	–	Valor eficaz da corrente de curto-circuito (A);
$i_{cc}$	–	Valor instantâneo da corrente de curto-circuito (A);
$I_{fe}$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente da componente de perdas no ferro (A);
$I_{L1} \dots I_{L3}$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente nas linhas no primário (A);
$\bar{I}_{L1} \dots \bar{I}_{L3}$	–	Fasor da intensidade de corrente nas linhas do primário (A);
$i_{L1} \dots i_{L3}$	–	Valor instantâneo da intensidade de corrente de linha no primário (A);
$I_m$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente da componente de magnetização (A);
$I_{med}$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente média que circula no transformador (A);
$I_P$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento do primário (A);
$\bar{I}_P$	–	Fasor da intensidade de corrente no enrolamento do primário (A);
$i_P$	–	Valor instantâneo da intensidade de corrente no enrolamento do primário (A);
$I_{P(n)}$	–	Corrente nominal no enrolamento primário (A);
$I_{Th}$	–	Valor eficaz da corrente de <i>Thévenin</i> (A);
$\bar{I}_{Th}$	–	Fasor da corrente de <i>Thévenin</i> (A);
$I_S$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento do secundário (A);
$I'_S$	–	Valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento do secundário referido para o lado primário (A);
$\bar{I}_S$	–	Fasor da intensidade de corrente no enrolamento do secundário (A);
$i_S$	–	Valor instantâneo da intensidade de corrente no enrolamento do secundário (A);
$i'_S$	–	Valor instantâneo da intensidade de corrente no enrolamento do secundário referida para o lado primário (A);
$L$	–	Indutância de Magnetização (H);
$l$	–	Comprimento (m);

$N$	–	Número de espiras de um enrolamento;
$N_{BT}$	–	Número de espiras das bobinas de teste;
$N_b$	–	Número de espiras em curto-circuito;
$N_1$	–	Número de espiras do enrolamento primário;
$N_2$	–	Número de espiras do enrolamento secundário;
$P_0$	–	Potência em vazio (W);
$P_{cc}$	–	Potência de curto-circuito (W);
$R_1$	–	Resistência do enrolamento primário ( $\Omega$ );
$R_2$	–	Resistência do enrolamento secundário ( $\Omega$ );
$R'_2$	–	Resistência do enrolamento secundário referida para o lado primário ( $\Omega$ );
$R_A$	–	Carga associada ao enrolamento secundário da fase A ( $\Omega$ );
$R_B$	–	Carga associada ao enrolamento secundário da fase B ( $\Omega$ );
$R_C$	–	Carga associada ao enrolamento secundário da fase C ( $\Omega$ );
$R_{carga}$	–	Resistência da carga ( $\Omega$ );
$R'_{carga}$	–	Resistência da carga referida para o lado primário( $\Omega$ );
$R_{eq}$	–	Resistência equivalente ( $\Omega$ );
$R_{fe}$	–	Resistência de perdas no ferro ( $\Omega$ );
$\mathcal{R}_m$	–	Relutância do circuito magnético ( $H^{-1}$ );
$R_{Th}$	–	Resistência de <i>Thévenin</i> ( $\Omega$ );
$S$	–	Potência aparente (VA);
$S_e$	–	Secção ( $mm^2$ );
$t$	–	Tempo (s);
$V_0$	–	Valor eficaz da tensão em vazio (V);
$v_{01} \dots v_{03}$	–	Valor instantâneo da tensão homopolar gerada nos enrolamentos secundários (V);
$V_1$	–	Valor eficaz da tensão aplicada entre o terminal U e $U_1$ (V);
$V_2$	–	Valor eficaz da tensão aplicada entre o terminal V e $V_1$ (V);
$V_3$	–	Valor eficaz da tensão aplicada entre o terminal W e $W_1$ (V);
$V_4$	–	Valor eficaz da tensão aplicada entre o terminal u e $u_1$ (V);
$V_5$	–	Valor eficaz da tensão aplicada entre o terminal v e $v_1$ (V);

$V_6$	–	Valor eficaz da tensão aplicada entre o terminal w e $w_1$ (V);
$v_1$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada entre o terminal U e $U_1$ (V);
$v_2$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada entre o terminal V e $V_1$ (V);
$v_3$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada entre o terminal W e $W_1$ (V);
$v_4$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada entre o terminal u e $u_1$ (V);
$v_5$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada entre o terminal v e $v_1$ (V);
$v_6$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada entre o terminal w e $w_1$ (V);
$\bar{V}_A$	–	Fasor da tensão da fase A no sistema trifásico (V);
$\bar{V}_{A0}$	–	Fasor da tensão homopolar da fase A no sistema trifásico (V);
$V_{AB}$	–	Valor eficaz da tensão composta no primário entre a fase A e B (V);
$v_{AB}$	–	Valor instantâneo da tensão composta no primário entre a fase A e B (V);
$\bar{V}_{Ad}$	–	Fasor da tensão direta da fase A no sistema trifásico (V);
$\bar{V}_{Ai}$	–	Fasor da tensão inversa da fase A no sistema trifásico (V);
$V_{An}$	–	Valor eficaz da tensão simples no primário da fase A (V);
$v_{An}$	–	Valor instantâneo da tensão simples no primário da fase A (V);
$\bar{V}_{An}$	–	Fasor da tensão simples no primário da fase A (V);
$\bar{V}_B$	–	Fasor da tensão da fase B no sistema trifásico (V);
$\bar{V}_{B0}$	–	Fasor da tensão homopolar da fase B no sistema trifásico (V);
$V_{BC}$	–	Valor eficaz da tensão composta no primário entre a fase B e C (V);
$v_{BC}$	–	Valor instantâneo da tensão composta no primário entre a fase B e C (V);
$\bar{V}_{Bd}$	–	Fasor da tensão direta da fase B no sistema trifásico (V);
$\bar{V}_{Bi}$	–	Fasor da tensão inversa da fase B no sistema trifásico (V);
$V_{Bn}$	–	Valor eficaz da tensão simples no primário da fase B (V);
$V_{Bn}$	–	Valor eficaz da tensão simples no primário da fase B (V);
$v_{BTsup}, v_{BTinf}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais das bobinas de teste superior e inferior (V);
$\bar{V}_C$	–	Fasor da tensão da fase C no sistema trifásico (V);
$\bar{V}_{C0}$	–	Fasor da tensão homopolar da fase C no sistema trifásico (V);
$V_{CA}$	–	Valor eficaz da tensão composta no primário entre a fase C e A (V);

$v_{CA}$	–	Valor instantâneo da tensão composta no primário entre a fase C e A (V);
$V_{cc}$	–	Valor eficaz da tensão de curto-circuito (V);
$\bar{V}_{Cd}$	–	Fasor da tensão direta da fase C no sistema trifásico (V);
$\bar{V}_{Ci}$	–	Fasor da tensão inversa da fase C no sistema trifásico (V);
$V_{Cn}$	–	Valor eficaz da tensão simples no primário da fase C (V);
$v_{Cn}$	–	Valor instantâneo da tensão simples no primário da fase C (V);
$V_{Ctotal}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do centro total (V);
$v_{Ctotal}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do centro total (V);
$V_D$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do lado direito (V);
$v_D$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste da lateral direita (V);
$V_{D1}, V_{D2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste de direita topo e direita base (V);
$v_{D1}, v_{D2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste de direita topo e direita base (V);
$V_{Dtotal}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do lado direito total (V);
$v_{Dtotal}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do lado direito total (V);
$V_E$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do lado esquerdo (V);
$v_E$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste da lateral esquerdo (V);
$V_{E1}, V_{E2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste de esquerda topo e esquerda base (V);
$v_{E1}, v_{E2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste de e esquerda base (V);
$V_{E1Dyn11}$	–	Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste E1 para o regime assimétrico (V);
$V_{E1homo}$	–	Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste E1 para o ensaio homopolar (V);

$V_{E1norm}$	–	Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste E1 normalizada (V);
$V_{E1Yyn0}$	–	Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste E1 para o regime – desequilibrado (V);
$V_{Etotal}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do lado esquerdo total (V);
$v_{Etotal}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste do lado esquerdo total (V);
$V_{FC}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste frontais-centro (V);
$v_{FC}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste frontais-centro (V);
$V_{FC1}, V_{FC2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na frontal-centro(V);
$v_{FC1}, v_{FC2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na frontal-centro(V);
$V_{FD}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste frontais-direita (V);
$v_{FD}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste frontais-direita (V);
$V_{FD1}, V_{FD2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na frontal-direita(V);
$v_{FD1}, v_{FD2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na frontal-direita(V);
$V_{FE}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste frontais-esquerda (V);
$v_{FE}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste frontais esquerda (V);
$V_{FE1}, V_{FE2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na frontal-esquerda(V);
$v_{FE1}, v_{FE2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na frontal-esquerda(V);
$V_H$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste horizontais (V);
$v_H$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste horizontais (V);

$V_{in}$	–	Valor eficaz da tensão aplicada no primário no ensaio homopolar (V);
$v_{in}$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada no primário no ensaio homopolar (V);
$v_{ind}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste (V);
$v_{lab_{dq}}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste no ensaio laboratorial para o caso desequilibrado (V);
$v_{lab_{eq}}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste no ensaio laboratorial para o caso equilibrado (V);
$V_{out}$	–	Valor eficaz da tensão induzida no secundário no ensaio homopolar (V);
$v_{out}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida no secundário no ensaio homopolar (V);
$V_P$	–	Valor eficaz da tensão no enrolamento primário (V);
$v_P$	–	Valor instantâneo da tensão aplicada no primário (V);
$V_S$	–	Valor eficaz da tensão no enrolamento secundário (V);
$V'_S$	–	Valor eficaz da tensão no enrolamento secundário referido para o lado primário (V);
$v_S$	–	Valor instantâneo da tensão no enrolamento secundário (V);
$v_{simul_{dq}}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na simulação computacional para o caso desequilibrado (V);
$v_{simul_{eq}}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na simulação computacional para o caso equilibrado (V);
$V_{TC}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste traseiras-centro (V);
$v_{TC}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste traseiras-centro (V);
$V_{TC1}, V_{TC2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na traseira-centro (V);
$v_{TC1}, v_{TC2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na traseira-centro (V);
$V_{TD}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste traseiras-direita (V);
$v_{TD}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste traseiras-direita (V);

$V_{TD1}, V_{TD2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na traseira-direita (V);
$v_{TD1}, v_{TD2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na traseira-direita (V);
$V_{TE}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste traseiras-esquerda (V);
$v_{TE}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste traseiras-esquerda (V);
$V_{TE1}, V_{TE2}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na traseira-esquerda (V);
$v_{TE1}, v_{TE2}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste na traseira-esquerda (V);
$V_{Th}$	–	Valor eficaz da tensão de <i>Thévenin</i> (V);
$v_{Th}$	–	Valor instantâneo da tensão de <i>Thévenin</i> (V);
$V_{topo}, V_{base}$	–	Valor eficaz da tensão induzida aos terminais da bobina de teste de topo e base (V);
$v_{topo}, v_{base}$	–	Valor instantâneo da tensão induzida aos terminais da bobina de teste de topo e base (V);
$X_{eq}$	–	Reatância equivalente ( $\Omega$ );
$X_{L1}$	–	Reatância de fugas do enrolamento primário ( $\Omega$ );
$X_{L2}$	–	Reatância de fugas do enrolamento secundário ( $\Omega$ );
$X'_{L2}$	–	Reatância de fugas do enrolamento secundário referida para o lado primário ( $\Omega$ );
$X_m$	–	Reatância indutiva da componente de magnetização ( $\Omega$ );
$X_{Th}$	–	Reatância de <i>Thévenin</i> ( $\Omega$ );
$Z_2$	–	Impedância de carga no secundário ( $\Omega$ );
$Z_{eq}$	–	Impedância equivalente ( $\Omega$ );
$\bar{Z}_m$	–	Fasor da impedância de série ( $\Omega$ );
$\bar{Z}_{Th}$	–	Fasor da impedância de <i>Thévenin</i> ( $\Omega$ );
$\omega$	–	Frequência angular (rad/s);
$\Phi_m$	–	Valor instantâneo do fluxo mútuo (Wb);
$\hat{\Phi}_m$	–	Valor máximo do fluxo mútuo (Wb);
$\Phi_P$	–	Valor instantâneo do fluxo fugas do enrolamento primário (Wb);

$\phi_S$	–	Valor instantâneo do fluxo fugas do enrolamento secundário (Wb);
$\phi_{cuba}$	–	Fluxo na cuba (Wb);
$\phi_0$	–	Fluxo homopolar (Wb);
$\phi_{01} \dots \phi_{03}$	–	Fluxo homopolar gerado no núcleo (Wb);
$\phi_1$	–	Fluxo magnético da coluna da fase A (Wb);
$\phi_2$	–	Fluxo magnético da coluna da fase B (Wb);
$\phi_3$	–	Fluxo magnético da coluna da fase C (Wb);
$\bar{\phi}_1$	–	Fasor do fluxo magnético da coluna da fase A (Wb);
$\bar{\phi}_2$	–	Fasor do fluxo magnético da coluna da fase B (Wb);
$\bar{\phi}_3$	–	Fasor do fluxo magnético da coluna da fase C (Wb);
$\phi_4$	–	Fluxo magnético da culassa esquerda (Wb);
$\phi_5$	–	Fluxo magnético da culassa direita (Wb);
$\phi_{L1} \dots \phi_{L6}$	–	Fluxo de fugas (Wb);
$\lambda$	–	Fluxo encadeado (Wb);
$\lambda_0$	–	Fluxo homopolar encadeado (Wb);
$\mu$	–	Permeabilidade magnética (H/m);



# 1. Introdução

No cenário dinâmico da produção, transporte e distribuição de energia elétrica os transformadores de potência desempenham um papel crucial, assegurando a adequação dos níveis de tensão de forma a satisfazer os requisitos técnicos e económicos do funcionamento do sistema elétrico de energia. Devido à sua importância é crucial garantir a sua fiabilidade e integridade para a estabilidade da rede. É assim evidente que os transformadores sejam alvo de constante monitorização, manutenção preventiva e eventuais atualizações tecnológicas, a fim de garantir o fornecimento contínuo e seguro de energia elétrica aos consumidores. Neste contexto, este trabalho tem como principal finalidade desenvolver um novo método de diagnóstico de avarias em transformadores de potência, o qual é baseado na análise da distribuição do fluxo magnético homopolar.

Ao explorar o fluxo homopolar como um indicador de potenciais falhas, este trabalho procura contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preventiva mais eficazes, garantindo assim um fornecimento contínuo e confiável de energia elétrica aos consumidores. Esta abordagem é particularmente importante porque pode permitir detetar alguns tipos de defeito que os métodos clássicos de monitorização têm dificuldade em identificar, como por exemplo pequenas deformações mecânicas nos enrolamentos.

O presente trabalho pretende dar continuidade ao estudo iniciado em [1], onde foram obtidos resultados preliminares relativos à aplicação do método de diagnóstico. Nessa investigação foram utilizadas apenas duas bobinas de teste, localizadas no topo e base do núcleo, o que dificultava a identificação e caracterização rigorosa das alterações provocadas pela presença dos vários tipos de defeitos (como por exemplo, deformações na geometria e curtos-circuitos entre espiras). O modelo de simulação utilizado, baseado no método dos elementos finitos (*Finite Element Method*, FEM) a duas dimensões, também não se revelou o mais adequado para analisar a distribuição do fluxo homopolar, que possui características intrinsecamente tridimensionais [1]. Apesar dos resultados se revelarem promissores, são necessários mais estudos para caracterizar com rigor a distribuição dos fluxos no exterior do núcleo para as várias condições de funcionamento, otimizar o número, localização e configuração das bobinas de teste e, finalmente, realizar validação do método de diagnóstico proposto. O presente trabalho pretende ser uma contribuição válida para atingir estes objetivos.

Ao longo do seguinte relatório serão apresentados resultados de simulação, obtidos através de software baseado no método dos elementos finitos tridimensional, os quais serão validados experimentalmente. Serão considerados várias condições de funcionamento do transformador, em condição normal e na presença anomalias nos enrolamentos, tais como deformações mecânicas e de defeitos de isolamento.

O relatório está dividido em 6 partes. Neste capítulo efetua-se uma breve introdução e enquadramento do trabalho. No capítulo 2 descreve-se sucintamente o transformador de potência, os seus elementos constituintes e o seu princípio de funcionamento. No capítulo 3 descrevem-se sucintamente os diversos métodos de diagnóstico de avarias utilizados na deteção de avarias em transformadores e apresenta-se a ideia-base do método proposto. No capítulo 4 é apresentado o equipamento que foi utilizado nos ensaios experimentais, sendo de seguida incluída uma breve introdução sobre o método dos elementos finitos. São depois apresentados alguns resultados de simulação e experimentais obtidos nos ensaios clássicos do transformador: ensaios em vazio, curto-circuito e homopolar. Finalmente, descreve-se ainda o processo de dimensionamento das bobinas de teste.

No capítulo 5 é aplicado o método diagnóstico para detetar deformações mecânicas e defeitos de isolamento, sendo apresentados os resultados obtidos nas simulações e ensaios experimentais. Para concluir, no capítulo 6 é feito um balanço final do trabalho, com a apresentação das respetivas conclusões

## 2. Transformadores de Potência

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas cujo propósito é a transferência de energia elétrica entre dois circuitos de corrente alternada, adaptando as respectivas tensões e correntes, sem alteração da frequência. De facto, a possibilidade de ligar circuitos com diferentes níveis de tensão foi o que permitiu adoção universal do sistema de corrente alternada (*Alternate Current*, AC) na transmissão e distribuição de energia elétrica. Essencialmente o transformador é um dispositivo de conversão eletromagnética no qual a energia elétrica recebida no enrolamento primário é inicialmente convertida em energia magnética, qual é novamente convertida em energia elétrica noutra ou noutros circuitos (enrolamento secundário, enrolamento terciário, etc.). Assim, os enrolamentos primário e secundário não estão conectados eletricamente, mas acoplados magneticamente [2].

### 2.1. Princípio de Funcionamento

Os transformadores operam com base no princípio da indução eletromagnética, segundo o qual é induzida uma tensão aos terminais de um enrolamento por variação do fluxo magnético que o atravessa. A Figura 1 apresenta um transformador monofásico composto por dois enrolamentos, bobinados num núcleo magnético e ligados por um fluxo mútuo  $\Phi_m$ . O transformador está em condição de vazio, com seu primário conectado a uma fonte de tensão sinusoidal  $v_p$  com frequência  $f$ . No enrolamento primário circula uma pequena corrente de excitação,  $i_0$ , que estabelece o fluxo magnético  $\Phi_m$  no núcleo. Assume-se que todo o fluxo está contido no núcleo (sem fluxo de fugas). Os enrolamentos 1 e 2 têm  $N_1$  e  $N_2$  espiras, respetivamente. A relação entre o fluxo e a tensão induzida no enrolamento primário expressa-se como:

$$e_p = N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.1)$$

Se assumirmos que o enrolamento tem resistência nula, então:

$$v_p = e_p \quad (2.2)$$

Uma vez que  $v_p$  varia sinusoidalmente, o fluxo  $\Phi_m$  também deve ser sinusoidal, variando com a frequência  $f$ . Logo

$$\Phi_m = \widehat{\Phi}_m \text{sen}(\omega t) \quad (2.3)$$

onde  $\widehat{\Phi}_m$  representa o valor de pico do fluxo mútuo de  $\Phi_m$  e  $\omega = 2\pi f$  rad/s. Após substituir o valor de  $\Phi_m$  na Equação (2.1), obtém-se

$$e_p = N_1 \omega \widehat{\Phi}_m \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

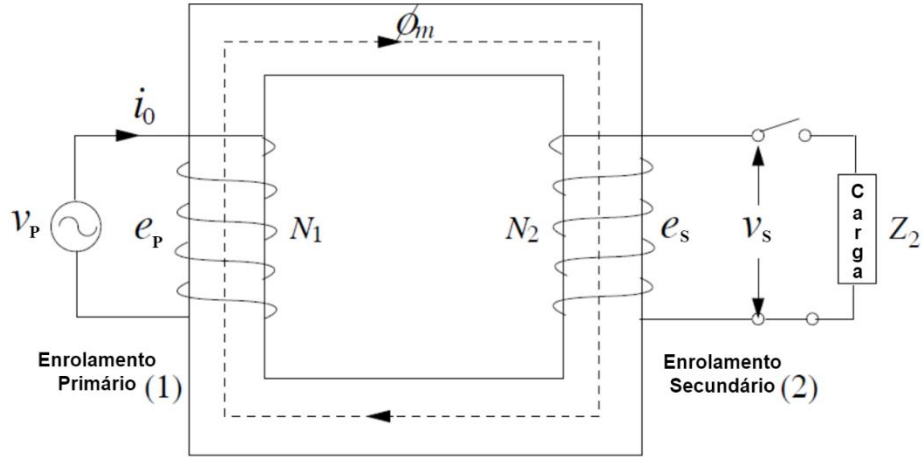


Figura 1 – Transformador em condição de vazio [2].

O valor eficaz da queda de tensão induzida,  $E_p$ , é obtido dividindo o valor de pico na Equação (2.4) por  $\sqrt{2}$ , resultando:

$$E_p = 4.44 \widehat{\Phi}_m f N_1 \quad (2.5)$$

A Equação (2.5) é conhecida como a equação da força eletromotriz do transformador. Para um determinado número de espiras e frequência, o fluxo no núcleo depende apenas da tensão aplicada.

A tensão induzida no enrolamento secundário devido ao fluxo mútuo ( $\Phi_m$ ) é dada por:

$$e_s = N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.6)$$

A razão das duas tensões induzidas pode ser obtida da Equação (2.1) e (2.6)

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.7)$$

onde  $a$  é conhecida como a razão de transformação. Da mesma forma, o valor eficaz da tensão induzida no enrolamento 2 é:

$$E_S = 4.44 \widehat{\Phi}_m f N_2 \quad (2.8)$$

Assim, num transformador ideal (sem resistência nos enrolamentos, sem fluxo de fugas, com permeabilidade infinita, com perdas no ferro nulas) pode ser resumido como:

$$\frac{E_P}{E_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.9)$$

Não existindo perdas no transformador ideal a potência é igual nos lados primário e secundário, portanto

$$V_P I_P = V_S I_S \quad (2.10)$$

de onde resulta

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.11)$$

A análise apresentada para um transformador ideal tem o propósito de descrever os princípios fundamentais da ação do transformador; contudo é importante observar que um transformador ideal não existe na prática.

A Figura 2 ilustra uma representação mais prática do transformador, onde, em comparação com o esquema da Figura 1, é tomado em consideração o fluxo de fugas associado a cada enrolamento. Estes fluxos de fugas podem ser representados no circuito equivalente por reactâncias de fugas,  $X_{L1}$  e  $X_{L2}$ . Conforme ilustrado na Figura 3(a). As resistências dos enrolamentos são também incluídas no circuito equivalente, onde  $R_1$  e  $R_2$  são as resistências dos enrolamentos 1 e 2, respetivamente.

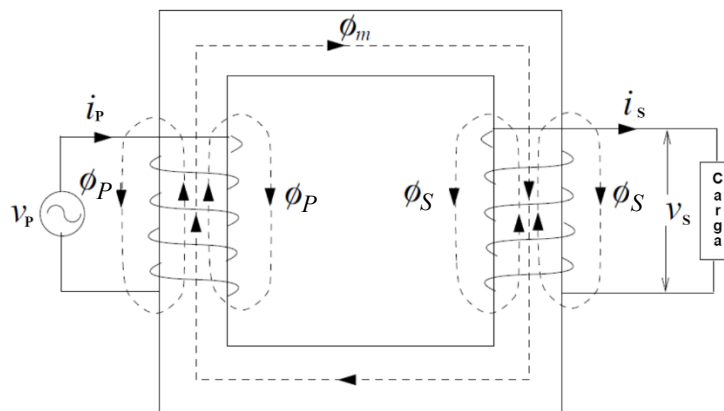


Figura 2 – Representação do transformador real [2].

A corrente em vazio,  $I_0$ , é composta pela componente de magnetização ( $I_m$ ), responsável por produzir o fluxo mútuo, e pela componente de perdas no ferro ( $I_{fe}$ ). Com o enrolamento secundário em circuito aberto, o transformador comporta-se como um circuito altamente indutivo, e, portanto, a corrente em vazio fica desfasada em relação à tensão aplicada por um ângulo ligeiramente inferior a  $90^\circ$  ( $I_m$  é geralmente muito maior que  $I_{fe}$ ). No circuito equivalente mostrado na Figura 3(a), a componente de magnetização é representada pela reatância indutiva,  $X_m$ , enquanto a componente de perdas no ferro é representada pela resistência  $R_{fe}$ .

O circuito equivalente na Figura 3(a) toma assim em consideração os componentes não ideais mais relevantes de um transformador real. O transformador ideal presente no circuito permite incluir matematicamente a relação de transformação. Este transformador ideal pode ser omitido se todas as grandezas forem referidas a um lado, seja o primário ou o secundário do transformador. Por exemplo, no circuito equivalente da Figura 3(b), todas as quantidades são referidas ao lado primário. Nessa condição a resistência e a reatâncias do enrolamento secundário são referidas para o lado primário utilizando o quadrado da razão de transformação:

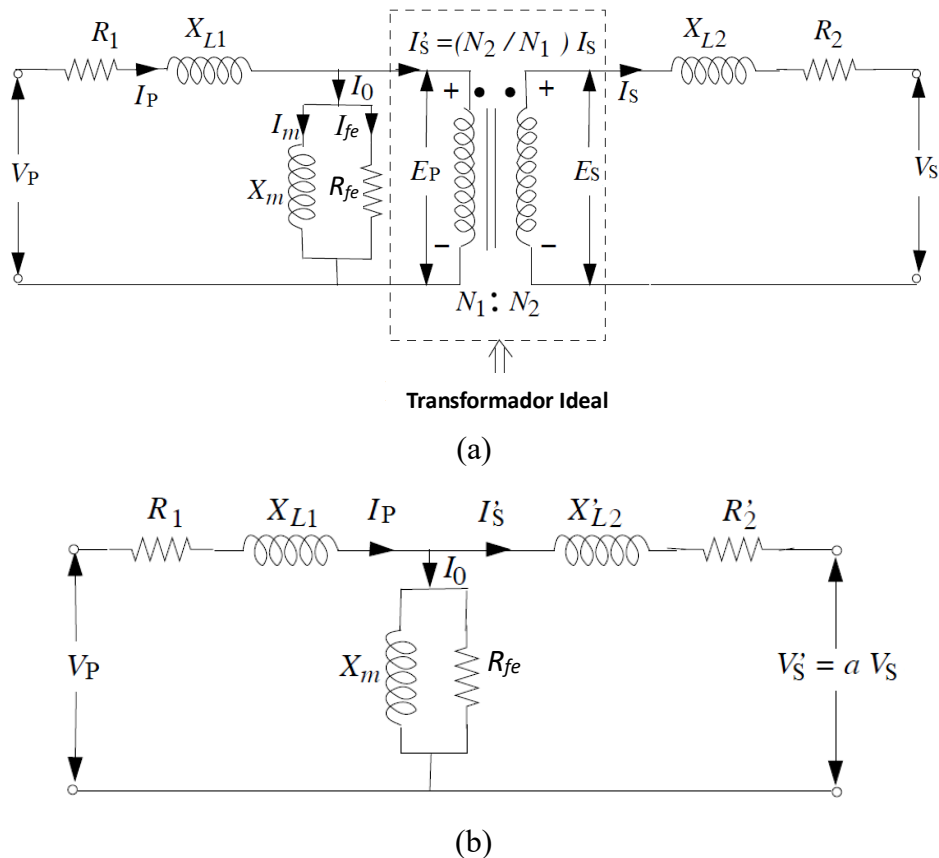


Figura 3 – (a) Circuito equivalente; (b) Circuito equivalente referido ao primário [2].

$$X'_{L2} = X_{L2}(N_1/N_2)^2 \quad (2.12)$$

e

$$R'_2 = R_2(N_1/N_2)^2 \quad (2.13)$$

Pode-se simplificar a análise do circuito elétrico da Figura 3(a) com a utilização do teorema de *Thévenin*, obtendo-se o correspondente circuito equivalente da Figura 4. A análise do circuito equivalente de *Thévenin* realiza-se com a aplicação sucessiva das seguintes relações [3]:

$$\bar{Z}_m = \frac{R_{fe} * jX_m}{R_{fe} + jX_m} \quad (2.14)$$

$$\bar{V}_{Th} = \frac{\bar{Z}_m}{\bar{Z}_m + (R_1 + jX_{L1})} * \bar{V}_{An} \quad (2.15)$$

$$\bar{Z}_{Th} = \frac{\bar{Z}_m * (R_1 + jX_{L1})}{\bar{Z}_m + (R_1 + jX_{L1})} \quad (2.16)$$

$$R'_{carga} = a^2 * R_{carga} \quad (2.17)$$

$$\bar{I}'_{Th} = \bar{I}'_S = \frac{V_{Th}}{R'_{carga} + R'_2 + jX'_{L2} + \bar{Z}_{Th}} \quad (2.18)$$

$$\bar{E}_P = (R'_{carga} + R'_2 + jX'_{L2}) * \bar{I}'_S \quad (2.19)$$

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_P}{\bar{Z}_m} \quad (2.20)$$

$$\bar{I}_P = \bar{I}_0 + \bar{I}'_S \quad (2.21)$$

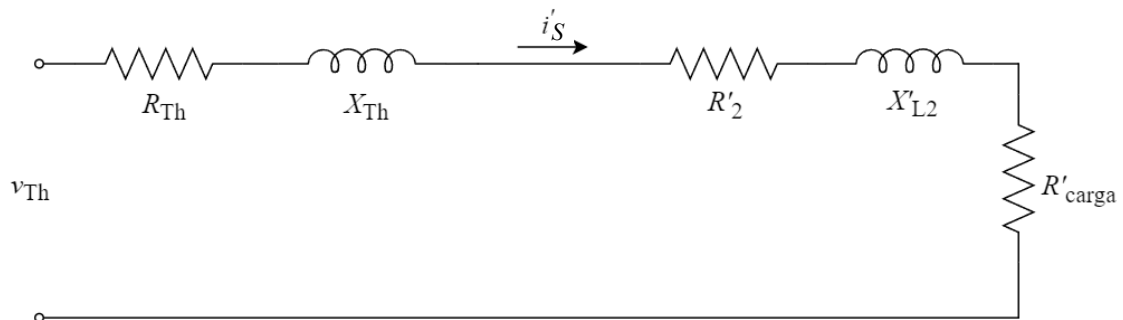


Figura 4 – Circuito equivalente de *Thévenin*.

## 2.2. Constituição

Os principais componentes de um transformador (Figura 5) são os seguintes [4]:

- Circuito magnético ou núcleo;
- Enrolamentos;
- Cuba, no caso dos transformadores em banho de óleo;
- Isoladores.

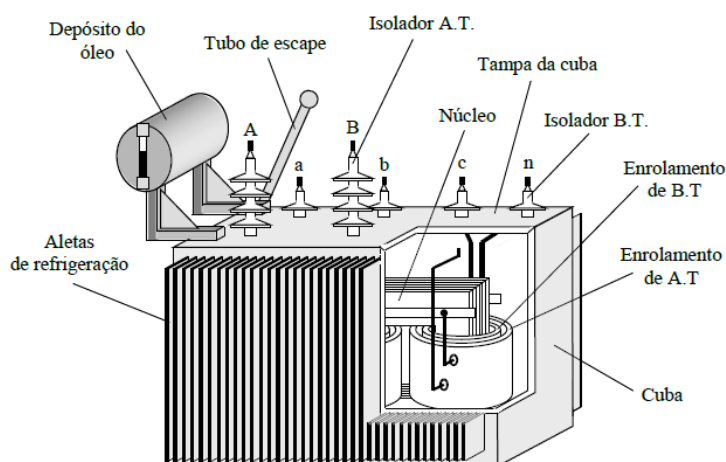


Figura 5 – Principais constituintes de um transformador trifásico [4].

### 2.2.1. Núcleo

A função do núcleo do transformador é facilitar o acoplamento magnético entre os enrolamentos, permitindo que as linhas de fluxo magnético se fechem por um percurso de baixa relutância. O núcleo é constituído por chapas magnéticas finas, isoladas umas as outras, para reduzir as perdas por corrente de Foucault. O material ferromagnético é dopado com silício com o objetivo de minimizar as perdas no ferro [4].

Os transformadores trifásicos podem possuir núcleo de colunas ou couraçado. A Figura 6 apresenta um transformador trifásico com núcleo de 3 colunas, com enrolamentos concêntricos. Na Figura 7 é ilustrado um transformador trifásico com núcleo couraçado com enrolamentos alternados.

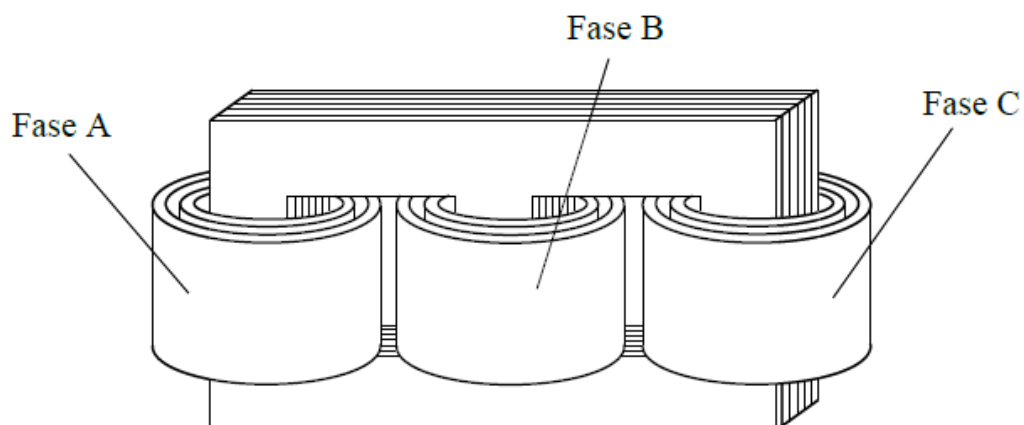


Figura 6 – Transformador trifásico de três colunas com enrolamentos concêntricos [4].

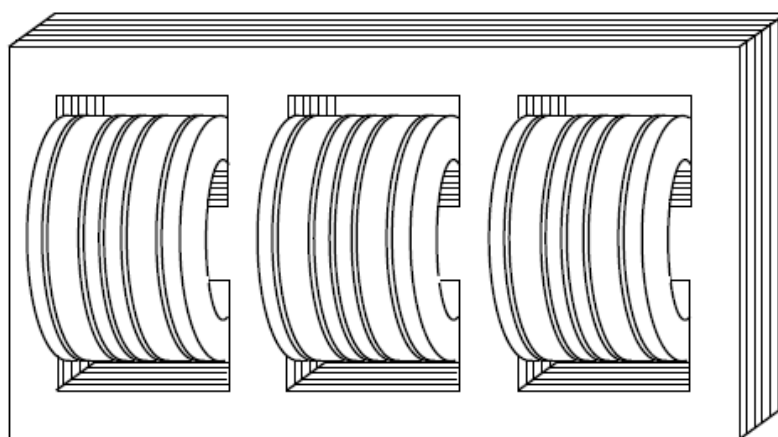


Figura 7 – Transformador coraçoadado trifásico com enrolamentos alternados [4].

### 2.2.2. Enrolamentos

As bobinas que constituem os enrolamentos são dispostas em torno do núcleo, de vários modos conducentes a uma maior ou menor dispersão. Conforme a disposição relativa dos enrolamentos de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT), consideram-se:

- *Enrolamentos concêntricos*, quando as bobinas de alta e baixa tensão estão dispostas concêntricamente em torno das colunas. Normalmente, coloca-se a bobina do enrolamento de BT mais perto da coluna, visto ser mais fácil de a isolar do que a bobina do enrolamento de AT.
- *Enrolamentos alternados*, quando as bobinas dos enrolamentos de alta e baixa tensão se alternam, segundo a altura da coluna, de tal modo que as bobinas do enrolamento de BT são as que se encontram mais perto das culassas [4].

### 2.2.3. Cuba

Para um bom funcionamento de um transformador o arrefecimento é um ponto vital pois as suas perdas são dissipadas no núcleo e nos enrolamentos sob forma de calor. O arrefecimento é melhor conseguido através da utilização de um líquido.

Os transformadores podem ser classificados em função do tipo de arrefecimento: arrefecimento a ar ou arrefecimento a óleo. Os transformadores imersos em óleo mineral requerem uma superfície de refrigeração menor, comparativamente com o arrefecimento a ar, podendo diminuir substancialmente o volume do transformador através do seu poder isolante. Logo os transformadores mais usados são os transformadores em banho de óleo mineral onde o núcleo e os enrolamentos estão imersos numa cuba.

Na tampa da cuba são colocadas várias peças como os isoladores de saída AT e BT, depósito de óleo, para transformadores de mais de 100 kVA e um tubo de escape de gás para os de uma potência superior a 1000 kVA [4].

### 2.3. Distribuição de fluxos

A Figura 8 ilustra uma representação de um transformador trifásico de 3 colunas com 2 enrolamentos concêntricos por fase. Neste transformador podem distinguir-se vários tipos de fluxo:

- Fluxo nas colunas ( $\phi_1, \phi_2$  e  $\phi_3$ ): estes fluxos são comuns aos dois enrolamentos de cada coluna;
- Fluxo nas culassas ( $\phi_4$  e  $\phi_5$ ): fluxos nas culassas;
- Fluxo de fugas entre enrolamentos ( $\phi_{L1}$  a  $\phi_{L6}$ ): estes fluxos abraçam apenas um enrolamento, não contribuindo para o fluxo comum. Fecham-se principalmente pelo ar, podendo também tomar percursos parciais pelo núcleo e pela cuba (se existir).
- Fluxos homopolares ( $\phi_{01}, \phi_{02}$  e  $\phi_{03}$ ): fluxo que se fecha no exterior do núcleo, constituindo um fluxo de fugas em relação ao circuito magnético.

Nos transformadores trifásicos com núcleo de três colunas o fluxo homopolar fecha-se externamente ao circuito magnético, apresentando um valor muito inferior em relação ao fluxo no núcleo, sob condições normais de operação. A densidade e a distribuição das linhas de fluxo homopolar são influenciadas por diversos fatores, incluindo o tipo de

ligação dos enrolamentos, o método de ligação do neutro, a natureza não linear da curva de magnetização do núcleo, desequilíbrios na fonte e/ou carga e a presença da cuba, entre outros [1]. Quando ocorre um desequilíbrio nas correntes do sistema trifásico, seja devido a um defeito interno ou a uma assimetria externa, a distribuição do fluxo homopolar é modificada. A detecção dessa alteração pode ser utilizada para identificar a ocorrência de um defeito no transformador [5]. Devido ao transformador ter apenas três colunas os fluxos homopolares fecham-se pelo exterior do núcleo ferromagnético, tomando o percurso de menor relutância, normalmente oferecido pela cuba do transformador. Este fenómeno poderá resultar no aquecimento da cuba, podendo levar a consequências indesejadas, como ilustrado na Figura 8 onde  $\phi_{01}$ ,  $\phi_{02}$ ,  $\phi_{03}$  representam os fluxos homopolares respetivamente a cada coluna.

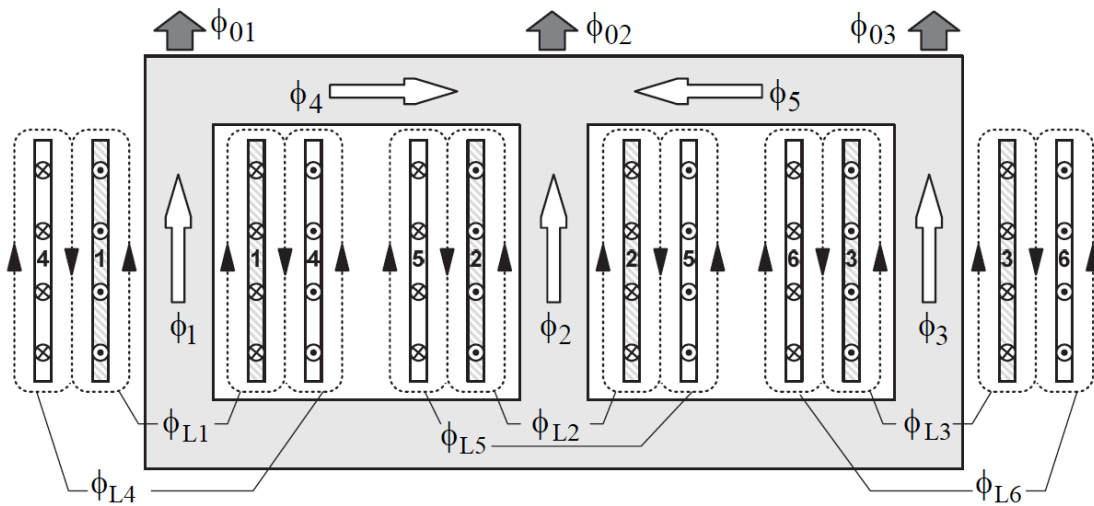


Figura 8 – Distribuição dos fluxos no transformador de três colunas com dois enrolamentos por coluna (Enrolamentos numerados de 1 a 6) [6].

## 2.4. Componentes Simétricas

As componentes simétricas, ilustradas na Figura 9, são utilizadas para representar sistemas trifásicos desequilibrados, que podem ser decompostos em três sistemas simétricos (direto, inverso e homopolar) expressando-se da seguinte forma:

$$\begin{cases} \bar{V}_A = \bar{V}_{Ad} + \bar{V}_{Ai} + \bar{V}_{A0} \\ \bar{V}_B = \bar{V}_{Ad} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{Ai} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{A0} \\ \bar{V}_C = \bar{V}_{Ad} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{Ai} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{A0} \end{cases} \quad (2.22)$$

Resultando na seguinte matriz

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_{Ad} \\ \bar{V}_{Ai} \\ \bar{V}_{A0} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

onde  $\bar{a}$  é igual a

$$\bar{a} = 1 \angle 120^\circ \quad (2.24)$$

Enquanto os componentes fundamentais das tensões induzidas nas três fases do transformador estão defasados entre si por  $120^\circ$ , o terceiro harmônico dessas tensões encontra-se em fase, formando uma sequência homopolar, Figura 9(d).

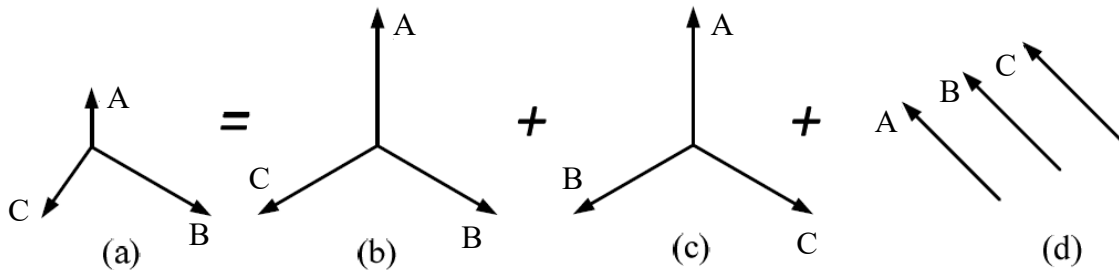


Figura 9 – Decomposição de um sistema trifásico assimétrico em três sistemas trifásicos simétricos: (a) Sistema assimétrico; (b) Sistema direto; (c) Sistema inverso; (d) Sistema homopolar [7].

## 3. Avarias em transformadores e métodos de monitorização e diagnóstico

### 3.1. Avarias em transformadores

Assim como muitos outros equipamentos, a evolução da taxa de avarias, ao longo do tempo, nos transformadores é geralmente representada pela curva de vida, também conhecida por curva da banheira, como mostrado na Figura 10 tendo assim três períodos diferentes no ciclo de vida do transformador:

1. **Mortalidade infantil:** Durante este período, que geralmente curto, a taxa de avarias tende a ser alta, mas em declínio. Essas avarias podem ser causadas por deficiências no projeto, defeitos de fabrico, montagem inadequada, ou instalação incorreta, entre outros.
2. **Vida útil:** Durante este período, a taxa de avarias permanece praticamente constante. As falhas resultam principalmente de causas externas ao equipamento, erros de manutenção e operação, e o número dessas falhas não tende a mudar significativamente. Este período tende a ser longo sendo ideal para a aplicação de técnicas de manutenção periódica.
3. **Envelhecimento:** A partir deste período ocorre uma taxa crescente de avarias, resultante do desgaste e da fadiga dos componentes. No decorrer deste tempo o equipamento requer uma atenção especial devido aos intervalos de intervenção serem diferentes daqueles previamente definidos [6].

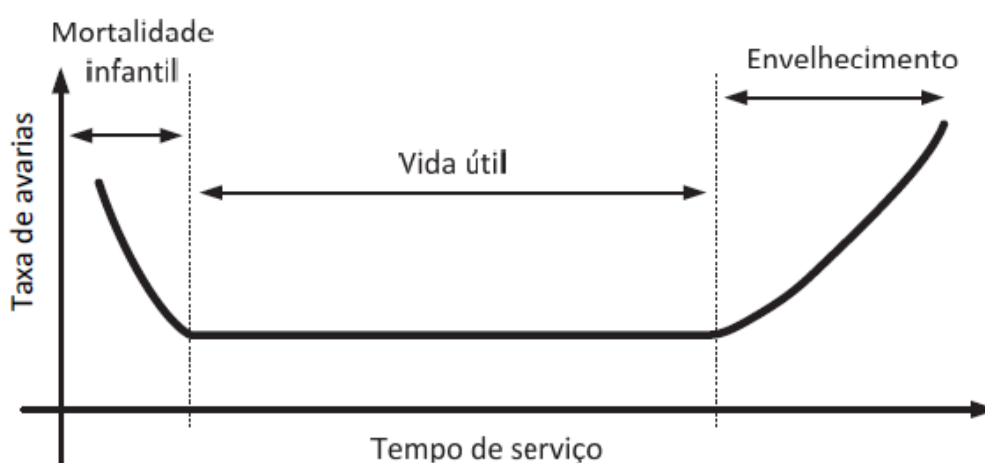


Figura 10 – Curva da banheira [6].

Um transformador pode avariar devido a uma combinação de fatores elétricos, mecânicos e térmicos. É difícil caracterizar um modo de falha típico nos transformadores, devido à complexidade do sistema e aos diversos processos envolvidos. A compreensão dos fenômenos associados à ocorrência de avarias é assim essencial para melhorar os procedimentos de manutenção e prolongar o tempo de vida útil dos transformadores [6].

Este trabalho tem como objetivo principal a detecção de assimetrias e anomalias no transformador, especialmente aquelas relacionadas a defeitos de isolamento e deformações nos enrolamentos. Essas falhas podem resultar em desequilíbrios significativos no funcionamento do transformador, afetando assim a distribuição do fluxo magnético onde é possível a detecção de tal falhas. Além disso, a presença de defeitos de isolamento, como curtos-circuitos entre espiras, e deformações físicas dos enrolamentos, como deslocamentos ou alongamentos, podem acelerar o processo de degradação do equipamento, comprometendo sua confiabilidade e vida útil do transformador. Ao identificar precocemente essas irregularidades, é possível implementar medidas corretivas que minimizem os danos e aumentem a longevidade do transformador, garantindo a continuidade operacional e a segurança do sistema elétrico.

## 3.2. Métodos de Monitorização e Diagnóstico

Devido à importância dos transformadores na rede elétrica é preciso garantir a sua fiabilidade, existindo assim diversos métodos de diagnóstico que possibilitam avaliar o estado de funcionamento do transformador permitindo proporcionar um diagnóstico fidedigno e completo sobre o mesmo. Alguns destes métodos podem ser classificados como tradicionais, pois incluem técnicas com créditos firmados e utilização generalizada durante as últimas décadas. Outros são de aplicação recente ou encontram-se ainda em fase de investigação e desenvolvimento [8]. Contudo a maioria destes métodos de diagnóstico requerem a remoção de serviço do transformador, tratando-se de métodos off-line.

### 3.2.1. Teste do óleo

A análise do óleo isolante dos enrolamentos é um dos métodos mais comuns para avaliar o estado dos transformadores em operação. A ocorrência de falhas térmicas e elétricas podem resultar na degradação do óleo.

### i) **Análise de gases dissolvidos no óleo**

Os óleos isolantes, quando submetidos a esforços elétricos ou térmicos anormais, decompõem-se, libertando pequenas quantidades de gases. A composição desses gases varia conforme o tipo de falha ocorrida. A análise de gases dissolvidos (*Dissolved Gas Analysis*, DGA) permite identificar falhas como descarga parcial (efeito de corona), sobreaquecimento e formação de arco elétrico numa ampla gama de equipamentos preenchidos com óleo [8].

### ii) **Qualidade do óleo isolante**

A qualidade do óleo isolante tem um impacto significativo no desempenho e na vida útil dos transformadores. Para avaliar mudanças nas propriedades elétricas do óleo, a extensão da contaminação e o grau de deterioração, são realizados testes elétricos, físicos e químicos. Esses resultados são fundamentais para desenvolver procedimentos de manutenção preventiva, evitando paradas dispendiosas e falhas prematuras. À medida que o papel isolante se degrada, ele produz e dissolve compostos furânicos específicos no óleo. A presença desses compostos está relacionada à força do papel, medida pelo seu grau de polimerização [8].

## 3.2.2. Teste do fator de potência de isolamento

O fator de potência de isolamento é a razão entre a componente resistiva da corrente e a corrente de fuga total sob uma tensão aplicada. A medição do fator de potência é uma fonte importante de dados para monitorizar as condições de transformadores e isolamentos. A avaliação não se baseia apenas numa única amostra de resultados do fator de potência, mas no seu histórico de variação [8].

## 3.2.3. Resistência dos enrolamentos

A resistência do enrolamento é usada para indicar a condição do condutor do enrolamento e dos contatos do comutador de tomadas. O teste requer um ohmímetro capaz de medir com precisão resistências na faixa de 20  $\Omega$  até frações de 1  $\Omega$ . A resistência do enrolamento varia com a temperatura do óleo. Durante o teste, a temperatura deve ser registada. Para comparações futuras, a resistência deve ser convertida para uma temperatura de referência. A medição da resistência dos enrolamentos do transformador requer uma interrupção e isolamento do transformador [8]-[9].

#### 3.2.4. Relação entre espiras

O teste da relação do número de espiras é útil para determinar se há ou não espiras em curto-circuito ou circuitos em aberto. A relação medida deve estar dentro de 0,5% da relação das tensões nominais entre os enrolamentos, conforme indicado na placa de características do transformador. Todas as posições de tomada e todas as fases devem ser medidas. O teste pode ser realizado a uma tensão muito baixa [8].

#### 3.2.5. Análise termográfica

O teste de emissão infravermelha é empregue para monitorizar a temperatura da superfície externa do transformador enquanto ele está em funcionamento. Este método é eficaz na deteção de problemas térmicos, como anomalias no sistema de arrefecimento, maus contactos nas ligações elétricas e identificação de pontos quentes. As câmaras termográficas captam a radiação térmica da superfície dos objetos, mas não conseguem visualizar o interior da cuba do transformador. Uma câmara termográfica é um dispositivo utilizado para capturar imagens, especialmente para visualização de radiação térmica ou infravermelha [8].

#### 3.2.6. Indutância de Fugas

Um método convencional para detetar alterações na geometria dos enrolamentos de transformadores é a medição da indutância de fugas. Durante um curto-circuito são produzidas forças magnéticas internas, que podem resultar numa diminuição do diâmetro do enrolamento interior e no aumento no diâmetro do enrolamento exterior, resultando num aumento do fluxo de fugas entre enrolamentos e, conseqüentemente, um aumento na reactância de fugas. A medição da reactância de fugas, através do ensaio em curto-circuito, pode ajudar a identificar este defeito [6].

#### 3.2.7. Corrente de excitação

É possível detetar avarias no circuito magnético e nos enrolamentos de transformadores monofásicos ou trifásicos, medindo a corrente de excitação através da realização de um ensaio em vazio monofásico. Os resultados geralmente são analisados comparando as correntes entre as três fases de um transformador trifásico, ou, no caso de transformadores monofásicos, comparando a corrente com referências obtidas de unidades similares [6].

### 3.2.8. Análise de resposta em frequência

A função de transferência do transformador pode, em alguns casos, revelar deformações nos enrolamentos ao comparar a função medida com uma referência previamente obtida. Alterações na geometria dos enrolamentos causam modificações nas capacidades internas, o que altera a função de transferência do transformador. Na prática, um impulso é injetado em um lado do transformador, e os espectros do impulso e da resposta no outro terminal são medidos usando a Transformada de Fourier. A função de transferência é então calculada dividindo esses dois espectros [6].

### 3.2.9. Descargas parciais

As descargas parciais (DP) são descargas elétricas que ocorrem apenas parcialmente na estrutura isolante entre dois condutores. A produção de DP aumenta à medida que o sistema de isolamento do transformador se degrada, sendo, portanto, a sua intensidade e frequência bons indicadores do estado dos materiais isolantes [6]. Existem dois métodos frequentemente empregues para a deteção de DP: a deteção de sinais acústicos e a medição dos sinais elétricos gerados pelas DP. Para detetar essas ondas, sensores de emissão acústica são montados na parede do tanque do transformador ou no óleo dentro do tanque do transformador. Se múltiplos sensores forem usados, as DP podem ser localizadas com base no tempo de chegada dos pulsos aos sensores. A sensibilidade do teste depende da localização da DP, uma vez que o sinal é atenuado pelo óleo e pela estrutura do enrolamento. Isso significa que quanto mais profunda dentro do enrolamento a DP estiver localizada, maior será a atenuação. Sensores piezoelétricos e sensores de fibra ótica podem medir a DP. Pesquisas recentes mostram que os sensores óticos têm uma sensibilidade potencialmente muito maior do que os sensores piezoelétricos montados externamente no tanque para a deteção de DP [10].

### 3.2.10. Medição de tensão de restabelecimento

A medição da tensão de restabelecimento (*Recovery Voltage Measurement, RVM*) é utilizada para avaliar as condições do isolamento óleo-papel e o teor de água no isolamento. Neste teste, a estrutura dielétrica do isolante é primeiramente carregada pela aplicação de um impulso de tensão. Em seguida, o isolante é descarregado ao realizar um curto-circuito através de uma impedância externa. O sinal de tensão resultante, que se estabelece após a remoção da impedância de descarga, é utilizado para caracterizar a condição do sistema de isolamento [6], [8].

### 3.3. Princípio do método proposto e bobinas de teste

Como mencionado anteriormente, o fluxo homopolar é afetado quando ocorre um desequilíbrio no transformador. Por exemplo, durante a operação do transformador, um defeito que altere a geometria dos componentes da máquina, como o deslocamento dos enrolamentos devido a esforços eletromagnéticos, pode modificar a distribuição dos fluxos, permitindo que a anomalia seja detetada através das mudanças no fluxo homopolar através da sua monitorização contínua.

Um dos métodos bastante promissor para verificar o estado de funcionamento do transformador consiste na monitorização da distribuição do fluxo magnético no exterior do núcleo, cuja medição é efetuada através de bobinas de teste [1], [11], [12]. Esta dissertação tem como objetivo dar continuidade ao trabalho iniciado em [1], desenvolvendo e aplicando a referida monitorização, através de bobinas de teste inseridas no interior da cuba junto do transformador. O método permitirá assim efetuar a monitorização contínua (*on-line*) do estado de funcionamento de transformadores trifásicos, em particular no que se refere à deteção de defeitos mecânicos e de isolamento dos enrolamentos. Neste contexto, a variação do fluxo homopolar pode ser um indicador confiável da ocorrência da falha [1].

Caso essas bobinas de teste sejam instaladas no fabrico e/ou montagem do transformador, a aplicação do método de diagnóstico não exigirá a interrupção de serviço da máquina. Dessa forma, o método diagnóstico pode ser aplicado durante o funcionamento normal da instalação, permitindo monitorizar continuamente a condição operacional da máquina [1].

## 4. Caracterização experimental e modelo computacional do sistema em estudo

Este capítulo começa por apresentar as principais características do transformador laboratorial utilizado neste trabalho, sendo também identificado o equipamento complementar usado. De seguida descreve-se o modelo computacional do transformador, baseado na técnica de elementos finitos. Apresentam-se depois os resultados experimentais e de simulação obtidos nos ensaios clássicos do transformador: ensaio em vazio, ensaio em curto-circuito e ensaio homopolar. Através da análise dos resultados destes ensaios são calculados os parâmetros do circuito equivalente do transformador (Figura 3). Finalmente, explica-se o procedimento para dimensionar a localização e configuração das bobinas de teste utilizadas para a medição do fluxo na cuba.

### 4.1. Caracterização do transformador

Neste trabalho foi utilizado um transformador seco trifásico de 10.3 kVA com núcleo de 3 colunas e enrolamentos concêntricos, Figura 11. O transformador foi colocado no interior de uma cuba metálica, desmontável, propositadamente desenvolvida para o efeito, para aproximar as condições de funcionamento da máquina, e da sua distribuição de fluxos, às condições dos transformadores com isolamento a óleo, de maior potência, normalmente presentes nas subestações, Figura 12.

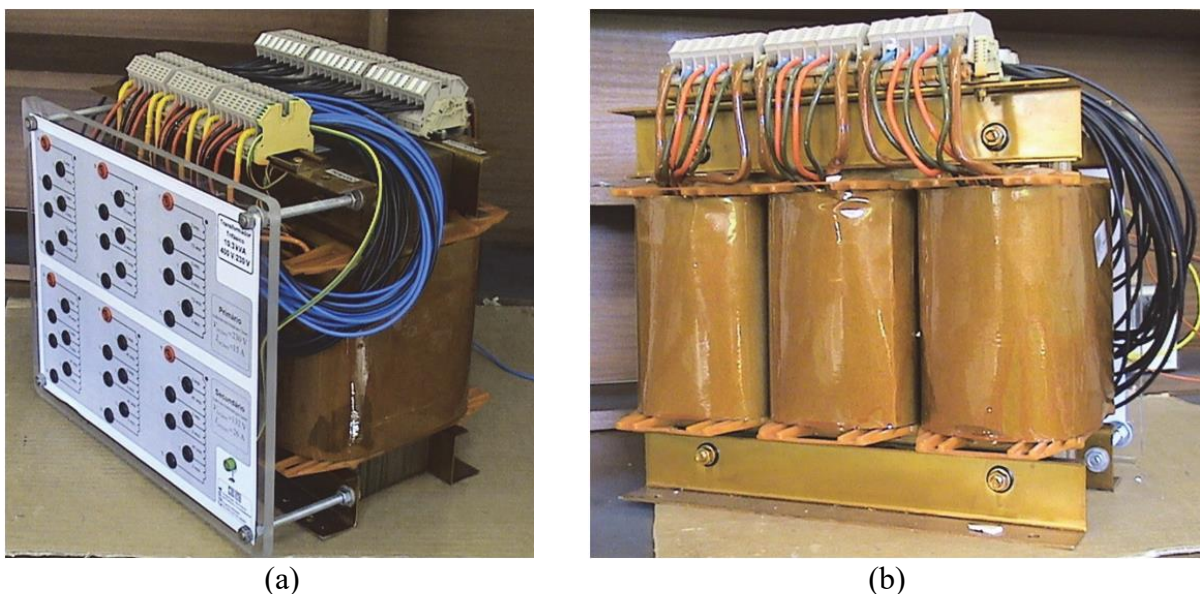


Figura 11 – Transformador em estudo: (a) vista frontal; (b) vista posterior [6].



(a) (b)  
Figura 12 – Transformador: (a) cuba aberta; (b) cuba fechada.

As principais características do transformador são as seguintes:

- Potência nominal: 10.3 kVA
- Frequência: 50 Hz
- Tensão no enrolamento de maior tensão: 230 V
- Tensão no enrolamento de menor tensão: 132 V
- Número de espiras do enrolamento maior tensão: 152 espiras
- Número de espiras do enrolamento menor tensão: 90 espiras

As dimensões do circuito magnético são apresentadas na Figura 13(a) e a designação dos terminais dos enrolamentos é mostrada na Figura 13(b).

O enrolamento primário é composto por fio de cobre de secção circular com diâmetro de 3,15 mm, disposto em três camadas (Figura 14 (b)). Já o enrolamento secundário é constituído por dois condutores de fio de cobre, bobinados simultaneamente em quatro camadas (Figura 14(b)), com secção circular e diâmetro de 3 mm. Para possibilitar a investigação de defeitos de isolamento entre espiras, cada enrolamento possui cinco tomadas intermediárias, conforme ilustrado na Figura 14(a). Isso permite a introdução de espiras em curto-circuito em diferentes posições ao longo dos enrolamentos [6]. As Figuras 14(a) e 14(b) ilustram as camadas e identificam os terminais e número de espiras dos vários segmentos dos enrolamentos primário e secundário de uma fase.

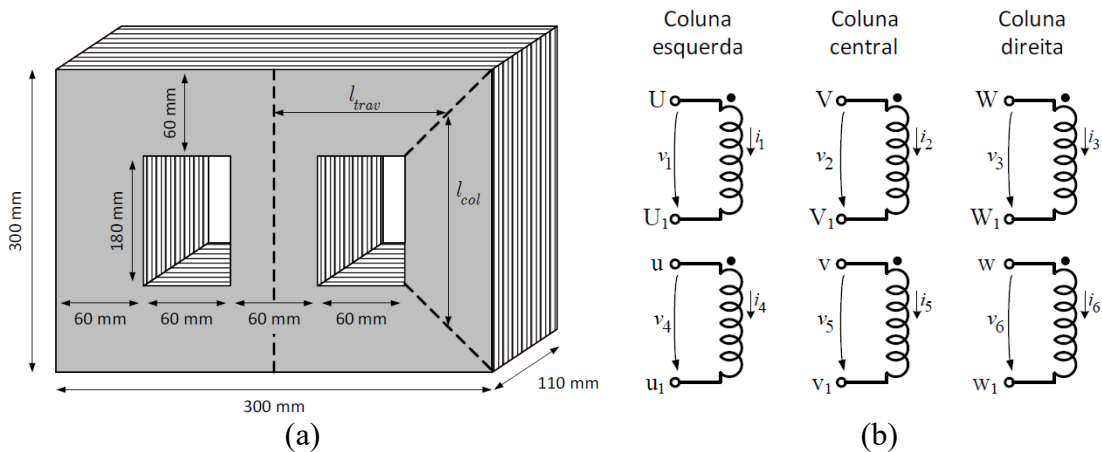


Figura 13 – (a) Dimensões do circuito magnético; (b) designação dos terminais dos enrolamentos [6].

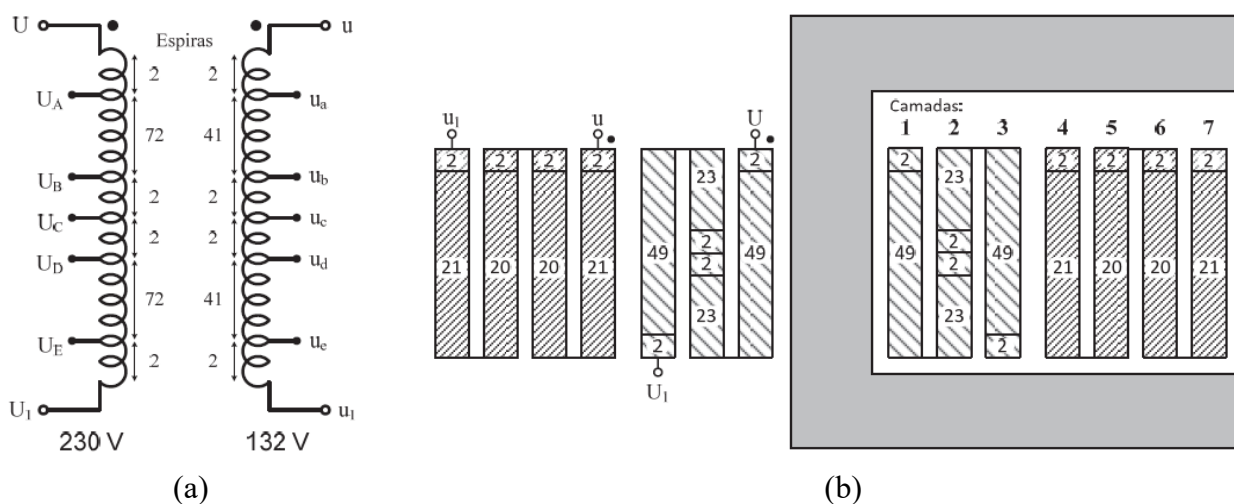


Figura 14 – Características dos enrolamentos de 230 V e 132 V (fase U): (a) tomadas; (b) camadas e disposição [6].

O material e as dimensões dos enrolamentos e da cuba são apresentados de seguida:

- Enrolamento de 230 V
  - Altura: 168 mm;
  - Comprimento: 124.5 mm;
  - Largura: 190 mm
  - Material: Cobre.
- Enrolamento de 132 V
  - Altura: 168 mm;
  - Comprimento: 97.5 mm;
  - Largura: 155 mm
  - Material: Cobre.
- Cuba
  - Altura: 440 mm;
  - Comprimento: 430 mm;

- Largura: 350 mm;
- Espessura: 2.5 mm;
- Material: Ferro.

#### 4.1.1. Equipamento complementar

Esta secção fornece um resumo sobre os equipamentos complementares utilizados nos ensaios laboratoriais realizados. A Figura 15 ilustra o aspeto da bancada durante os ensaios.

##### iii) Banco de resistências

Nos ensaios realizados foi utilizada uma carga resistiva trifásica variável por escalões, Figura 16(a). O banco de resistências possui uma potência nominal de 33 kW, 220-380 V, Figura 16(b).

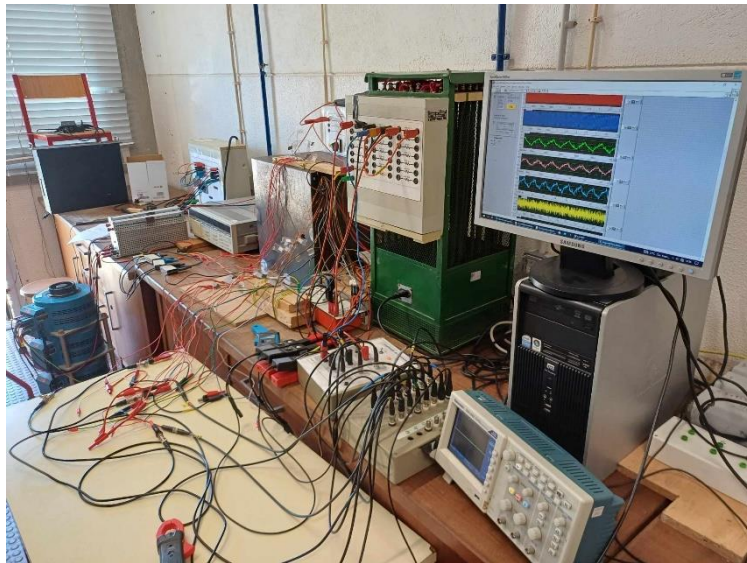
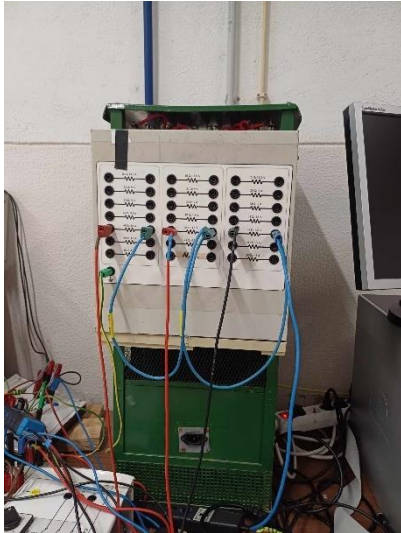


Figura 15 – Bancada e equipamento.



(a)



(b)

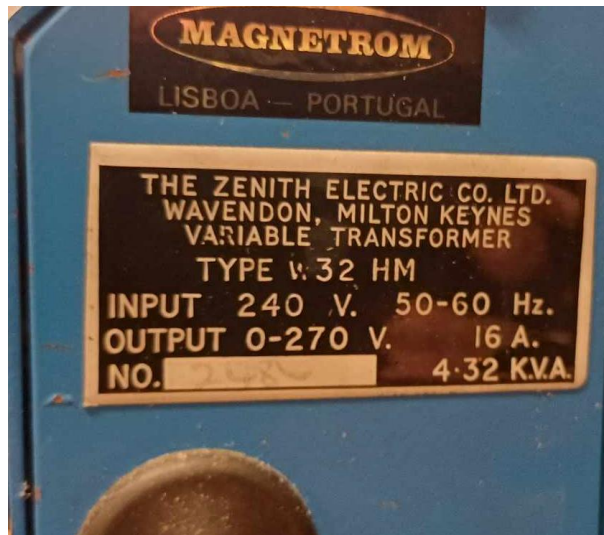
Figura 16 – (a) Banco de resistências; (b) chapa de características do banco de resistências.

#### iv) Autotransformador variável

Para ajustar a tensão de alimentação às condições de cada ensaio foi utilizado um autotransformador trifásico variável de 4.32 kVA, 0-270 V, Figura 17.



(a)



(b)

Figura 17 – (a) Autotransformador; (b) chapa de características do autotransformador.

## v) Equipamento de medida

Foram utilizados diversos equipamentos de medida para realizar os ensaios, os quais se identificam de seguida:

- Wattímetro YOKOGAWA WT1030, Figura 18. Foi utilizado para medir os valores de tensão, corrente e potências.
- Sondas de corrente para aquisição dos respetivos sinais: sonda E27 da Chauvin Arnoux, sonda A622 da Tektronix e sonda CC-65 da Hantek, Figura 19.
- Amplificador de isolamento: efetua o isolamento e atenuação dos sinais de tensão, funções necessárias para realizar a aquisição digital dos sinais, Figura 20.
- Equipamento auxiliar, como multímetros, pinças amperimétricas e osciloscópios.
- Placa de aquisição PCI-6070E da National Instruments, que permitiu adquirir os diversos sinais analógicos de tensão e corrente. O interface com o utilizador foi efetuado utilizando uma aplicação em ambiente Labview.

No Anexo I são apresentados os detalhes dos equipamentos mencionados anteriormente.

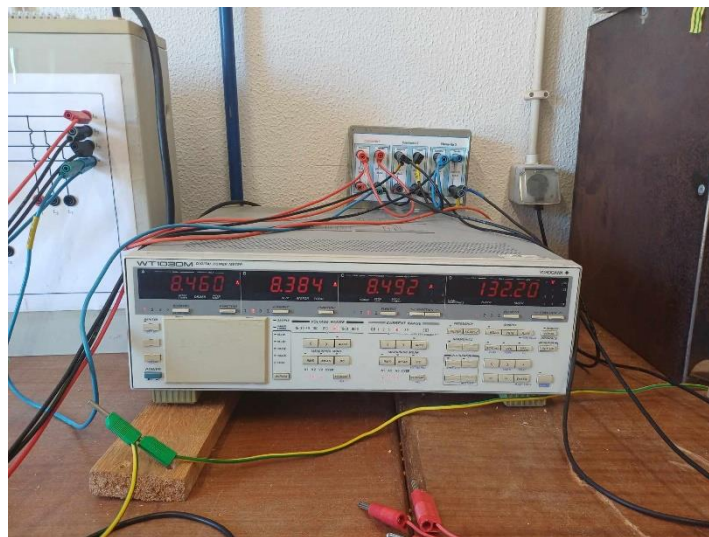


Figura 18 – Wattímetro.



Figura 19 – Sondas de corrente.



Figura 20 – Amplificador de isolamento.

## 4.2. Modelo computacional do transformador utilizando o método dos elementos finitos

O estudo do comportamento do transformador, quer em condições de funcionamento normal, quer na presença de defeitos, requer uma ferramenta computacional que permita analisar estes fenómenos de forma versátil e rigorosa, por forma a conseguir identificar as respetivas relações causa-efeito da avaria.

O método dos elementos finitos é um método numérico utilizado para resolução de problemas definidos por equações diferenciais parciais ou ordinária [13]. O método constitui atualmente uma das mais importantes ferramentas utilizadas para analisar os fenómenos eletromagnéticos em estruturas complexas e compostas por diferentes materiais, permitindo obter uma solução aproximada de elevada precisão. O princípio do método FEM consiste subdivisão da geometria do sistema em análise em elementos menores, definidos como elementos finitos, cada um descrito por um sistema de equações algébricas, cuja resolução é normalmente muito mais rápida e simples do que a resolução das equações diferenciais originais.

A aplicação do método de elementos finitos ao caso do transformador trifásico (Figura 8) resulta no modelo tridimensional (3D) representado na Figura 21(a), onde se visualiza a malha de elementos finitos, Figura 21(b) [14].

A ferramenta computacional utilizada permitiu a criação de um modelo tridimensional do transformador utilizado nos ensaios laboratoriais, possibilitando uma análise detalhada para uma larga variedade de condições de funcionamento. Para modelar o material ferromagnético utilizou-se o aço 1008, tendo a sua curva de magnetização sido ajustada para coincidir com a curva determinada experimentalmente [6]. As ligações dos enrolamentos e as características da fonte de alimentação e da carga foram definidas por meio de um circuito externo.

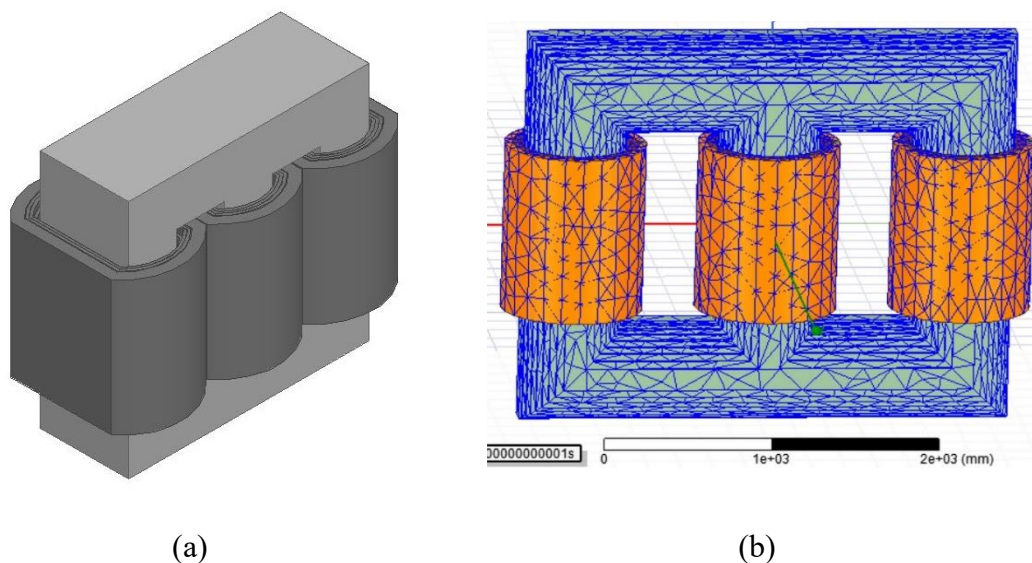


Figura 21 – (a) Modelo Transformador Trifásico; (b) malha dos elementos finitos [14].

### 4.3. Caracterização do funcionamento do transformador

Nesta secção apresentam-se os ensaios clássicos do transformador: ensaio em vazio, ensaio em curto-circuito e ensaio homopolar. Os resultados experimentais e de simulação obtidos permitem caracterizar o funcionamento do transformador, obter os parâmetros do circuito equivalente e avaliar as potencialidades e limitações do modelo computacional utilizado.

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foram registados através da placa de aquisição, a operar com a aplicação em ambiente LabVIEW. Na aquisição utilizou-se uma frequência de amostragem de 5 kHz. Os sinais foram posteriormente tratados em MATLAB, sendo aplicado um filtro passa-baixo para remoção do ruído com frequência de corte entre 500 Hz e 5 kHz, dependendo do nível de ruído.

O tipo de ligação dos enrolamentos afeta a distribuição de fluxo homopolar do transformador, principalmente em regimes assimétricos. O transformador foi ensaiado para as ligações dos enrolamentos  $Yy0$ ,  $Yyn0$  e  $Dyn11$ , de forma a caracterizar a distribuição de fluxo homopolar para várias condições de funcionamento. Nas ligações  $Yy0$  e  $Yyn0$  os enrolamentos primários e secundários do transformador estão conectados em estrela (ou Y), significando que não há deslocamento de fase entre eles (0 graus). A letra “n” representa a presença de neutro no lado secundário. A configuração  $Dyn11$  refere-se a um tipo de ligação de transformador onde o enrolamento primário está

conectado em delta (D) e o enrolamento secundário está conectado em estrela (Y), com um deslocamento de fase de 30 graus (11 horas) entre as tensões primária e secundária. Esta configuração é bastante utilizada em sistemas de transmissão e distribuição para ajustar níveis de tensão, equilibrar cargas e fornecer uma referência de neutro no lado secundário. A Figura 22 mostra a correspondência entre os tipos de ligações dos enrolamentos e os índices horários.

**TABLA INDICES HORARIOS DE LOS TRANSFORMADORES**

Indice	Denominación	Diagrama		Conexiones		Relación de Tensiones Compuestas Uprimario/Usecundario
		Primario	Secundario	Primario	Secundario	
<b>0</b> <b>0º</b>	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$
<b>5</b> <b>150º</b>	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$
<b>6</b> <b>180º</b>	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$
	Yy6					$\frac{N_A}{N_B}$
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_A}$
<b>11</b> <b>330º</b> <b>(-30º)</b>	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$

Figura 22 – Índices horários [15].

### 4.3.1. Ensaio em vazio - Ligação Yyn0

Realizou-se um ensaio em vazio com a ligação Yyn0 (Figura 23), sendo os enrolamentos do lado primário alimentados com a tensão nominal (simétrica). Neste ensaio o transformador não possuía ainda cuba. Na Figura 24 apresentam-se os sinais obtidos nos ensaios experimentais e na respectiva simulação computacional. Na Tabela 1 apresenta-se o correspondente valor eficaz desses sinais.

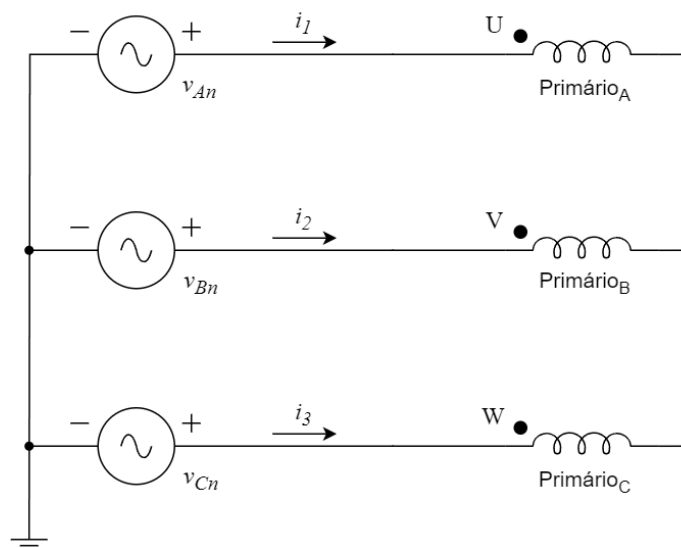


Figura 23 – Esquema da ligação Yy0 em vazio.

Tabela 1 – Valor eficaz da tensão e corrente nos enrolamentos obtidos para ligação Yy0 em vazio.

Resultados	$V_{An}$ (V)	$V_{Bn}$ (V)	$V_{Cn}$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)
Experimental	229.6	230.3	233.4	0.27	0.19	0.26
Simulação	230	230	230	0.15	0.12	0.16
Erro (%)	0.17	-0.13	-1.5	-44.4	-36.8	-38.5

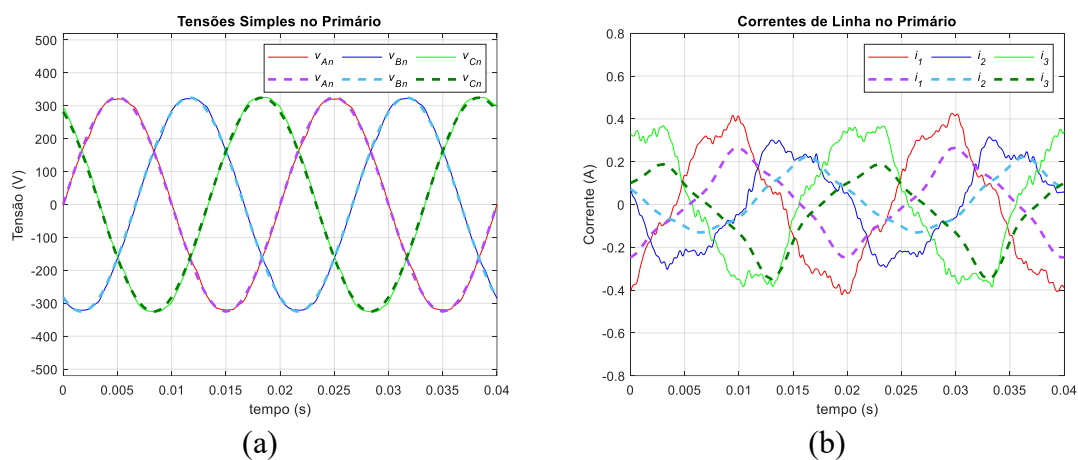


Figura 24 – Resultados obtidos para a ligação Yy0, condição em vazio. Ensaio experimental: linha contínua; Simulação: linha a tracejado. Forma de onda de: (a) tensões simples no primário; (b) correntes de linha no primário.

As correntes de alimentação do transformador possuem um valor relativamente reduzido e apresentam formas de onda complexas, bastante distorcidas em relação a uma senoide. Esta distorção deve-se, principalmente, às características não lineares do núcleo.

As correntes de excitação obtidas na simulação computacional exibem alguma discrepância com os resultados experimentais, Figura 24(b). Existem vários fatores que podem justificar estas diferenças, nomeadamente:

- Na simulação não foi atingido o regime permanente. O transitório de ligação do transformador tem um amortecimento muito lento devido ao valor elevado da constante de tempo do circuito. Mesmo após 5 segundos de simulação as correntes de excitação não atingiram o regime permanente, como ilustrado na Figura 25. Refira-se que, para atingir um tempo de simulação de 5 segundos, é necessário um tempo de processamento de cerca de uma semana.
- O núcleo foi considerado maciço na simulação, mas na realidade é laminado. Na prática, o empilhamento imperfeito das chapas e a presença do verniz de isolamento diminui a seção efetiva do ferro, resultando numa maior relutância do circuito magnético, expressa por (4.1), o que se traduz numa menor indutância de magnetização, expressa por (4.2), e, conseqüentemente, numa maior corrente de excitação. As correntes de excitação obtidas experimentalmente possuem valores superiores aos valores obtidos através da simulação, o que é coerente com este raciocínio.

$$\uparrow \mathcal{R}_m = \frac{l}{\mu S_e} \downarrow \quad (4.1)$$

$$\downarrow L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_m} \uparrow \quad (4.2)$$

- Na modelação do núcleo não foram tidos em consideração vários detalhes do circuito magnético, como os entreferros entre as lâminas, os orifícios nas lâminas para suporte da estrutura, os próprios parafusos de suporte e outras imperfeições construtivas.

- O material ferromagnético utilizado para definir as propriedades do núcleo foi adaptado da biblioteca do software FEM, mas as suas características podem ser ligeiramente diferentes do material utilizado na prática (desconhecido);
- A tensão de alimentação não é perfeitamente sinusoidal, possuindo componentes harmónicas, que podem afetar de forma significativa a forma de onda das correntes de excitação. Na simulação a tensão de alimentação foi considerada uma onda sinusoidal pura.
- O sistema trifásico da tensão de alimentação apresenta algum desequilíbrio, o que foi desprezado na simulação.

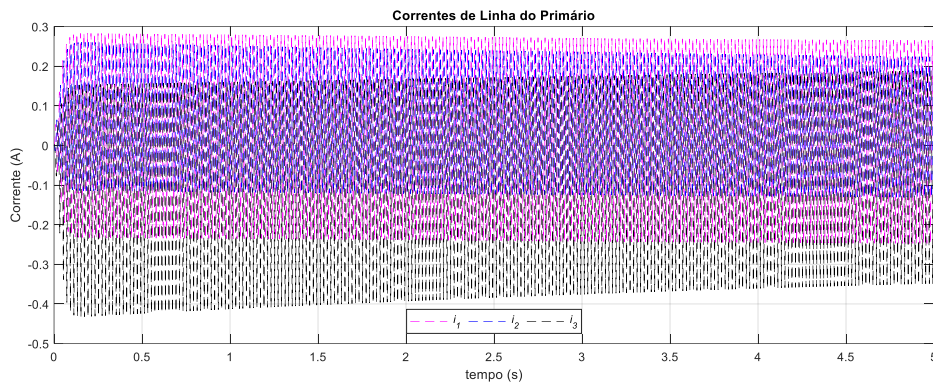


Figura 25 – Transitório das correntes nos enrolamentos primários para o ensaio em vazio.

A partir do ensaio em vazio é possível determinar os parâmetros do circuito equivalente (ver Figura 3 para definição dos parâmetros e grandezas). A resistência de perdas no ferro calcula-se da seguinte forma:

$$R_{fe} = \frac{V_0^2}{P_0} \quad (4.3)$$

onde, por simplicidade, se aproximou  $V_0$  à tensão de alimentação  $V_{An}$ . A corrente na resistência de perdas no ferro vem expressa por:

$$I_{fe} = \frac{V_0}{R_{fe}} \quad (4.4)$$

A corrente na reactância de magnetização pode então calcular-se como:

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_{fe}^2} \quad (4.5)$$

onde  $I_0$  representa a corrente de vazio. Para  $I_0$  assumiu-se a média das correntes em vazio para cada fase.

A reactância de magnetização vem finalmente:

$$X_m = \frac{V_0}{I_m} \quad (4.6)$$

Os parâmetros relativos ao ramo de magnetização resultam assim:

$$R_{fe} = 1997 \, \Omega$$

$$X_m = 1080 \, \Omega$$

### 4.3.2. Ensaio em curto-circuito - Ligação Yy0

Foi realizado um ensaio em curto-circuito com a ligação Yy0 (Figura 26). A tensão de alimentação foi ajustada de forma que a corrente no primário não ultrapassasse o correspondente valor nominal. Este ensaio foi feito sem cuba.

Na Figura 27 apresentam-se os sinais obtidos nos ensaios experimentais e de simulação computacional. Na Tabela 2 apresenta-se o valor eficaz dos sinais ilustrados na Figura 27.

A tensão de alimentação no ensaio em curto-circuito possui valores relativamente reduzidos, apresentando algum ruído na medição laboratorial, Figura 27(a). No ensaio experimental a tensão de alimentação apresenta também algum desequilíbrio.

As correntes de alimentação apresentam valores muito idênticos na simulação e nos resultados experimentais, Figura 27(b).

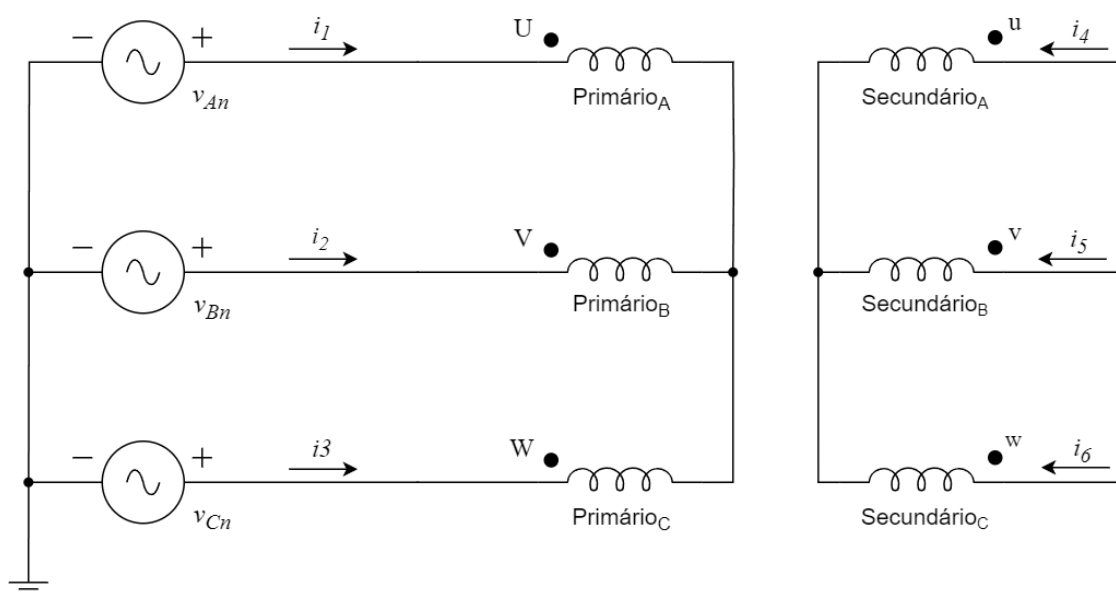


Figura 26 – Esquema da ligação Yy0 em curto-circuito.

Tabela 2 – Valor eficaz da tensão e corrente nos enrolamentos obtidos para ligação Yy0 em curto-circuito.

Resultados	$V_{An}$ (V)	$V_{Bn}$ (V)	$V_{Cn}$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)
<b>Experimental</b>	4.4	4.4	4.9	8.4	8.4	8.6
<b>Simulação</b>	4.4	4.4	4.4	8.5	8.5	8.6
<b>Erro (%)</b>	--	--	-10.2	1.2	1.2	--

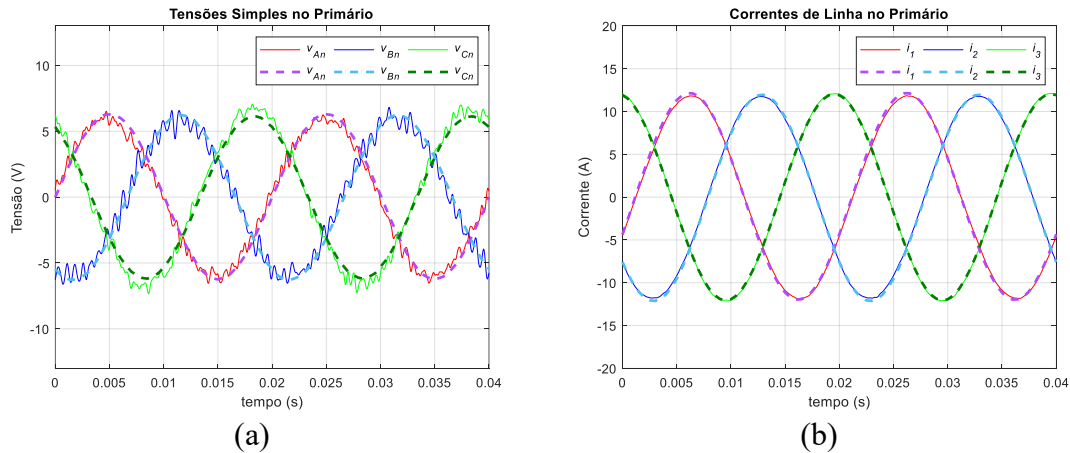


Figura 27 – Resultados obtidos para a ligação Yy0, condição curto-circuito. Ensaio experimental: linha contínua; Simulação: linha a tracejado. Forma de onda de: (a) tensões simples no primário; (b) correntes de linha no primário.

O ensaio em curto-circuito permite determinar os seguintes parâmetros do circuito equivalente (grandezas segundo a Figura 3):

$$R_{eq} = R_1 + R'_2 \quad (4.7)$$

$$X_{eq} = X_{L1} + X'_{L2} \quad (4.8)$$

Nos cálculos despreza-se por simplicidade o ramo de magnetização. A resistência série equivalente vem expressa por:

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (4.9)$$

e a impedância série resulta:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (4.10)$$

onde  $V_{cc}$  é igual a  $V_{An}$ . A reactância série equivalente calcula-se de seguida:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (4.11)$$

A potência  $P_{cc}$ , por fase, foi medida durante a realização do ensaio experimental, sendo igual a 34 W. Os parâmetros do circuito série equivalente (média das três fases) resultam então:

$$R_{eq} = 0.48 \, \Omega$$

$$Z_{eq} = 0.53 \, \Omega$$

$$X_{eq} = 0.21 \, \Omega$$

A divisão da resistência e reactância equivalente pelos enrolamentos primário e secundário pode ser aproximada a:

$$X_{L1} = X'_{L2} = \frac{X_{eq}}{2} = 0.105 \Omega$$

$$X_{L2} = 0.036 \Omega$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{eq}}{2} = 0.24 \Omega$$

$$R_2 = 0.085 \Omega$$

### 4.3.3. Ensaio homopolar em vazio – Caracterização do fluxo homopolar

A impedância homopolar de transformadores é um parâmetro importante na análise de redes de energia elétrica, pois influencia de forma significativa o comportamento do transformador na presença de defeitos fase-terra e afeta a configuração e parametrização dos relés de proteção.

As características do circuito equivalente de sequência homopolar variam em função das ligações dos enrolamentos e do tipo de núcleo [16]. Dependendo dos casos, a impedância homopolar é determinada realizando o ensaio homopolar em vazio e/ou em curto-circuito [17].

Além do cálculo da impedância, o ensaio homopolar em vazio permite também analisar e caracterizar a distribuição de fluxos no exterior do circuito magnético, que se fecha pela cuba e pelo ar. O ensaio consiste em alimentar, através de uma fonte monofásica ( $v_{in}$ ), os enrolamentos do primário ligados em série<sup>1</sup>, com os enrolamentos do secundário em circuito aberto ( $v_{out}$ ), conforme esquematizado na Figura 28. Com este ensaio geram-se forças magnetomotrizes iguais nas três colunas, as quais produzem fluxos magnéticos com amplitude e fase idênticas (despreza-se aqui a assimetria natural do circuito magnético de 3 colunas). Este fluxo fecha-se pelo exterior do núcleo, constituindo o fluxo homopolar. Neste ensaio o transformador encontrava-se no interior da cuba.

As formas de onda de tensão e corrente obtidas do ensaio homopolar são apresentadas na Figura 29. A corrente em vazio no ensaio homopolar em vazio toma um valor muito superior à corrente de excitação, pois as linhas de fluxo homopolar fecham-se parcialmente pelo exterior do núcleo, pelo ar e pela cuba (percurso de maior relutância, logo de menor reactância).

A corrente alimentação obtida na simulação computacional tem uma amplitude superior ao valor ao obtido no ensaio experimental (erro de aproximadamente 22%, Tabela 3). Esta discrepância poderá resultar da presença de peças metálicas na

---

<sup>1</sup> No ensaio homopolar os enrolamentos do lado primário podem ser alimentados em paralelo ou série: se ligados em paralelo impõe-se fluxos iguais nas três colunas e as correspondentes forças magnetomotrizes têm de se adaptar ao circuito magnético (ou seja, obtêm-se correntes diferentes nos enrolamentos); se os enrolamentos são ligados em série a força magnetomotriz é igual nas três colunas e o fluxo resultante adapta-se ao circuito magnético (e à sua assimetria intrínseca). Optou-se por seleccionar este último caso, pois representa melhor a distribuição de fluxo homopolar no transformador.

proximidade do núcleo (estrutura e parafusos de suporte), que fornecem um percurso para as linhas de fluxo com menor relutância, comparativamente com um trajeto apenas pelo ar. Estas peças metálicas não foram incluídas no modelo computacional, resultando então numa maior relutância e, conseqüentemente, menor reactância. Outros fatores poderão ter contribuído para a discrepância entre os valores experimentais e simulados, como as diferenças nas propriedades do material ferromagnético do núcleo e da cuba, cujas características não-lineares são complexas e difíceis de modelar, a laminagem do núcleo e outras particularidades e imperfeições construtivas, não consideradas no modelo computacional.

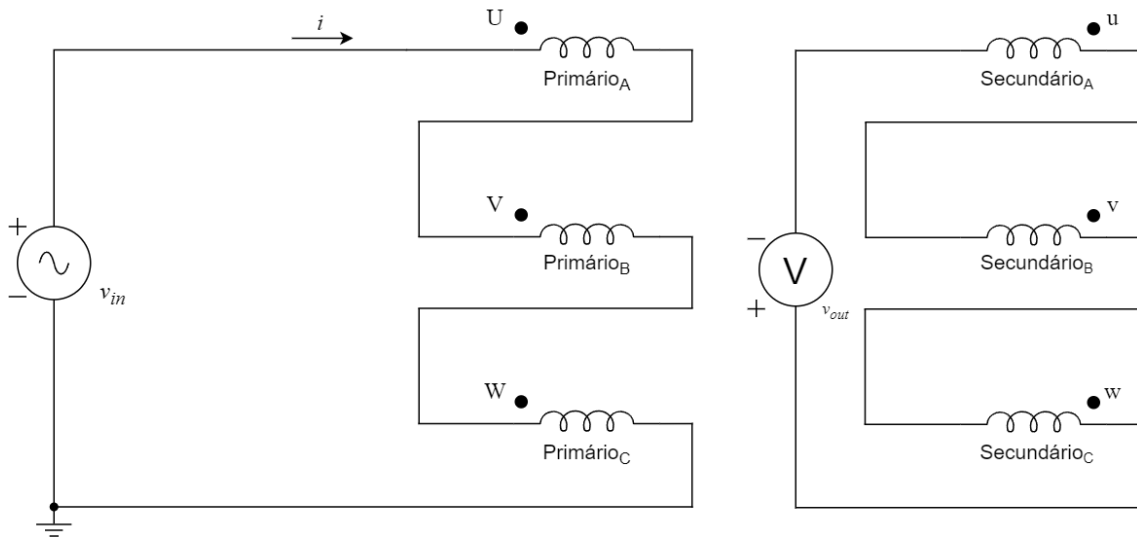


Figura 28 – Esquema da ligação para o ensaio homopolar.

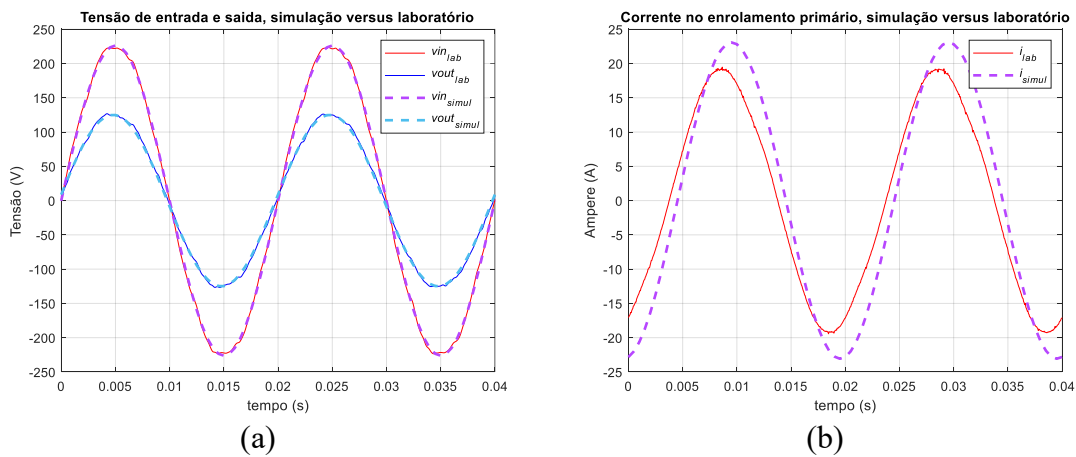


Figura 29 – Resultados obtidos para o ensaio homopolar em vazio. Ensaio experimental: linha contínua; Simulação: linha a tracejado. Forma de onda de: (a) tensões de entrada e saída; (b) correntes de linha no primário.

Tabela 3 – Valor eficaz da tensão e corrente no ensaio homopolar em vazio.

<b>Resultados</b>	$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (V)	$I$ (A)
<b>Experimentais</b>	160.1	89.8	13.4
<b>Simulação</b>	160	87.9	16.4
<b>Erro (%)</b>	-0.7	-2.1	22.4

A tensão homopolar induzida nos enrolamentos secundários, também ligados em série, respeita a relação entre o número de espiras, conforme representado na Figura 29.

#### 4.4. Dimensionamento das bobinas de teste

Para investigar qual a melhor localização e configuração das bobinas de teste é necessário avaliar a distribuição de fluxo no transformador em diversas zonas de interesse. Para evitar construir várias bobinas de teste esta análise exploratória foi realizada com o modelo computacional.

##### 4.4.1. Ferramenta de cálculo para determinar o fluxo numa área fechada

As bobinas de teste não foram inicialmente incluídas no modelo para evitar a realização de diversas simulações para diferentes configurações e/ou localização das bobinas. Em alternativa determinou-se o fluxo magnético em áreas fechadas, correspondentes às várias zonas de interesse de localização das bobinas. Conseguiu-se assim mapear a distribuição de fluxo magnético no exterior do núcleo, seleccionar os locais mais adequados para instalar as bobinas de teste e estimar a respetiva tensão induzida. Para o cálculo do fluxo utilizou-se uma ferramenta de cálculo disponível no software FEM, a qual calcula o fluxo encadeado numa área fechada em função da indução magnética: primeiro calcula-se a média da indução magnética ( $B$ ) numa área fechada ( $A_f$ ), conforme indicado em (4.12):

$$B = \frac{\int B dA_f}{\int dA_f} \quad (4.12)$$

Através de (4.13) calcula-se o fluxo encadeado em função da indução magnética:

$$\lambda = N \cdot B \cdot A_f \quad (4.13)$$

onde  $\lambda$  representa o fluxo encadeado na área fechada em análise e  $N$  o número de espiras.

Com este procedimento consegue calcular-se o fluxo magnético nas várias zonas de interesse, sem necessidade de incluir as bobinas de teste nos ensaios experimentais e no

modelo computacional. Caso esta análise exploratória fosse realizada com recurso às bobinas de teste iria resultar um desnecessário aumento da complexidade e tempo de computação. Note-se que esta metodologia serviu apenas para explorar as várias hipóteses de localização e configuração das bobinas de teste; após validação estas foram incluídas no modelo final do transformador.

A título exemplificativo, a Figura 30 compara a evolução do fluxo encadeado com o enrolamento primário do transformador (*Flux Linkage*, resultado fornecido diretamente pelo software FEM) e o fluxo encadeado, que se fecha pela mesma zona, obtido com a ferramenta de cálculo, designado por "*PhiTopCoil*". Os dois resultados são iguais, confirmando-se a validade dos cálculos para determinar o fluxo em qualquer área fechada da geometria do transformador.

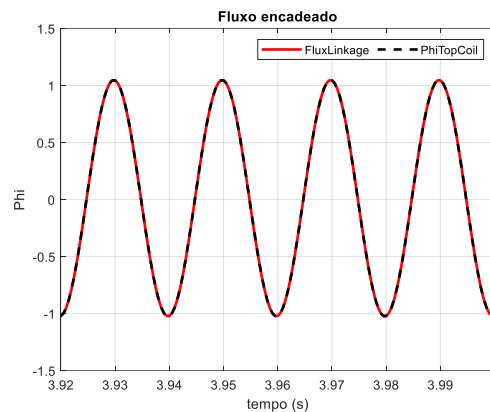


Figura 30 – Fluxo encadeado no enrolamento.

#### 4.4.2. Localização e dimensão das bobinas de teste

Os resultados obtidos com a ferramenta de cálculo do fluxo permitiram identificar algumas zonas onde a medição dos fluxos homopolares através de bobinas de teste poderá ser viável. Para comprovar estes resultados foram inicialmente realizados alguns ensaios exploratórios utilizando apenas uma bobina de teste na zona superior do transformador, no lado interior da cuba, conforme ilustrado na Figura 31(a). A bobina de teste tem uma configuração retangular. A dimensão da bobina (Figura 31(b)) foi projetada de forma a maximizar a captação das linhas de fluxo homopolar, com base na informação obtida com a ferramenta de cálculo referida anteriormente. A bobina de teste é constituída por fio de cobre e possui vinte espiras. A tensão induzida na bobina está relacionada com o fluxo homopolar da seguinte forma:

$$v_{ind} = \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (4.14)$$

onde  $\lambda_0$  é o fluxo homopolar encadeado com a bobina de teste e  $v_{ind}$  a respetiva tensão induzida.

Através do modelo tridimensional (Figura 32) é possível ver a posição da bobina de teste em questão no interior da cuba.

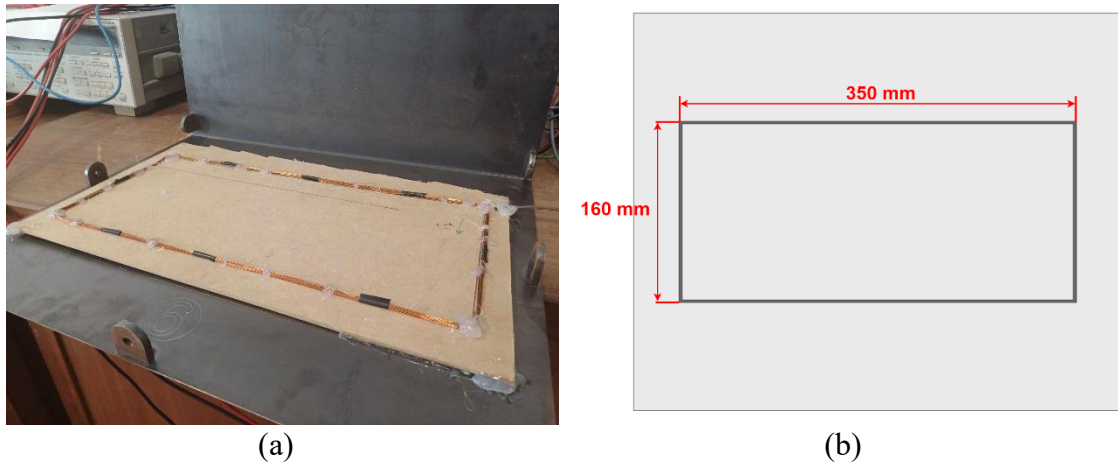


Figura 31 – (a) Bobina de teste no topo da cuba; (b) dimensões da bobina de teste.

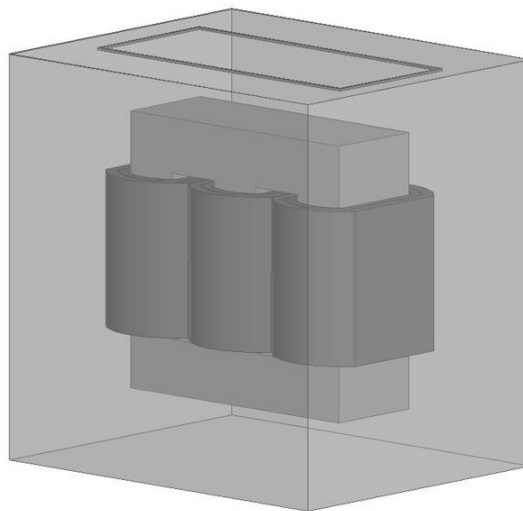


Figura 32 – Bobina de teste no topo da cuba e transformador.

Foram realizados diversos ensaios para analisar o valor da tensão induzida na bobina de teste. Por exemplo, para a ligação Dyn11 foram ensaiadas duas condições de funcionamento:

- Regime equilibrado: neste caso o fluxo homopolar tem valores muito reduzidos, sendo originado em larga percentagem pela assimetria natural do núcleo e pela característica não linear da curva de magnetização dos materiais ferromagnéticos (núcleo e cuba).
- Regime com alimentação assimétrica e carga equilibrada: neste caso o fluxo homopolar tem valores mais elevados, devido à assimetria existente na alimentação do transformador (será apresentada posteriormente uma análise mais detalhada desta condição de funcionamento).

Na Figura 33 apresenta-se a evolução da tensão induzida na bobina de teste para estes dois casos, onde os sinais  $v_{simul_{eq}}$  e  $v_{lab_{eq}}$  representam a tensão induzida na bobina de teste, obtidos na simulação computacional e no ensaio laboratorial, respetivamente. De forma análoga,  $v_{simul_{dq}}$  e  $v_{lab_{dq}}$  representam a tensão induzida no caso desequilibrado.

Como esperado, o fluxo homopolar para o ensaio com regime equilibrado é de valor muito reduzido, o que corresponde a valores baixos da tensão induzida. No ensaio em regime desequilibrado o fluxo homopolar é superior, o que se traduz num maior valor da tensão induzida.

No modelo computacional existem vários fatores que foram desprezados, ou cuja representação foi simplificada, os quais podem influenciar os resultados de simulação, como por exemplo:

- características magnéticas e imperfeições do núcleo;
- assimetrias construtivas do transformador;
- distorção harmónica e desequilíbrio da tensão de alimentação;
- os cabos de ligação entre o exterior e interior da cuba (visíveis na Figura 12) e a cablagem no interior da cuba (ligações entre os terminais dos enrolamentos e o painel/alvéolos do transformador, visíveis na Figura 11), que podem afetar e/ou introduzir ruído nalguns sinais, particularmente quando as correntes são mais elevadas

Tendo em consideração estes vários fatores pode considerar-se que os resultados de simulação estão em boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

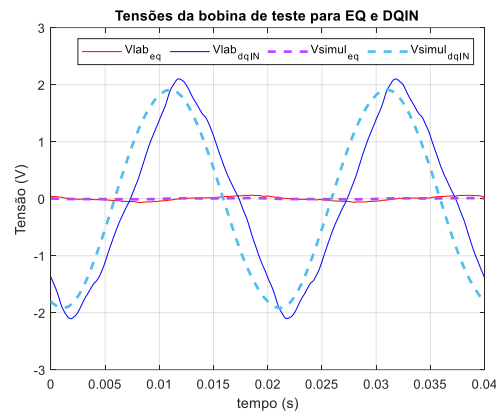


Figura 33 – Tensão aos terminais da bobina de teste.

Com base nas conclusões retiradas sobre a distribuição dos fluxos e dos ensaios referidos anteriormente optou-se por considerar um total de dezoito bobinas de teste, o que permite uma caracterização bastante rigorosa do fluxo homopolar e das suas relações causa-efeito com as diversas condições de funcionamento do transformador. As bobinas de teste consideradas foram as seguintes (colocadas nas faces interiores da cuba), Figura 34:

- Faces laterais (a vermelho): duas bobinas no lado esquerdo (topo e base, E1 e E2, respetivamente) e duas no lado direito (topo e base, D1 e D2, respetivamente);
- Face frontal (a amarelo): duas bobinas na frontal-esquerda (FE1 e FE2), duas bobinas na frontal-centro (FC1 e FC2) e duas bobinas na frontal-direita (FD1 e FD2);
- Face traseira (a verde): semelhante à superfície frontal, com seis bobinas distribuídas na traseira da cuba, designadas por TE1, TE2, TC1, TC2, TD1 e TD2;
- Faces superior e inferior (a azul ciano): uma bobina a abranger a totalidade da área de cada uma das superfícies (designadas por Topo e Base). A bobina de teste inferior não foi colocada no ensaio experimental, devido à dificuldade de instalação (peso do transformador) e à necessidade de realizar frequentes montagens e desmontagens para alterar condições de funcionamento. No entanto, foi incluída no modelo computacional.

Todas as bobinas de teste foram bobinadas no mesmo sentido, possuindo 20 espiras. Para bobinar as bobinas de teste recorreu-se a uma bobina de fio de cobre com 0,4 mm

de diâmetro. A Figura 35 mostra a bobina de fio de cobre e a disposição das bobinas traseiras. A Figura 36 mostra uma vista superior onde é possível ver a cuba (aberta), o transformador e a localização das bobinas de teste.

As bobinas de teste frontais e traseiras possuem as mesmas dimensões, tendo 14 cm de comprimento e 22 cm de altura. As bobinas de teste laterais têm 34 cm de largura e 22 cm de altura. A bobina de topo tem 40 cm de comprimento e 34 cm de largura.

As tensões induzidas nas bobinas de teste são definidas no esquema da Figura 37.

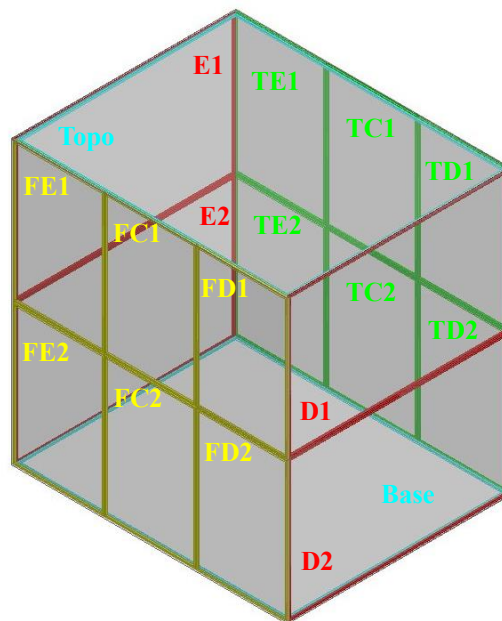


Figura 34 – Localização das bobinas de teste no interior da cuba.

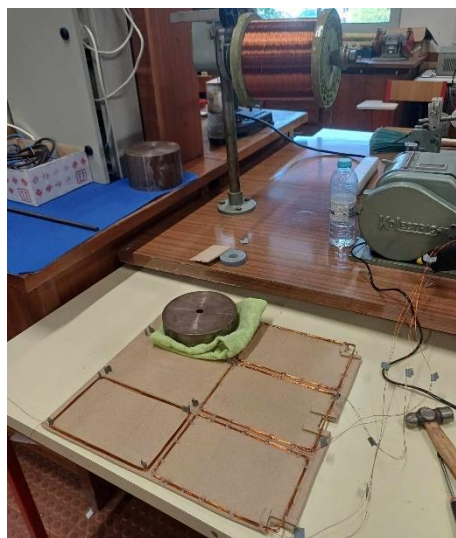


Figura 35 – Bobinagem das bobinas de teste.

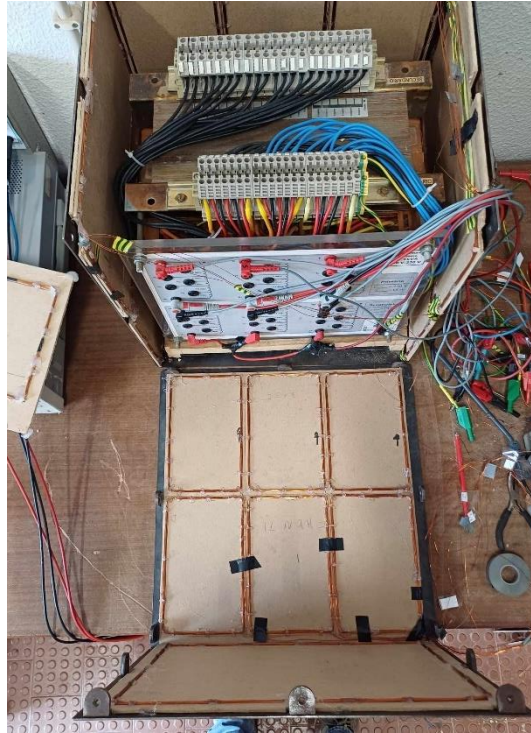


Figura 36 – Vista superior do transformador, com a cuba aberta, e disposição das bobinas de teste.

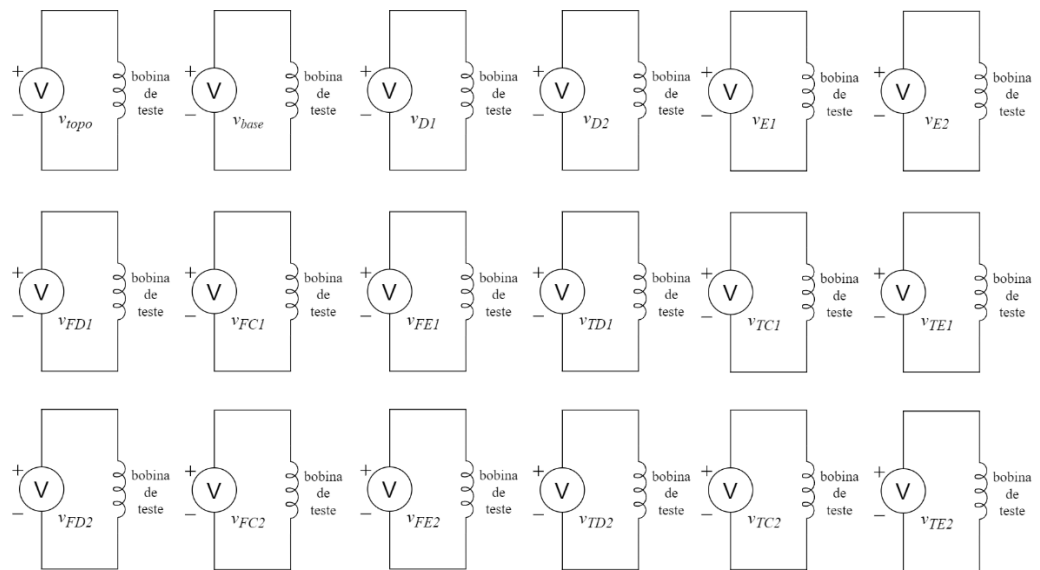


Figura 37 – Identificação das tensões induzidas nas bobinas de teste.

### 4.4.3. Resultados das tensões induzidas nas bobinas de teste para o ensaio homopolar

No ensaio homopolar o fluxo fecha-se em grande parte pela cuba. Considere-se, por simplicidade, os sentidos dos fluxos homopolares definidos na Figura 8. Pode então dizer-se que as linhas de fluxo saem pela zona do topo do núcleo e fecham-se pela zona da base. Assim, as tensões induzidas nas bobinas de teste superiores e inferiores vão ter polaridades invertidas, pois os fluxos têm sentidos opostos no topo e na base. A análise dos resultados obtidos no ensaio experimental e na simulação computacional confirmam este raciocínio, Figura 38 e Figura 39 . As tensões induzidas têm uma amplitude mais elevada nas bobinas de topo e base. Comparativamente com este valor, nas bobinas laterais a amplitude da tensão é de cerca de 50% e nas bobinas frontais e traseiras cerca de 10%. A Tabela 4 apresenta os valores eficazes das respetivas tensões induzidas nas bobinas de teste.

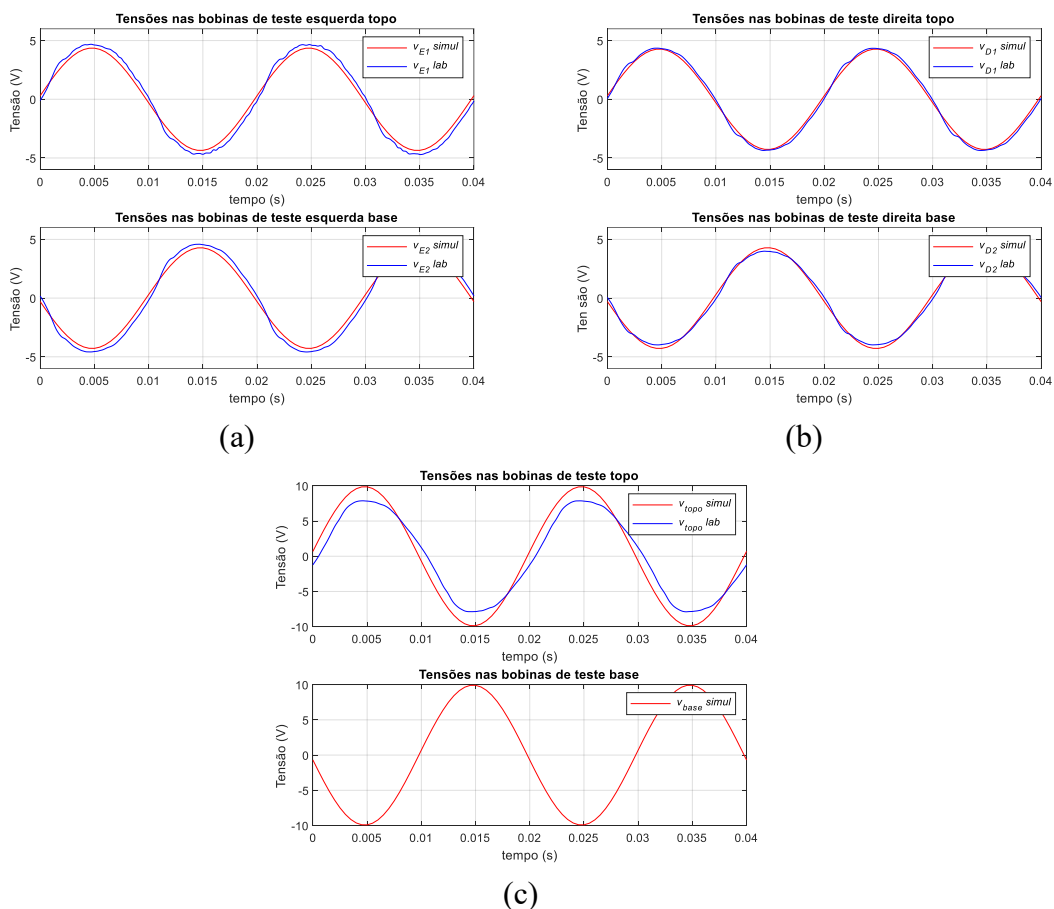
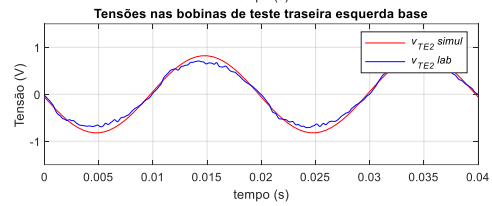
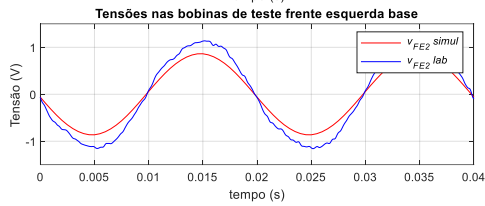
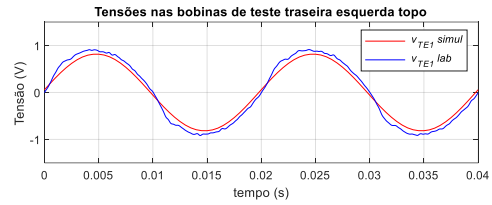
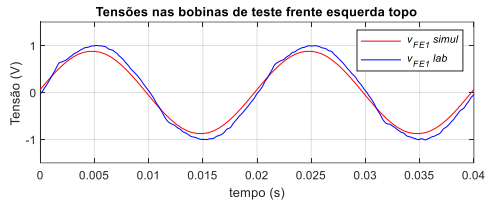
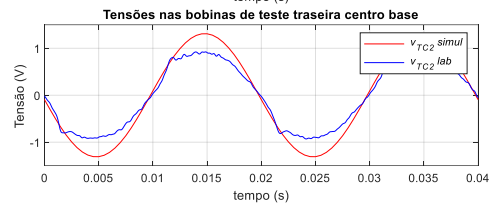
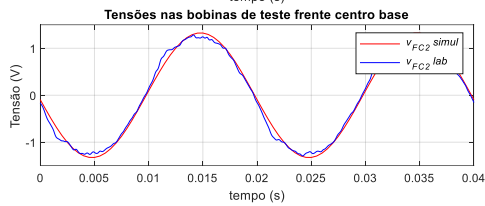
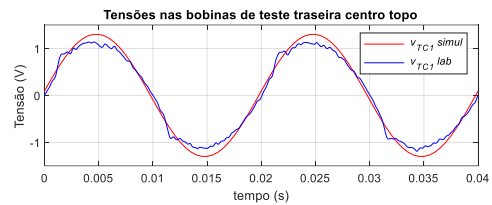
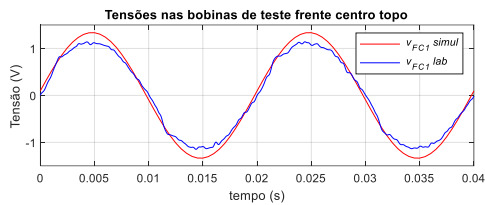


Figura 38 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio homopolar: (a) lateral esquerda; (b) lateral direita; (c) topo e base.



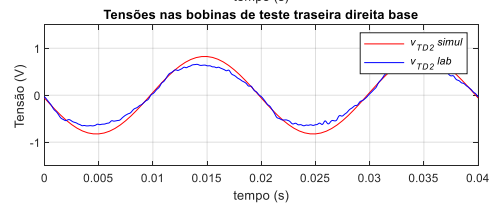
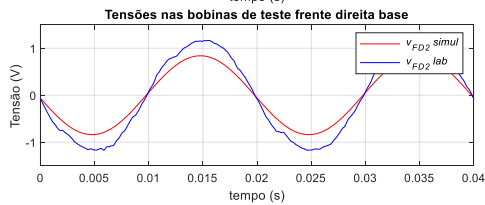
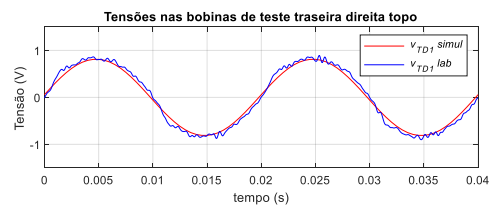
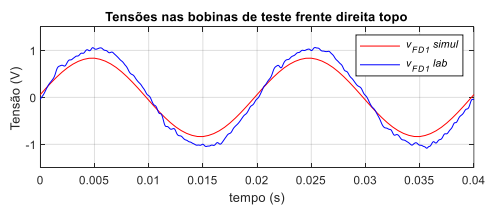
(a)

(d)



(b)

(e)



(c)

(f)

Figura 39 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio homopolar. (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita.

O fluxo homopolar fecha-se através da cuba e do ar, existindo uma parcela que não abraça as bobinas de teste. Os resultados obtidos neste ensaio permitem também distinguir estas parcelas, ou seja, o fluxo que se fecha pela cuba e o fluxo que se fecha pelo ar em redor do núcleo. Utilizando a distribuição de fluxos da Figura 8, o fluxo homopolar total pode ser expresso como:

$$\phi_0 = \phi_{01} + \phi_{02} + \phi_{03} \quad (4.15)$$

No ensaio homopolar a tensão induzida na ligação-série dos enrolamentos secundários é igual a

$$v_{out} = v_{01} + v_{02} + v_{03} \quad (4.16)$$

onde, desprezando os fluxos de fugas:

$$v_{01} = N_2 \frac{d\phi_{01}}{dt} \quad (4.17)$$

$$v_{02} = N_2 \frac{d\phi_{02}}{dt} \quad (4.18)$$

$$v_{03} = N_2 \frac{d\phi_{03}}{dt} \quad (4.19)$$

resultando:

$$v_{out} = N_2 \left( \frac{d\phi_{01}}{dt} + \frac{d\phi_{02}}{dt} + \frac{d\phi_{03}}{dt} \right) = N_2 \frac{d\phi_0}{dt} \quad (4.20)$$

O fluxo que se fecha pela cuba pode ser obtido considerando as linhas que se fecham pelas bobinas de teste localizadas quer na metade superior quer, por simetria, na metade inferior:

$$v_{BTsup} = v_{topo} + v_{E1} + v_{D1} + v_{FE1} + v_{FC1} + v_{FD1} + v_{TE1} + v_{TC1} + v_{TD1} \quad (4.21)$$

$$v_{BTinf} = v_{base} + v_{E2} + v_{D2} + v_{FE2} + v_{FC2} + v_{FD2} + v_{TE2} + v_{TC2} + v_{TD2} \quad (4.22)$$

Em condições ideais  $v_{BTsup}$  e  $v_{BTinf}$  serão iguais. O fluxo na cuba,  $\phi_{cuba}$ , vem então:

$$v_{BTsup} = v_{BTinf} = N_{BT} \frac{d\phi_{cuba}}{dt} \quad (4.23)$$

onde  $N_{BT}$  representa o número de espiras das bobinas de teste.

A relação entre o fluxo homopolar e o fluxo na cuba pode obter-se fazendo:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\phi_0}{\phi_{cuba}} \right) = \frac{v_{out}/N_2}{v_{BTsup}/N_{BT}} = \frac{v_{out}/N_2}{v_{BTinf}/N_{BT}}$$

A Figura 40(a) compara os sinais  $v_{out}/N_2$  e  $v_{BTsup}/N_{BT}$  obtidos no ensaio experimental (o sinal de  $v_{base}$  não foi medido, não sendo possível calcular o correspondente  $v_{BTinf}$ ). Verifica-se que  $v_{BTsup}$  possui uma amplitude ligeiramente menor que  $v_{out}$  ( $\approx 15\%$  de amplitude). Esta diferença representa a parcela do fluxo que se fecha pelo ar, não abraçando as bobinas de teste. Desta análise conclui-se que cerca de 85% do fluxo homopolar se fecha pela cuba e, conseqüentemente, as tensões induzidas nas bobinas de teste caracterizam de forma bastante precisa a distribuição das linhas de força no exterior do núcleo. A Figura 40(b) apresenta a evolução temporal dos sinais  $v_{out}/N_2$ ,  $v_{BTinf}/N_{BT}$  e  $v_{BTsup}/N_{BT}$  obtidos na simulação computacional, os quais estão coerentes com os resultados experimentais.

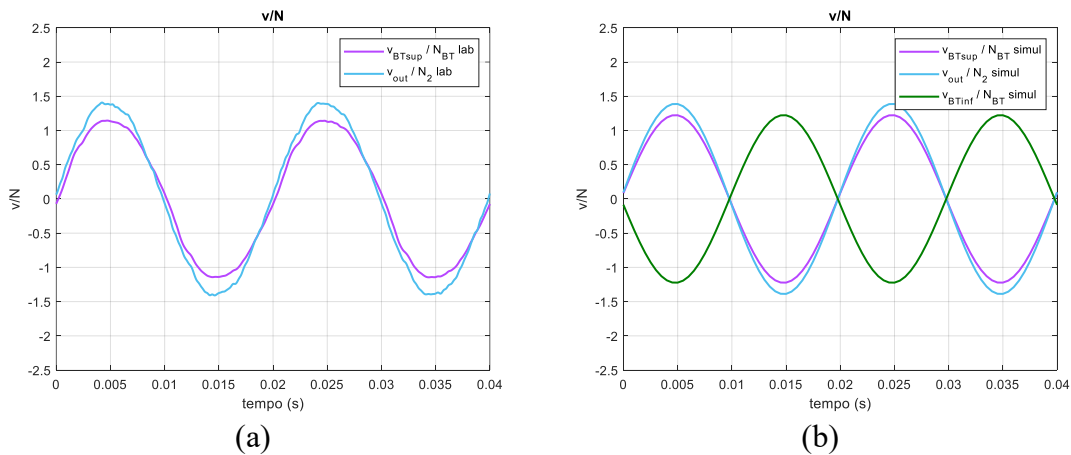


Figura 40 – Comparação entre  $v_{out}/N_2$ ,  $v_{BTsup}/N_{BT}$  e  $v_{BTinf}/N_{BT}$ : (a) experimental; (b) simulação.

Tabela 4 – Valor eficaz das tensões obtidas aos terminais das bobinas de teste no ensaio homopolar.

<b>Bobinas de teste nas laterais, topo e base</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{E1}$ (V)	$V_{E2}$ (V)	$V_{D1}$ (V)	$V_{D2}$ (V)	$V_{topo}$ (V)	$V_{base}$ (V)
<b>Experimental</b>	3.4	3.4	3.2	3.0	5.7	--
<b>Simulação</b>	3.1	3.0	3.0	3.0	6.9	6.9
<b>Erro (%)</b>	-8.8	-11.8	-6.3	--	21.1	--
<b>Bobinas de teste frontais</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{FE1}$ (V)	$V_{FE2}$ (V)	$V_{FC1}$ (V)	$V_{FC2}$ (V)	$V_{FD1}$ (V)	$V_{FD2}$ (V)
<b>Experimental</b>	0.72	0.82	0.83	0.93	0.75	0.84
<b>Simulação</b>	0.62	0.61	0.94	0.93	0.56	0.59
<b>Erro (%)</b>	-13.9	-25.6	13.3	--	-25.3	-29.8
<b>Bobinas de teste na traseira</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{TE1}$ (V)	$V_{TE2}$ (V)	$V_{TC1}$ (V)	$V_{TC2}$ (V)	$V_{TD1}$ (V)	$V_{TD2}$ (V)
<b>Experimental</b>	0.67	0.5	0.83	0.69	0.62	0.48
<b>Simulação</b>	0.58	0.58	0.92	0.92	0.57	0.58
<b>Erro (%)</b>	-13.4	16.0	10.8	33.3	-8.1	20.8



## 5. Aplicação do método diagnóstico

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos com o transformador em condições normais de funcionamento e na presença de defeitos internos.

Inicialmente é examinado o funcionamento do transformador em condições normais de funcionamento (sem defeito) e em regime equilibrado, quer na alimentação, quer na carga. Estas condições de funcionamento, designadas por “normais”, constituem uma referência, a qual é depois utilizada para comparar com regimes desequilibrados e/ou a presença de defeitos. Para as condições normais de funcionamento apresentam-se os resultados obtidos para dois tipos de ligação dos enrolamentos, Yyn0 e Dyn11, os quais permitem analisar a distribuição do fluxo homopolar em regime simétrico e assimétrico:

- a) Ligação Yyn0:
  - i) alimentação simétrica e carga equilibrada (condição de referência)
  - ii) alimentação simétrica e carga desequilibrada
- b) Ligação Dyn11:
  - i) alimentação simétrica e carga equilibrada (condição de referência)
  - ii) alimentação assimétrica e carga equilibrada

Posteriormente apresentam-se os resultados obtidos para o funcionamento do transformador na presença de defeitos, incluindo-se as situações de defeitos mecânicos (deformações dos enrolamentos) e de isolamento (curto-circuito entre espiras).

### 5.1. Características de funcionamento sem defeito

#### 5.1.1. Ligação Yyn0

##### 5.1.1.1. Ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga equilibrada

O transformador foi ensaiado para a ligação Yyn0, com alimentação simétrica e carga equilibrada resistiva, com valor de 16  $\Omega$  por fase (aproximadamente 30% da carga nominal). O esquema correspondente é apresentado na Figura 41. Conforme referido anteriormente, este ensaio em regime equilibrado permite caracterizar a condição de referência para a ligação Yny0, para servir de comparação com outras condições de funcionamento.

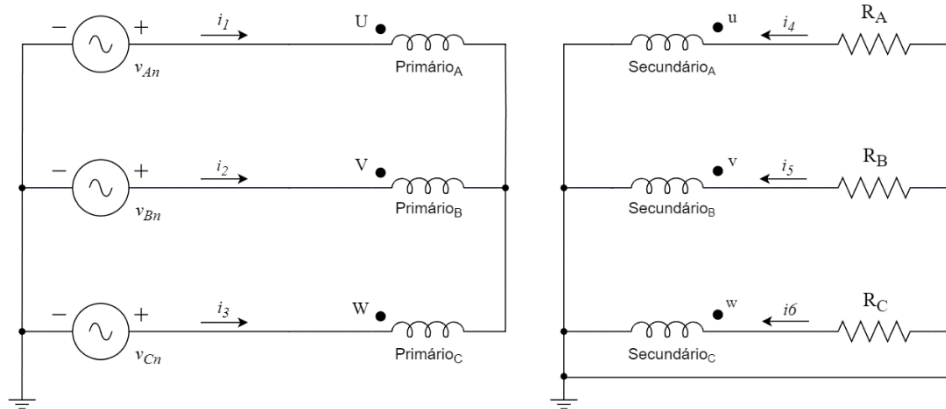


Figura 41 – Esquema da ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga equilibrada resistiva.

Na Figura 42 apresentam-se os sinais de tensão e corrente obtidos no ensaio experimental e na simulação computacional. Verifica-se que os resultados de simulação estão em boa concordância com os resultados experimentais. Na Tabela 5 apresenta-se o valor eficaz das correntes dos enrolamentos, obtidos no ensaio experimental e simulação computacional. Inclui-se também os valores obtidos através da análise do circuito equivalente de *Thévenin* (conforme Figura 4). Os erros obtidos entre os resultados experimentais e calculados são relativamente reduzidos.

A evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste é apresentada nas Figuras 43 e 44. A amplitude dos valores obtidos é bastante reduzida, pois o fluxo homopolar é diminuto em regime equilibrado de carga e alimentação. Verifica-se que os resultados de simulação estão em boa concordância com os resultados experimentais, apesar destes últimos serem afetados por algum ruído eletromagnético, em virtude da baixa amplitude das tensões induzidas. O correspondente valor eficaz das tensões induzidas é apresentado na Tabela 6. Os erros percentuais entre os resultados de simulação e experimentais tomam nalguns casos valores significativos, que se justificam pelos erros de medida associados ao baixo valor dos sinais laboratoriais, não tendo relevância prática na análise dos resultados.

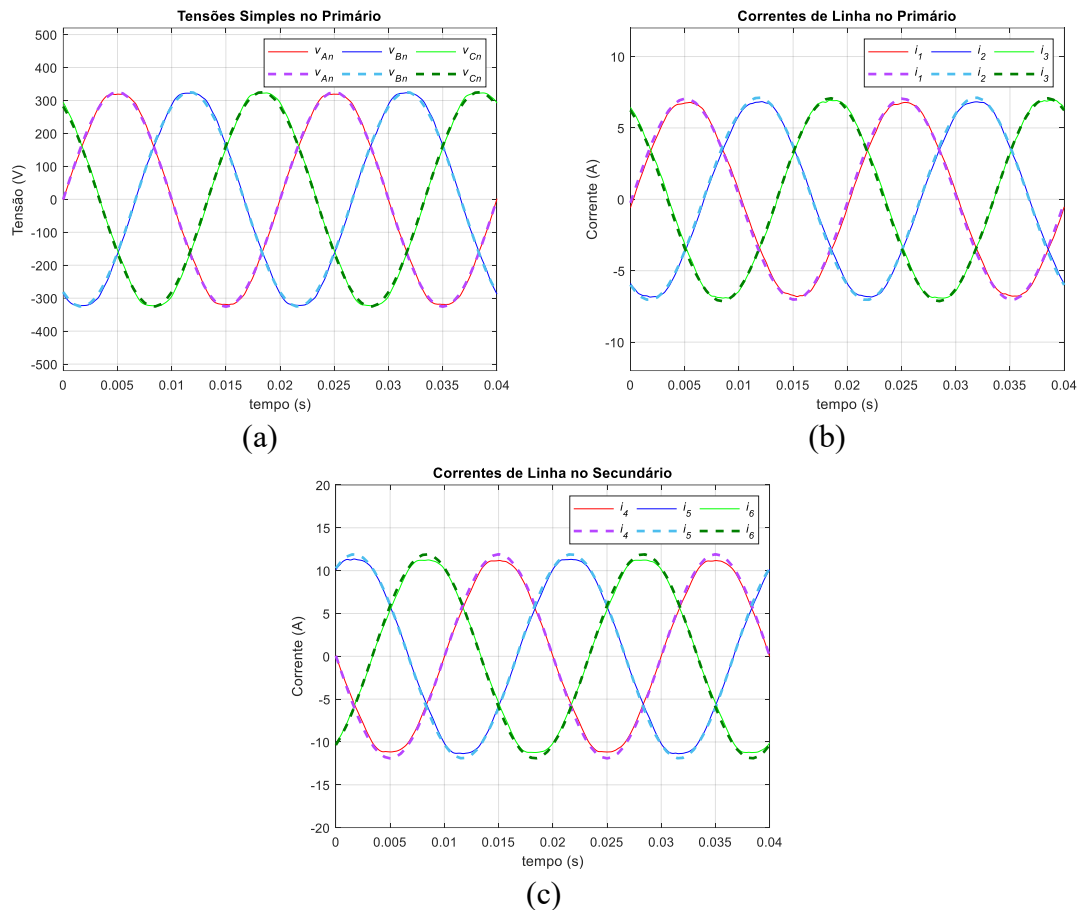


Figura 42 – Resultados obtidos para a ligação Yyn0, regime equilibrado: (a) tensões simples de alimentação; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de linha no secundário.  
 Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

Tabela 5 – Valor eficaz das correntes: ligação Yyn0, regime equilibrado.

Resultados	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)
Experimental	4.9	4.9	5.0	8.0	8.2	8.1
Simulação	4.9	5.0	5.0	8.4	8.4	8.4
Circuito equivalente		5.1			8.4	
Erro - simulação (%)	--	2.0	--	5.0	2.4	3.7
Erro - circuito equivalente (%)	4.1	4.1	2.0	5.0	2.4	3.7

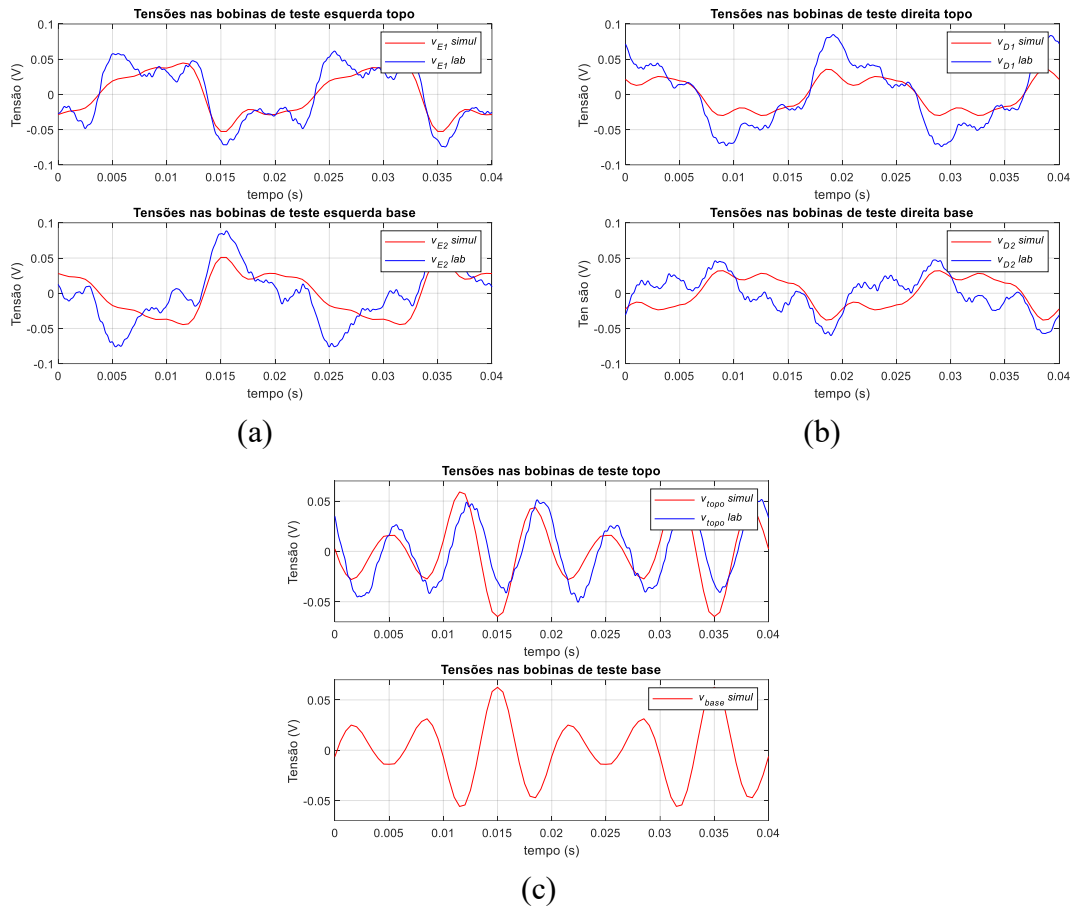
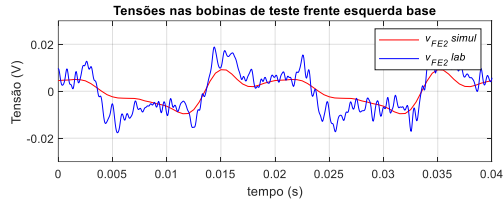
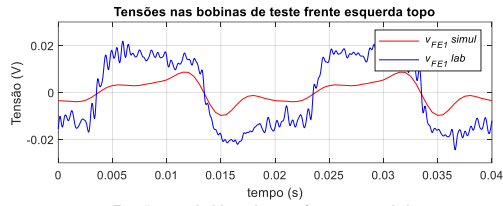
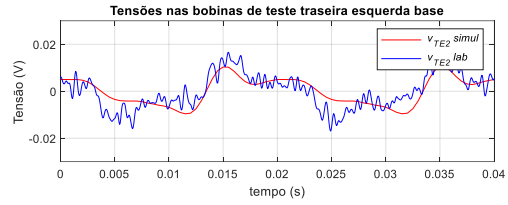
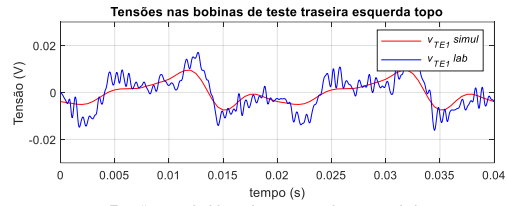


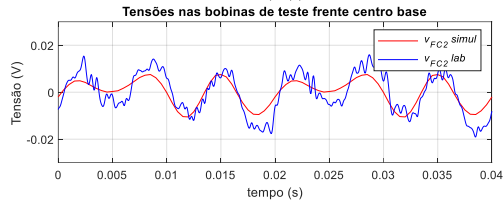
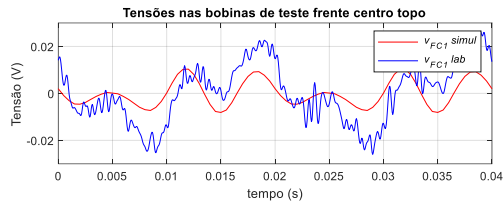
Figura 43 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime equilibrado: (a) lateral esquerda; (b) lateral direita; (c) topo e base.



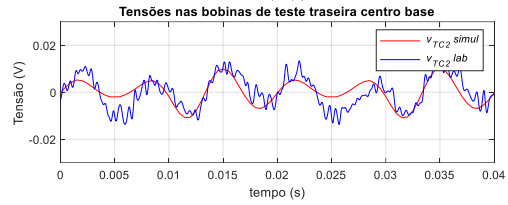
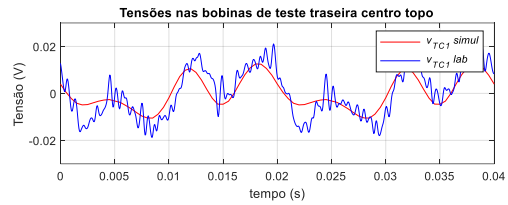
(a)



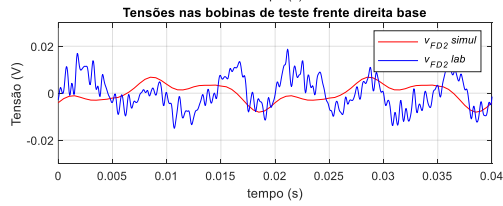
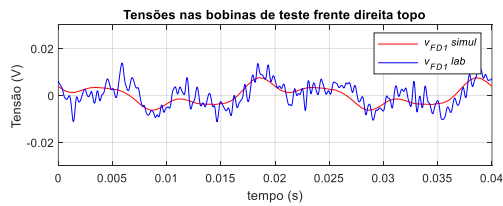
(d)



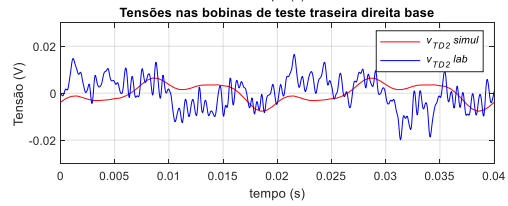
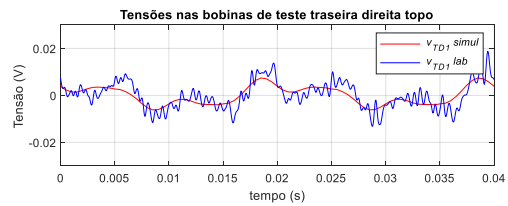
(b)



(e)



(c)



(f)

Figura 44 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime equilibrado: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita.

Tabela 6 – Valor eficaz das tensões nas bobinas de teste: ligação Yyn0, regime equilibrado.

<b>Bobinas de teste nas laterais, topo e base</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{E1}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
<b>Experimental</b>	40.1	42.4	45.7	26.0	30.5	--
<b>Simulação</b>	30.8	30.0	22.0	21.9	31.3	30.8
<b>Erro (%)</b>	-23.2	-29.2	-51.9	-15.8	2.6	--
<b>Bobinas de teste frontais</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
<b>Experimental</b>	15.5	11.3	13.4	9.4	9.4	10.5
<b>Simulação</b>	4.9	5.3	5.5	5.6	3.8	3.9
<b>Erro (%)</b>	-68.4	-53.1	-59.0	-40.4	-59.6	-62.9
<b>Bobinas de teste na traseira</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
<b>Experimental</b>	8.7	8.8	11.2	8.3	7.9	9.6
<b>Simulação</b>	4.6	5.8	6.8	5.2	3.8	3.8
<b>Erro (%)</b>	-47.1	-34.1	-39.3	-37.3	-51.9	-60.4

#### 5.1.1.2. Ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga desequilibrada

Nesta secção apresentam-se os resultados para a ligação Yyn0 numa condição de funcionamento com carga desequilibrada, onde no secundário se liga apenas uma resistência de  $16 \Omega$  entre a fase A e o neutro, conforme esquema na Figura 45. Nestas condições vai circular uma corrente na fase A (e no condutor neutro) do secundário, que possui uma componente homopolar, a qual não pode ser refletida para o lado primário, devido à ausência do respetivo neutro. Esta situação resulta em correntes distribuídas pelas fases no lado primário, desequilibradas, com componente direta e inversa, mas cuja componente homopolar é nula.

Para analisar esta condição de funcionamento é necessário considerar o acoplamento magnético entre bobinas localizadas em colunas distintas do núcleo. Refira-se que o circuito equivalente por fase não pode aqui ser diretamente utilizado, pois o acoplamento entre colunas não é tomado em conta no seu modelo matemático.

Por simplicidade desprezam-se as correntes de excitação, comparativamente com as correntes de carga, ou seja, as correntes necessárias para criar os fluxos em vazio são praticamente nulas, o que implica que as relutâncias do circuito magnético são infinitamente pequenas ( $\mathcal{R}_m \approx 0$ ) [5]. Desprezam-se também as perdas no transformador. Da análise do esquema da Figura 45 retira-se que:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0 \quad (5.1)$$

$$\bar{I}_5 = \bar{I}_6 = 0 \quad (5.2)$$

Aplicando a lei de Ampère nas malhas 1 e 2 do circuito magnético da Figura 46 resulta:

$$\begin{cases} -N_2 \bar{I}_4 - N_1 \bar{I}_1 + N_1 \bar{I}_2 + N_2 \times 0 = \mathcal{R}_m \phi \approx 0 \\ -N_2 \bar{I}_4 - N_1 \bar{I}_1 + N_1 \bar{I}_3 + N_2 \times 0 = \mathcal{R}_m \phi \approx 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Após algumas manipulações obtém-se [5]:

$$\begin{cases} \bar{I}_1 \approx -\frac{2 N_2}{3 N_1} \bar{I}_4 \\ \bar{I}_2 \approx \frac{1 N_2}{3 N_1} \bar{I}_4 \\ \bar{I}_3 \approx \frac{1 N_2}{3 N_1} \bar{I}_4 \end{cases} \quad (5.4)$$

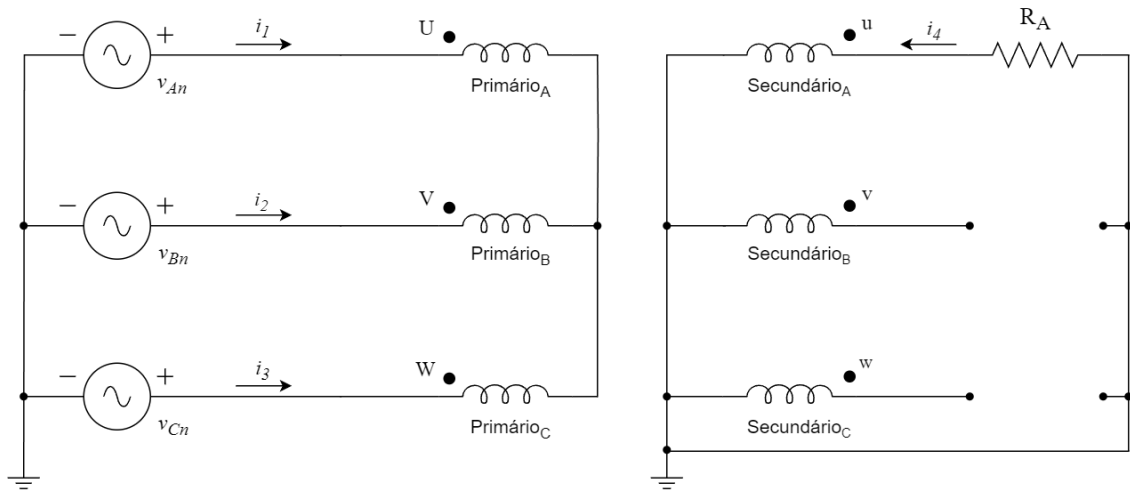


Figura 45 – Esquema da ligação Yyn0 com alimentação simétrica e carga desequilibrada resistiva.

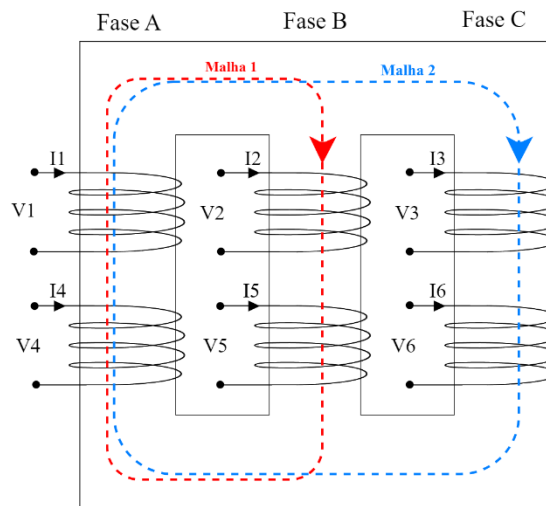


Figura 46 – Circuito magnético de 3 colunas.

Obtém-se assim um sistema assimétrico de correntes no lado primário, com componente homopolar nula. É importante destacar que em cada coluna não existe compensação da força magnetomotriz, como se mostra de seguida:

$$\begin{cases} N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_4 = \frac{1}{3} N_2 \bar{I}_4 \\ N_1 \bar{I}_2 + N_2 \bar{I}_5 = \frac{1}{3} N_2 \bar{I}_4 \\ N_1 \bar{I}_3 + N_2 \bar{I}_6 = \frac{1}{3} N_2 \bar{I}_4 \end{cases} \quad (5.5)$$

Verifica-se que a força magnetomotriz nas três colunas é igual, representando uma componente homopolar. Cada uma destas forças magnetomotrizes origina, por coluna, um fluxo homopolar, que por definição têm a mesma amplitude e sentido, e que se fecha pelo exterior do núcleo. A análise desta condição de funcionamento permite verificar se as bobinas de teste detetam as alterações na distribuição do fluxo homopolar, comparativamente com a situação de referência.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para esta condição de funcionamento: as formas de onda de tensões e correntes são apresentadas na Figura 47 e estão em coerência com a descrição anterior. A Tabela 7 apresenta o correspondente valor eficaz das correntes e os erros relativos entre os resultados experimentais e simulados, existindo uma grande concordância entre os valores obtidos.

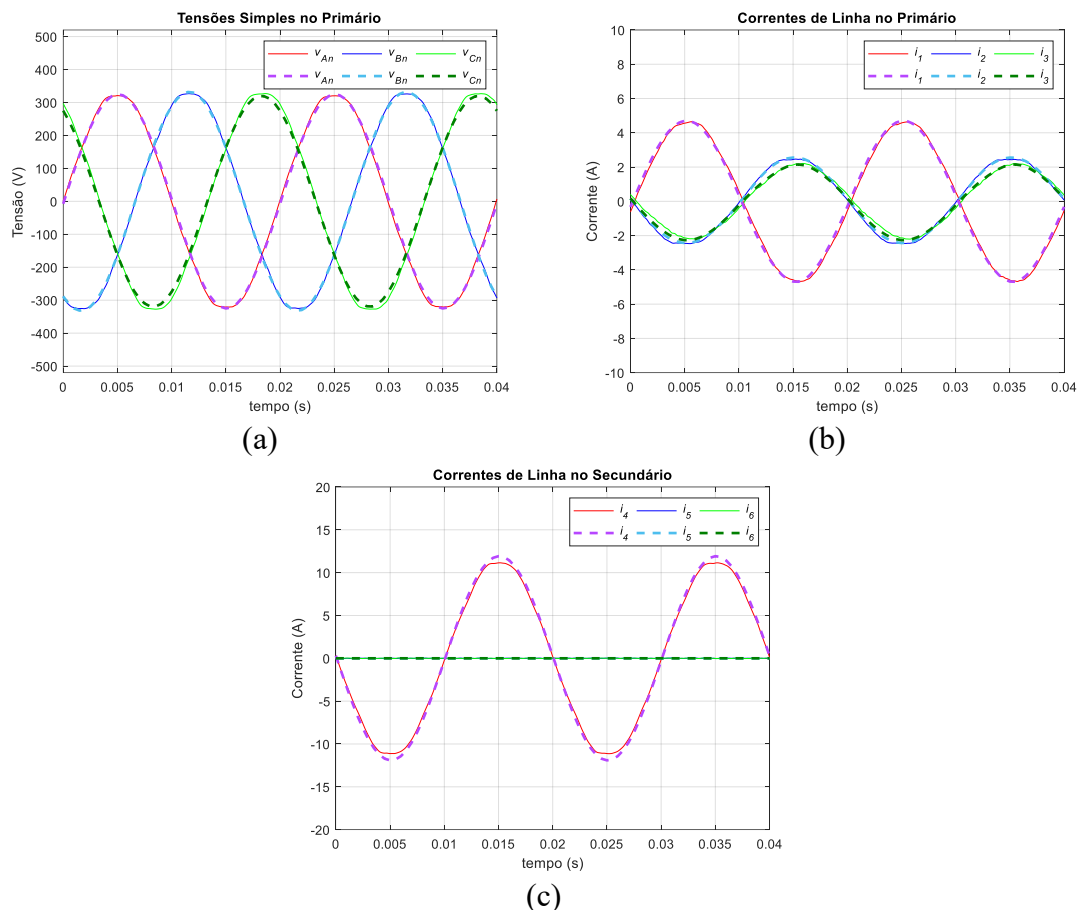


Figura 47 – Resultados obtidos para a ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada: (a) tensões simples de alimentação; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

Tabela 7 – Valor eficaz das correntes: ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada.

Resultados	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)
Experimental	3.3	1.8	1.5	8.0	0	0
Simulação	3.3	1.8	1.5	8.4	0	0
Erro (%)	0	0	0	5.0	--	--

As tensões induzidas nas bobinas de teste para esta condição funcionamento possuem uma amplitude significativamente mais elevada do que no caso de referência (regime equilibrado), o que se explica pelo aumento do fluxo homopolar. As Figuras 48 e 49 ilustram a forma de onda das tensões induzidas, verificando-se, na globalidade, um aumento de amplitude de cerca de 10 vezes, comparativamente o caso de referência. Esta situação é também evidenciada pelos valores eficazes apresentados na Tabela 8. Os resultados experimentais e de simulação são, na generalidade, coerentes.

Os valores das tensões induzidas nas bobinas de teste podem também correlacionar-se com os correspondentes valores obtidos no ensaio homopolar. De facto,

o fluxo homopolar tem um percurso que envolve o ar, variando de forma aproximadamente linear com a força magnetomotriz aplicada. No ensaio homopolar a força magnetomotriz por coluna,  $\mathcal{F}_{0EH}$ , é expressa por (no seguinte exemplo numérico utilizam-se os resultados experimentais):

$$\mathcal{F}_{0EH} = N_1 I_0 = 152 \times 13.4 \approx 2037 \text{ Ae} \quad (5.6)$$

No ensaio com ligação Yyn0 em regime desequilibrado a força magnetomotriz homopolar por coluna vem, de (5.7):

$$\mathcal{F}_{0Yyn0} = \frac{1}{3} N_2 I_4 = \frac{1}{3} 90 \times 8 = 240 \text{ Ae} \quad (5.7)$$

Considerando, por hipótese simplificativa, que o fluxo homopolar varia linearmente com a respetiva força magnetomotriz (homopolar), nos dois ensaios, então as tensões induzidas nas bobinas de teste são também proporcionais a estas forças magnetomotrizes homopolares. De facto, verifica-se que os valores das tensões induzidas nas bobinas de teste na Tabela 8 são aproximadamente  $1/8.5 \approx 240/2037$  dos valores obtidos no ensaio homopolar (Tabela 4). Por exemplo, para a bobina de teste esquerda-superior (E1):

$$V_{E1Yyn0} = V_{E1homo} \frac{\mathcal{F}_{0Yyn0}}{\mathcal{F}_{0EH}} = 3.4 \frac{240}{2037} \approx 400.6 \text{ mV} \quad (5.8)$$

O valor medido foi de  $V_{E1Yyn0} = 417.8 \text{ mV}$ , a que corresponde um erro de cerca de 4%, perfeitamente aceitável em função das hipóteses simplificativas envolvidas. Desprezou-se neste raciocínio o efeito da saturação nas peças magnéticas e a diferente distribuição de fluxo nos dois ensaios, o que provoca algumas discrepâncias quando se aplica esta relação de proporcionalidade direta entre a força magnetomotriz homopolar e fluxo homopolar.

Da análise dos resultados pode concluir-se que os sinais de tensão nas bobinas de teste permitem caracterizar de forma fiável a distribuição de fluxo no exterior do núcleo. À semelhança do ensaio homopolar, as tensões induzidas nas bobinas de teste apresentam simetria vertical, pois as tensões nas bobinas superiores e inferiores estão em oposição de fase. Esta distribuição simétrica do fluxo homopolar pode ser utilizada para discriminar entre desequilíbrios de carga e defeitos internos.

Este ensaio pode igualmente representar a situação de um curto-circuito externo fase-terra no secundário, onde a corrente de curto-circuito na fase afetada é suficientemente elevada para se poderem desprezar as correntes nas outras linhas de saída do transformador. Os sinais das tensões nas bobinas de teste têm também o potencial para serem utilizados nos sistemas de proteção do transformador para identificar este tipo de defeito externo.

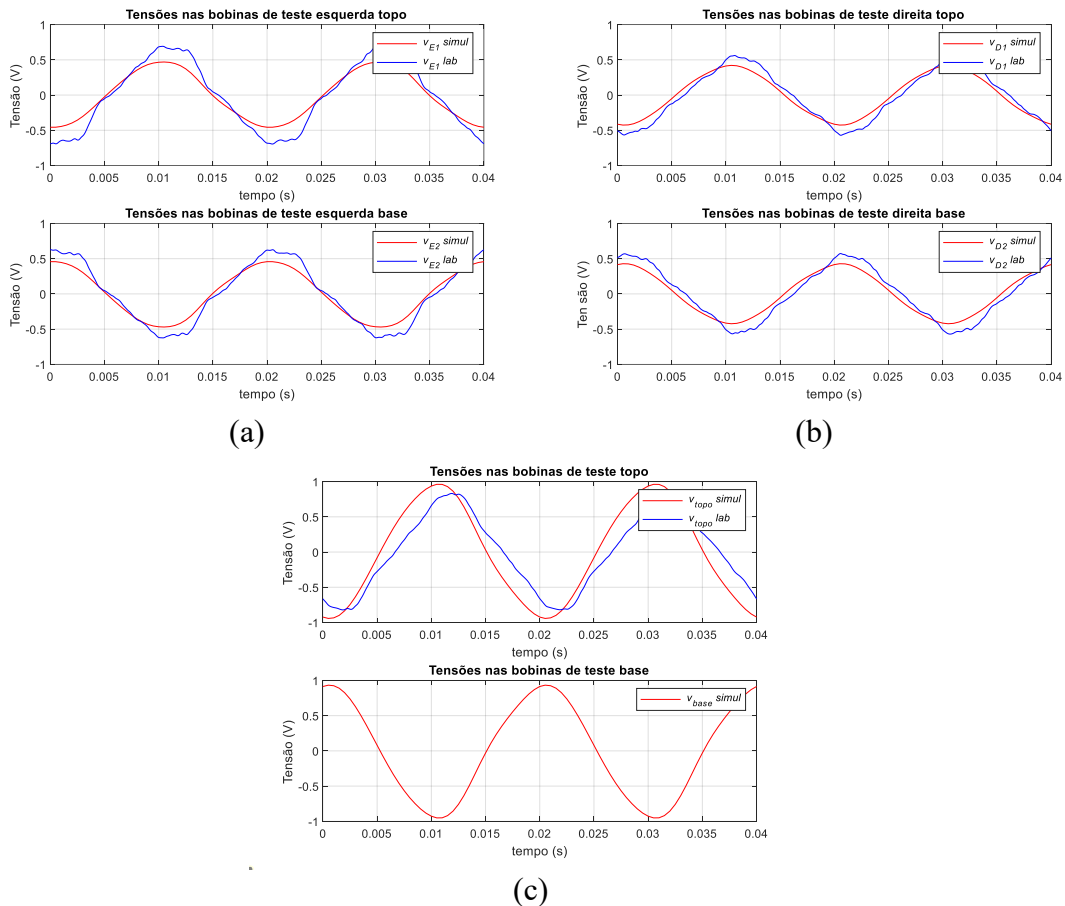
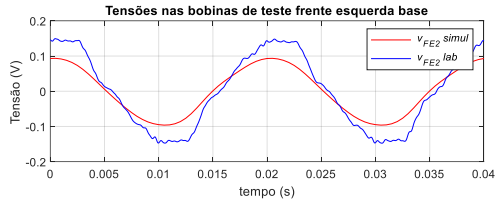
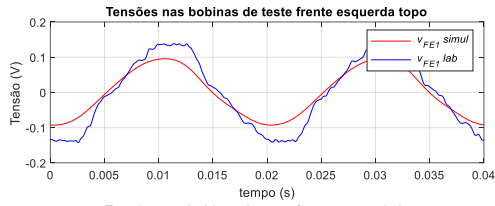
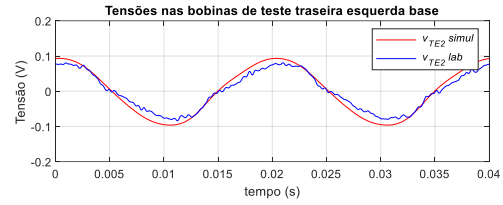
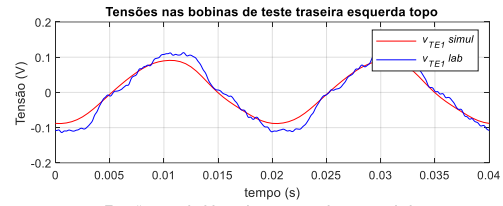


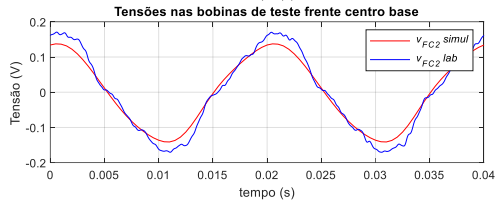
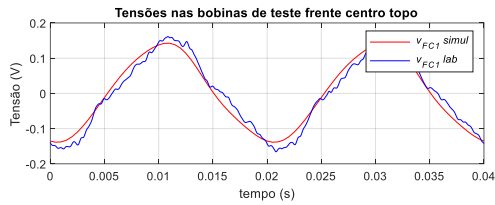
Figura 48 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base.



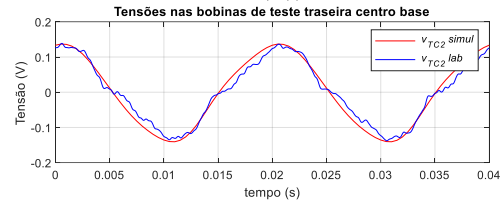
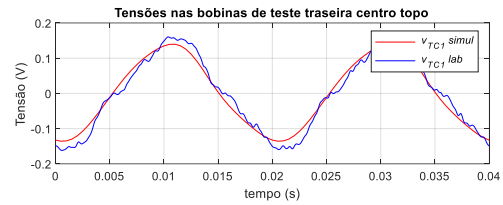
(a)



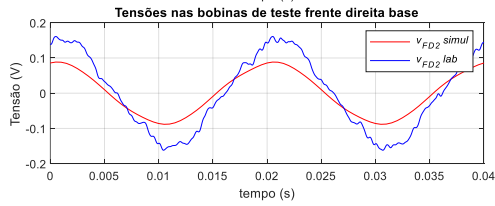
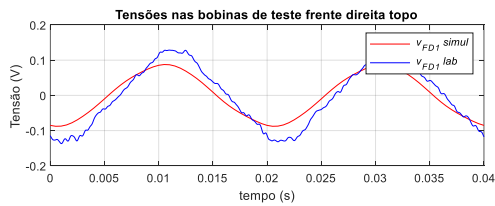
(d)



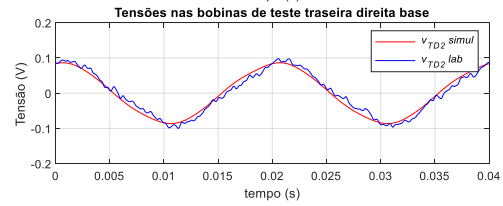
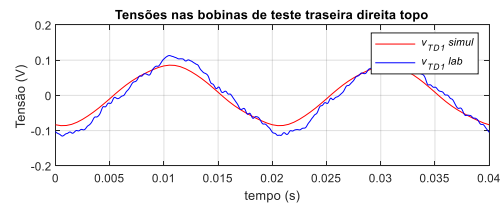
(b)



(e)



(c)



(f)

Figura 49 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita.

Tabela 8 – Valor eficaz das tensões nas bobinas de teste: ligação Yyn0, regime de carga desequilibrada.

<b>Bobinas de teste nas laterais, topo e base</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{E1}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
<b>Experimental</b>	417.8	422.7	358.7	364.8	543.1	--
<b>Simulação</b>	331.3	331.9	294.8	296.6	667.3	660.4
<b>Erro (%)</b>	-20.7	-21.5	-17.8	-18.7	22.9	--
<b>Bobinas de teste frontais</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
<b>Experimental</b>	98.0	102.7	102.0	113.0	86.8	105.0
<b>Simulação</b>	67.1	67.5	98.2	97.2	61.0	61.4
<b>Erro (%)</b>	-31.5	-34.3	-3.7	-14.0	-29.7	-41.5
<b>Bobinas de teste na traseira</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
<b>Experimental</b>	77.4	54.6	104.6	86.7	73.4	60.2
<b>Simulação</b>	63.8	67.5	96.1	96.8	59.7	60.1
<b>Erro (%)</b>	-17.6	23.6	-8.1	11.6	-18.7	-0.2

## 5.1.2. Ligação Dyn11

### 5.1.2.1. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para o ensaio do transformador com ligação Dyn11, com alimentação simétrica e carga equilibrada resistiva, com valor de 16  $\Omega$  por fase. O esquema correspondente é apresentado na Figura 50. Conforme referido anteriormente, este ensaio permite caracterizar a condição de referência para ligação Dyn11, que servirá depois como termo de comparação com outras condições de funcionamento.

A Figura 51 ilustra a evolução das tensões e correntes no primário e secundário, existindo boa concordância entre resultados experimentais e de simulação. Na Tabela 9 apresenta-se o valor eficaz dos sinais ilustrados na Figura 51. Os resultados obtidos com o circuito equivalente de *Thévenin* são idênticos aos obtidos anteriormente na ligação Yyn0, com exceção das correntes de linha do primário, cujo valor eficaz é igual a  $\sqrt{3}$  vezes a corrente de fase. Verifica-se que os resultados calculados e medidos estão em boa concordância.

Para efeitos comparativos com outras condições de funcionamento torna-se importante definir aqui, de forma simplificada, as relações entre as correntes no primário e no secundário. Assim, considerando um transformador ideal e para condições

simétricas, definem-se as correntes de fase no secundário (tomou-se aqui  $\bar{I}_4$  como a referência):

$$\begin{cases} \bar{I}_4 = I_s \angle 0 \\ \bar{I}_5 = I_s \angle -120^\circ \\ \bar{I}_6 = I_s \angle +120^\circ \end{cases} \quad (5.9)$$

As correntes de fase no primário resultam:

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_4 = \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 180^\circ \\ \bar{I}_2 = -\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_5 = \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 60^\circ \\ \bar{I}_3 = -\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_6 = \frac{N_2}{N_1} I_s \angle -60^\circ \end{cases} \quad (5.10)$$

E as correntes de linha:

$$\begin{cases} \bar{I}_{L1} = \bar{I}_1 - \bar{I}_3 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 150^\circ \\ \bar{I}_{L2} = \bar{I}_2 - \bar{I}_1 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 30^\circ \\ \bar{I}_{L3} = \bar{I}_3 - \bar{I}_2 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle -90^\circ \end{cases} \quad (5.11)$$

Estes resultados simplificados são também coerentes com as ondas ilustradas na Figura 51.

As tensões induzidas nas bobinas de testes possuem valores muito reduzidos (Figura 52, Figura 53 e Tabela 10), sendo válidas também aqui as observações apresentadas no caso do ensaio em regime equilibrado com ligação Yyn0.

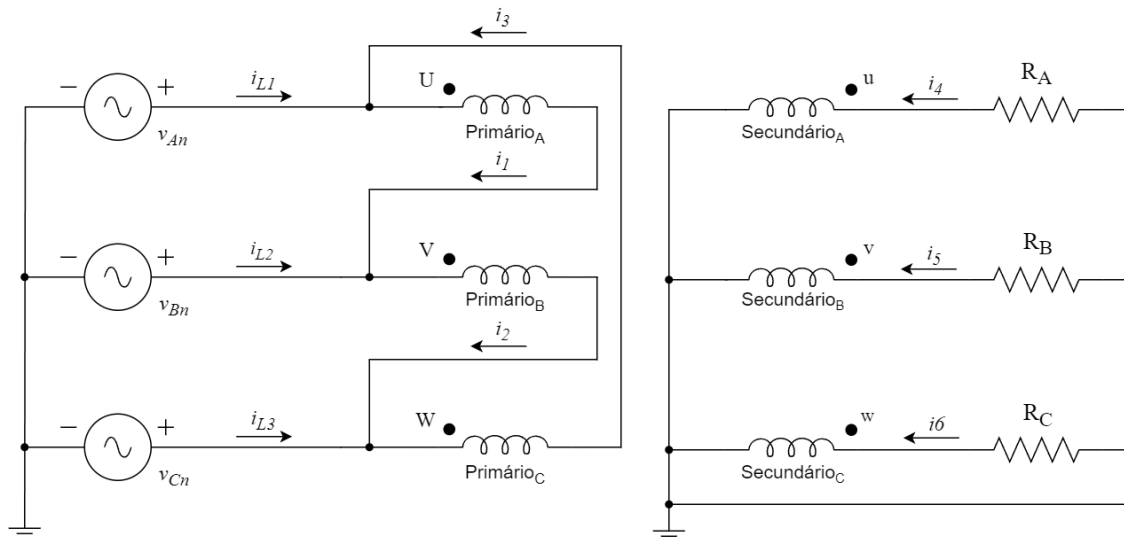


Figura 50 – Esquema da ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada resistiva.

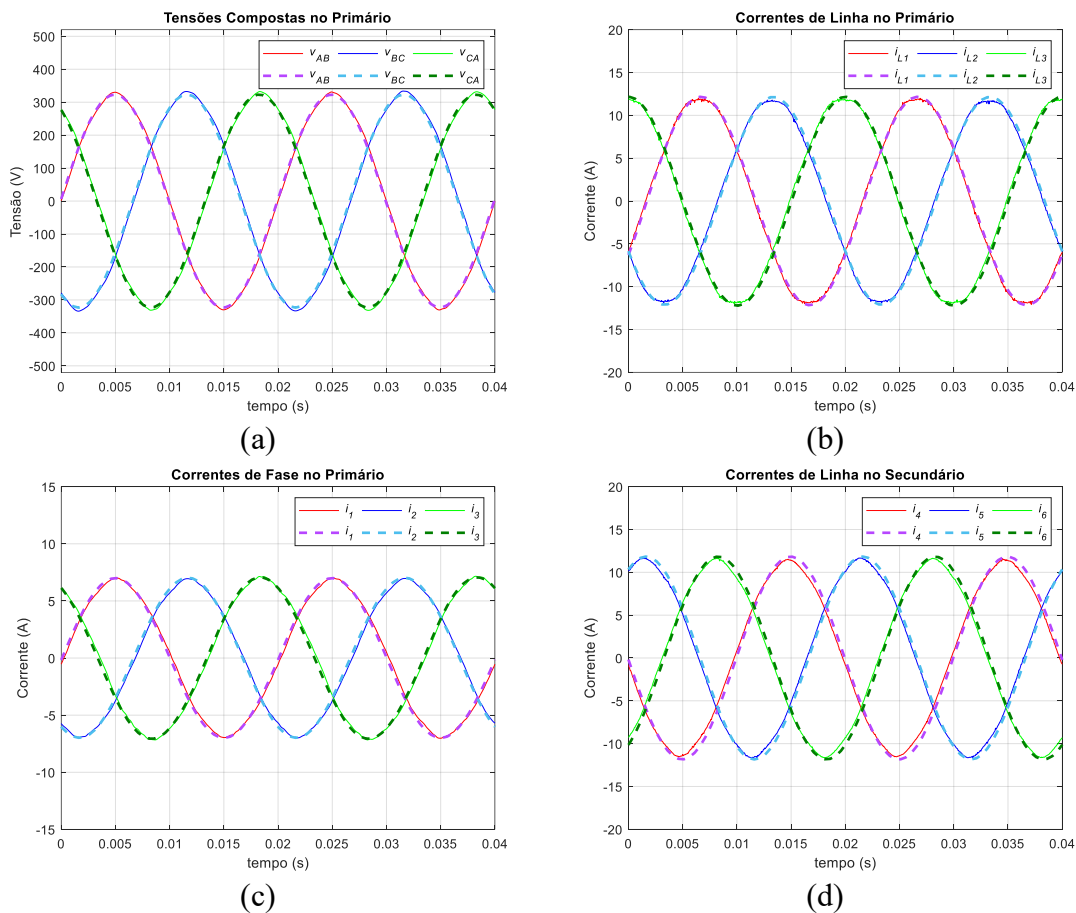


Figura 51 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, regime equilibrado: (a) tensões compostas de alimentação; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de fase no primário; (d) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

Tabela 9 – Valor eficaz das correntes: ligação Dyn1, regime equilibrado.

Resultados	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)
Experimental	8.5	8.4	8.5	4.9	4.9	5.0	8.0	8.1	8.0
Simulação	8.6	8.6	8.7	4.9	5.0	5.0	8.3	8.4	8.3
Circuito equivalente	8.8			5.1			8.4		
Erro de simulação (%)	1.2	2.4	2.4	--	2.0	--	3.8	3.7	3.8
Erro do circuito equivalente (%)	3.5	4.8	3.5	4.1	4.1	2.0	3.7	5.0	8.3

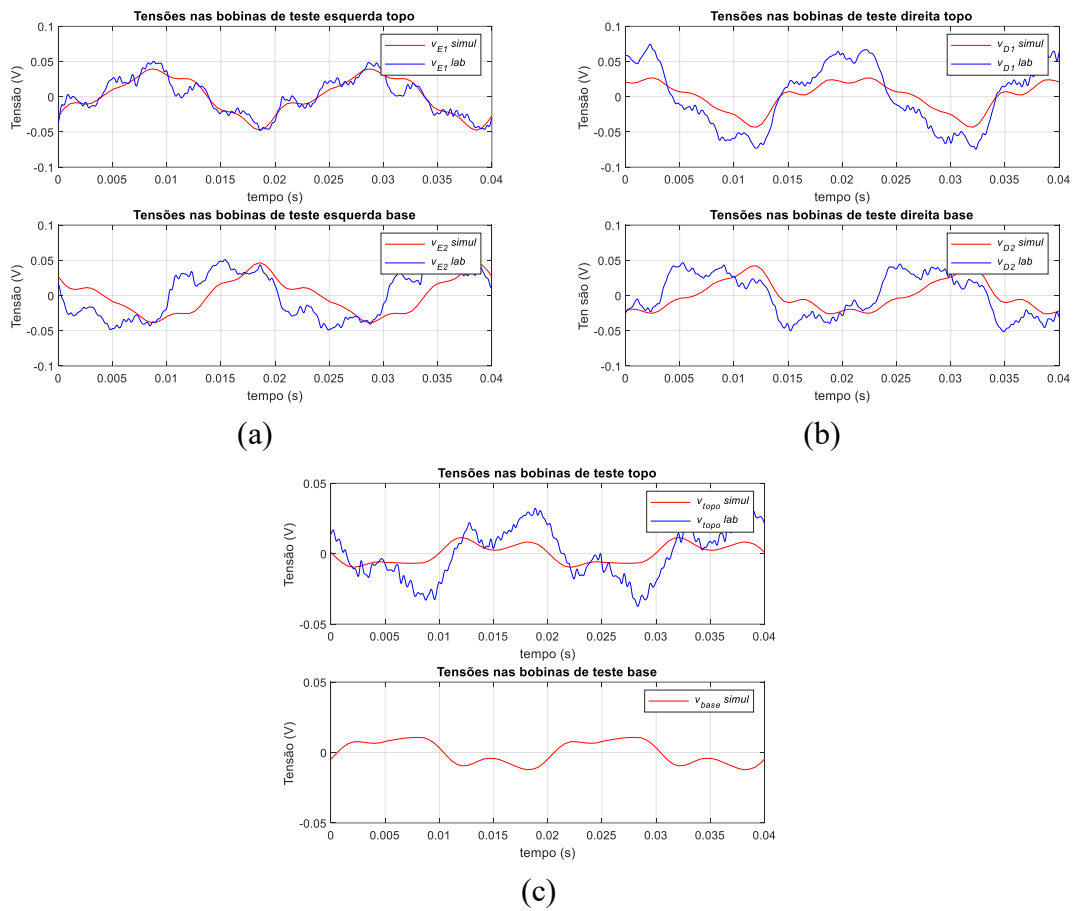


Figura 52 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime equilibrado: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base.

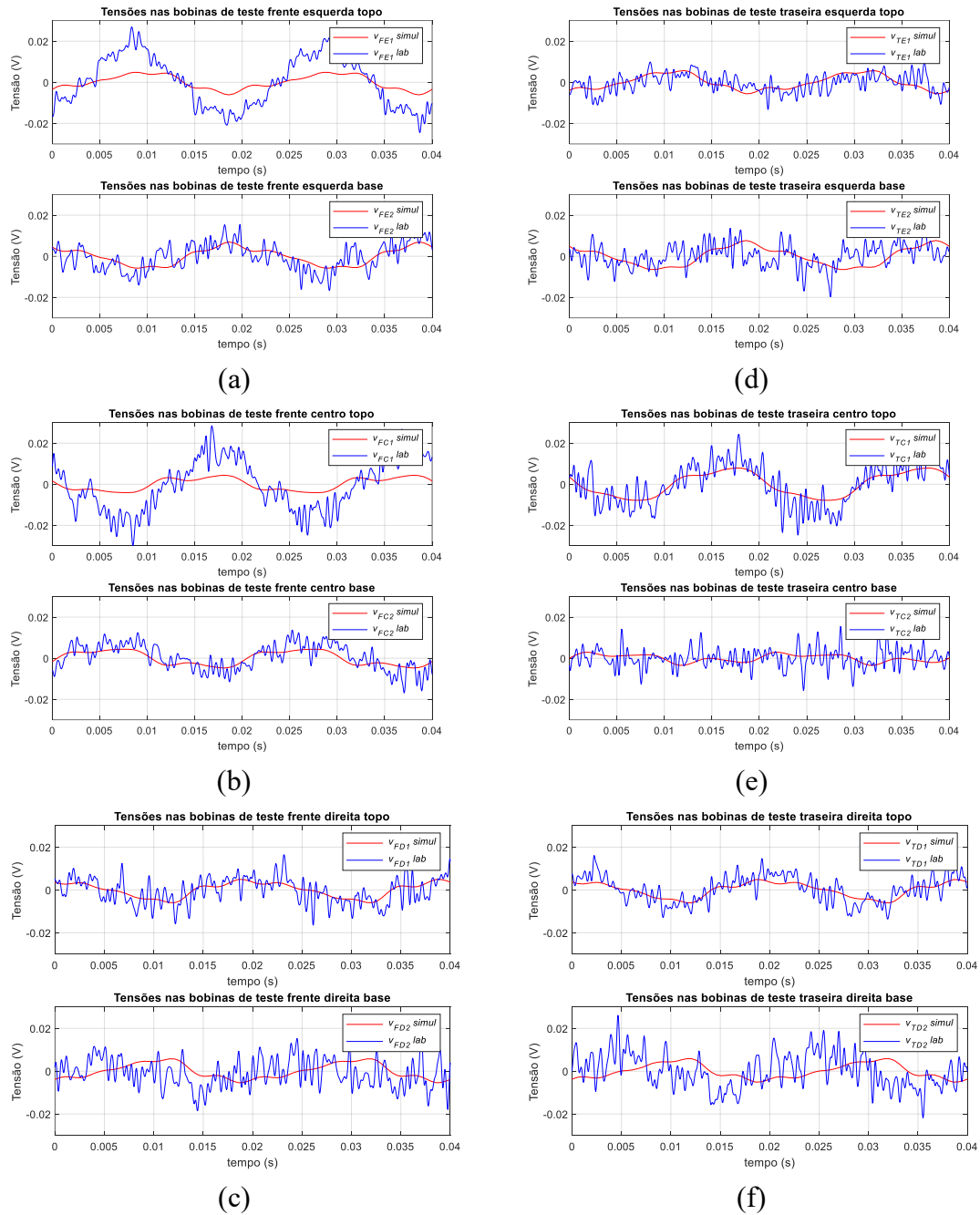


Figura 53 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime equilibrado: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita.

Tabela 10 – Valor eficaz das tensões nas bobinas de teste: ligação Dyn11, regime equilibrado.

<b>Bobinas de teste nas laterais, topo e base</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{E1}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
<b>Experimental</b>	26.0	32.5	45.1	29.8	19.1	--
<b>Simulação</b>	25.4	24.7	20.9	20.9	6.7	7.9
<b>Erro (%)</b>	-2.3	-24.0	-53.7	-29.9	-64.9	--
<b>Bobinas de teste frontais</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
<b>Experimental</b>	13.2	9.0	15.2	8.8	11.8	12.4
<b>Simulação</b>	3.3	4.0	3.0	3.3	3.3	3.4
<b>Erro (%)</b>	-75.0	-55.6	-80.3	-62.5	-72.0	-72.6
<b>Bobinas de teste na traseira</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
<b>Experimental</b>	8.5	10.9	14.9	11.2	11.1	16.6
<b>Simulação</b>	3.5	4.4	5.5	1.8	3.3	3.3
<b>Erro (%)</b>	-58.8	-59.6	-63.1	-83.9	-70.3	-80.1

#### 5.1.2.1.1. Variação da tensão nas bobinas de teste em função do regime de carga

A amplitude da tensão induzida nas bobinas de teste depende do regime (nível) de carga do transformador. Na Figura 54 ilustra-se a evolução das tensões induzidas na bobina de teste E1 para os níveis de carga do transformador indicados na Tabela 11. O aumento da corrente nos enrolamentos provoca um aumento do fluxo homopolar, resultando numa maior amplitude da tensão induzida nas bobinas de teste. A relação entre o valor eficaz das tensões induzidas nas bobinas de teste e o nível de carga do transformador é aproximadamente linear, conforme ilustrado na Figura 55(a). Para obter um indicador do estado do transformador independente do nível de carga podem normalizar-se as tensões induzidas nas bobinas de teste em função da corrente média que circula no transformador (exemplo para a bobina E1):

$$V_{E1norm} = \frac{V_{E1}}{I_{med}/I_{P(n)}} \quad (5.12)$$

onde

$$I_{med} = \frac{\frac{(I_1 + I_2 + I_3)}{3} + \frac{(I_4 + I_5 + I_6)}{3}}{2} \times \frac{N_2}{N_1} \quad (5.13)$$

e  $I_{P(n)}$  é a corrente nominal do lado primário.

O resultado desta normalização pode ser visualizado na Figura 55(b). Para cargas mais elevadas, onde a corrente de excitação é desprezável, a tensão induzida (normalizada) mantém-se aproximadamente constante, em relação à potência fornecida pelo transformador, conforme representado na linha contínua da Figura 55(b). Uma variação na carga de 50% para 100% resulta numa variação de cerca de 10% na amplitude da tensão induzida normalizada. Para condições de carga mais reduzidas a corrente de excitação já não é desprezável, resultando numa maior variação da tensão induzida normalizada, linha a tracejado na Figura 55(b).

Nos transformadores de potência industriais a corrente de excitação é relativamente reduzida, sendo expectável que a variação do valor normalizado da tensão induzida nas bobinas de teste seja menor do que no transformador utilizado nos ensaios experimentais. Obtém-se assim um sinal que não é afetado de forma significativa pelo regime de carga do transformador, sendo possível discriminar entre variações de carga e defeitos internos.

Tabela 11 – Níveis e resistências de carga do transformador.

$S/S_{\text{nominal}}$	11 %	32 %	50 %	67 %	100 %	150%
$R_{\text{carga}}$	48 $\Omega$	16 $\Omega$	10.15 $\Omega$	7.61 $\Omega$	5.07 $\Omega$	3.38 $\Omega$

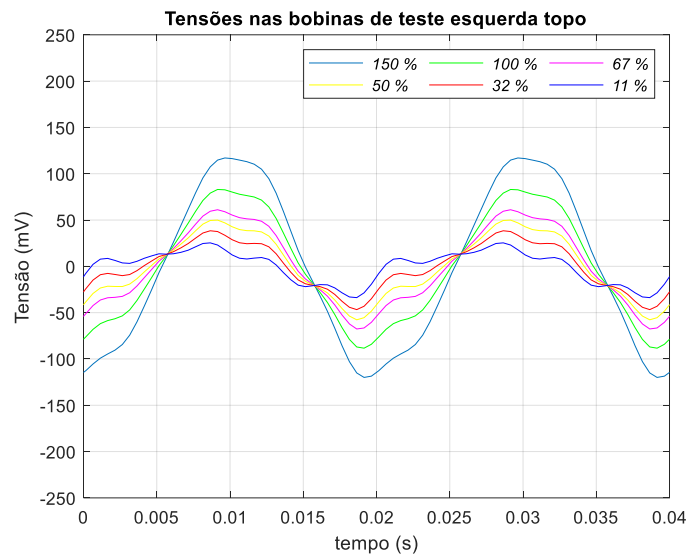
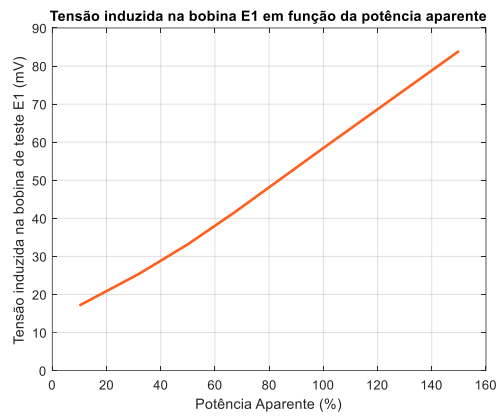
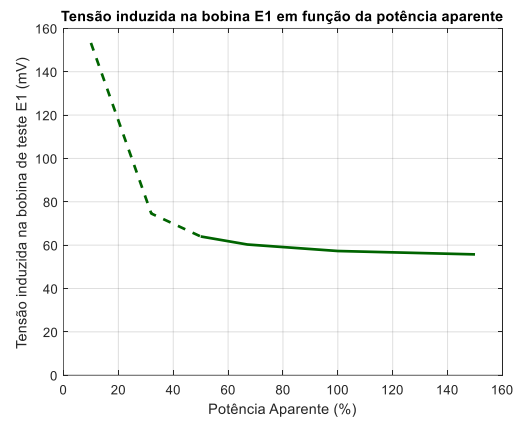


Figura 54 – Tensões na bobina de teste E1 para diversos níveis de carga.



(a)



(b)

Figura 55 – Tensões na bobina de teste E1 para diversos níveis de carga:  
 (a) sem normalização; (b) com normalização.

### 5.1.2.2. Ligação Dyn11 com alimentação assimétrica e carga equilibrada

Neste ensaio, com ligação Dyn11, aplicou-se um desequilíbrio no primário, interrompendo a fase AB (circuito aberto). O secundário alimenta uma carga resistiva equilibrada de  $16 \Omega$  por fase, Figura 56.

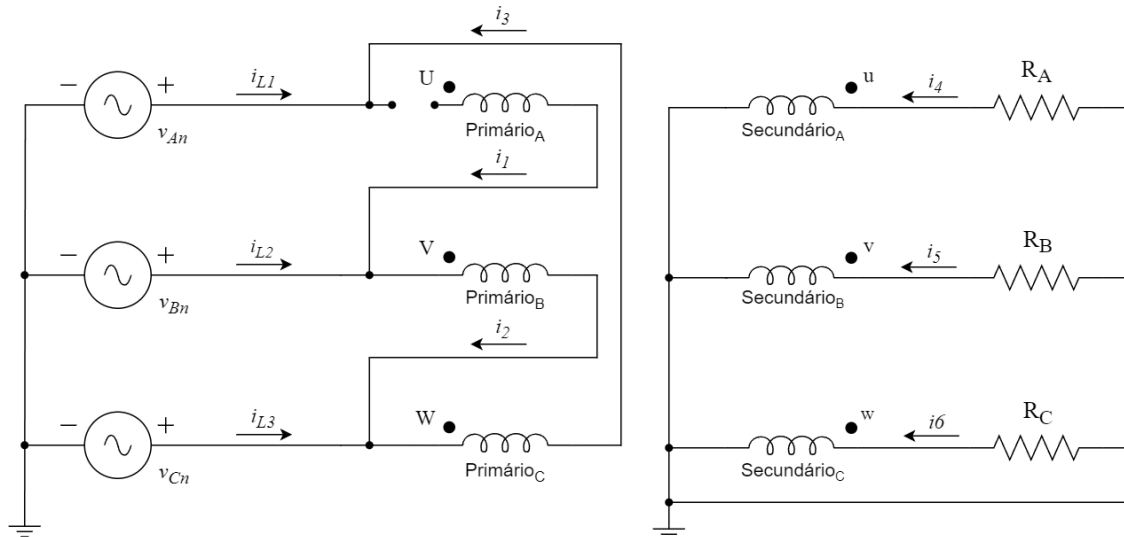


Figura 56 – Esquema da ligação Dyn11 com alimentação assimétrica e carga equilibrada resistiva.

O funcionamento do transformador neste regime desequilibrado pode ser explicado considerando primeiro o transformador com o secundário em vazio. Os dois enrolamentos alimentados no lado primário (V e W), Figura 57(a), vão criar fluxos nas respectivas colunas ( $\phi_2$  e  $\phi_3$ ) desfasados de  $120^\circ$ , Figura 57(b). O fluxo na coluna da fase U resulta então:

$$\bar{\phi}_1 = -(\bar{\phi}_2 + \bar{\phi}_3) \quad (5.14)$$

conforme representado na Figura 57(b). Assim, apesar do sistema de alimentação ser assimétrico os fluxos nas colunas, e as tensões induzidas nos enrolamentos em vazio, constituem sistemas equilibrados. Ligando uma carga equilibrada no secundário obtém-se também um sistema de correntes simétrico:

$$\begin{cases} \bar{I}_4 = I_s \angle 0 \\ \bar{I}_5 = I_s \angle -120^\circ \\ \bar{I}_6 = I_s \angle +120^\circ \end{cases} \quad (5.15)$$

Para explicar a distribuição das correntes nos enrolamentos primários utilizam-se as mesmas hipóteses simplificativas usadas no caso do sistema desequilibrado Yyn0: desprezam-se as correntes de excitação e as perdas no transformador.

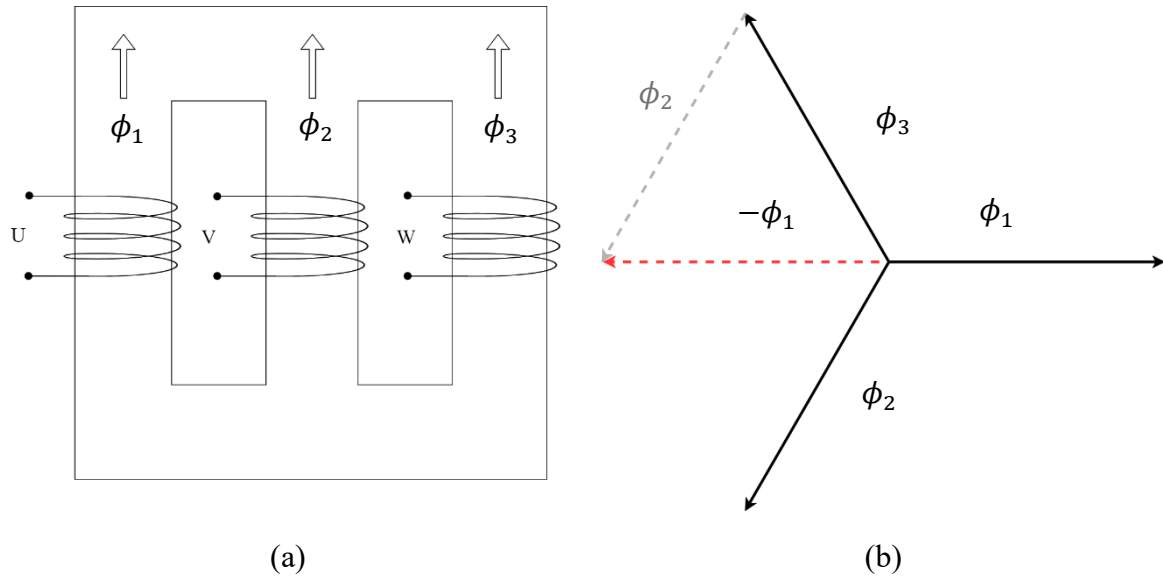


Figura 57 – (a) Fluxos nas colunas; (b) diagrama fasorial.

Aplicando a lei de Ampère nas malhas 1 e 2 do circuito magnético da Figura 58 obtém-se (reconhecendo que  $\bar{I}_1 = 0$ ):

$$\begin{cases} -N_2\bar{I}_4 - N_1 \times 0 + N_1\bar{I}_2 + N_2\bar{I}_5 \approx 0 \\ -N_2\bar{I}_4 - N_1 \times 0 + N_1\bar{I}_3 + N_2\bar{I}_6 \approx 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

Resultando:

$$\begin{cases} \bar{I}_2 = \frac{N_2}{N_1}(\bar{I}_4 - \bar{I}_5) \\ \bar{I}_3 = \frac{N_2}{N_1}(\bar{I}_4 - \bar{I}_6) \end{cases} \quad (5.17)$$

E substituindo as correntes no secundário por (5.15) vem:

$$\begin{cases} \bar{I}_2 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 30^\circ \\ \bar{I}_3 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle -30^\circ \end{cases} \quad (5.18)$$

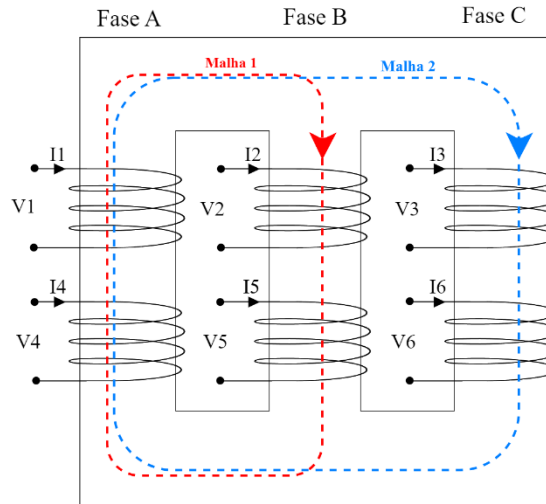


Figura 58 – Circuito magnético de 3 colunas.

As correntes de linha no primário vêm finalmente:

$$\begin{cases} \bar{I}_{L1} = -\bar{I}_3 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 150^\circ \\ \bar{I}_{L2} = \bar{I}_2 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle 30^\circ \\ \bar{I}_{L3} = \bar{I}_3 - \bar{I}_2 = \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} I_s \angle -90^\circ \end{cases} \quad (5.19)$$

Nesta condição de funcionamento desequilibrado as correntes de linha no primário e secundário permanecem inalteradas em relação ao caso equilibrado, conforme se demonstra pela comparação de (5.11) e (5.19). A interrupção do enrolamento U não é facilmente identificável apenas pela análise das correntes de linha entrada/saída e pode ocorrer uma sobrecorrente nos enrolamentos V e W (até  $\sqrt{3}$  vezes superior ao valor nominal) que permanece indetetável.

Não existe também neste regime de operação compensação das forças magnetomotrizes em cada coluna:

$$\begin{cases} N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_4 = N_2 I_s \\ N_1 \bar{I}_2 + N_2 \bar{I}_5 = N_2 I_s \\ N_1 \bar{I}_3 + N_2 \bar{I}_6 = N_2 I_s \end{cases} \quad (5.20)$$

existindo uma força magnetomotriz com a mesma amplitude e ângulo de fase nas 3 colunas (uma força magnetomotriz homopolar, por definição), o que resulta na criação de um fluxo homopolar com valor significativo.

Na prática a força magnetomotriz no enrolamento  $u$  ( $N_2 i_4$ ) vai contrariar o fluxo  $\phi_1$  imposto pelas outras duas colunas, existindo um maior fluxo de fugas e,

consequentemente, um valor ligeiramente menor de  $\phi_1$  e da corrente  $i_4$ . Esta situação pode ser associada a pequenos desequilíbrios da carga, continuando a ser difícil identificar, apenas pelas correntes de linha, a interrupção da continuidade do enrolamento U.

Os resultados obtidos no ensaio experimental e na simulação computacional são apresentados na Figura 59, estando em coerência com a explicação apresentada anteriormente. Os correspondentes valores eficazes das correntes são apresentados na Tabela 12, verificando-se que os resultados experimentais e de simulação estão em razoável concordância.

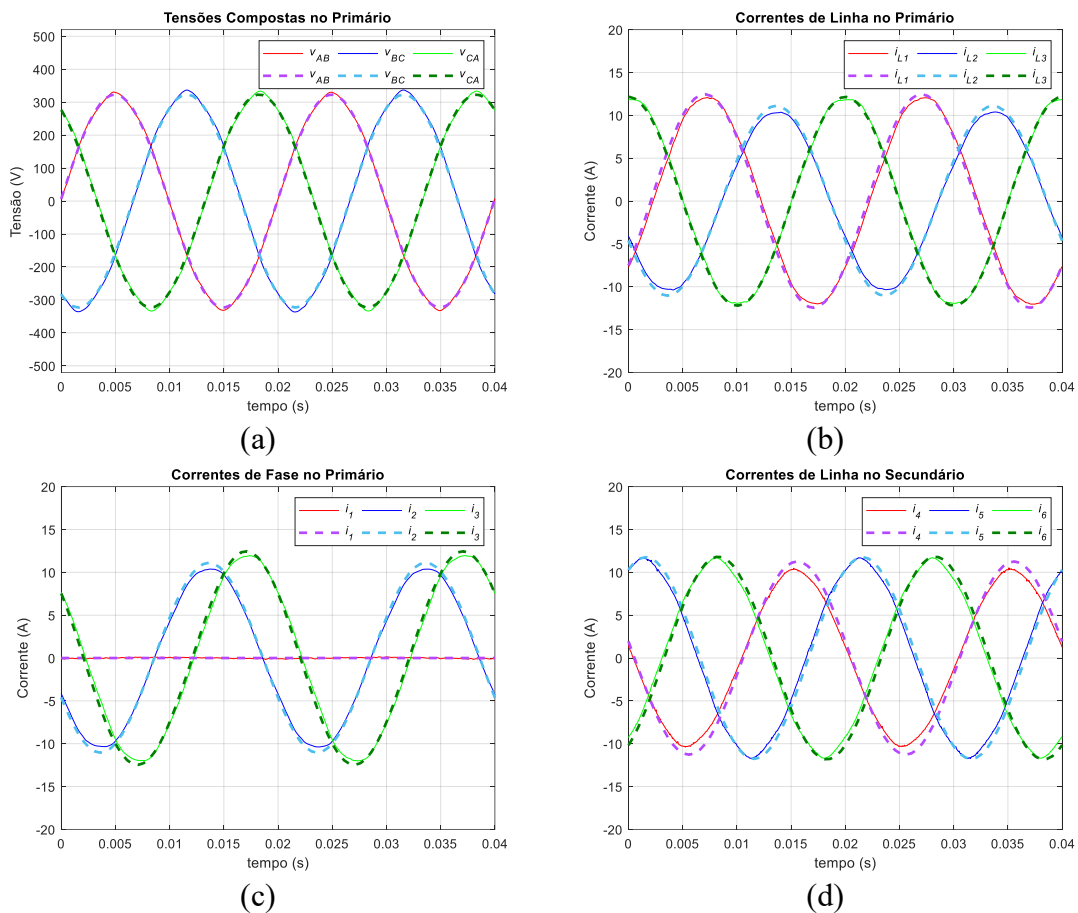


Figura 59 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica: (a) tensões compostas; (b) correntes de linha no primário; (c) correntes de fase no primário; (d) correntes de linha no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

Tabela 12 – Valor eficaz das correntes: ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica

Resultados	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)
Experimental	8.6	7.4	8.6	0.0	7.4	8.5	7.2	8.1	8.1
Simulação	8.8	7.8	8.7	0.0	7.8	8.7	7.9	8.4	8.4
Erro (%)	2.3	5.4	1.2	--	5.4	2.4	9.7	3.7	3.7

Devido à força magnetomotriz homopolar o fluxo que fecha pelo exterior do núcleo possui um valor muito superior que no caso de referência (regime equilibrado); conseqüentemente as tensões induzidas nas bobinas de teste vão também possuir valores mais elevados. As Figuras 60 e 61 ilustram a forma de onda das tensões induzidas, nas bobinas de teste, verificando-se, em média, um aumento de amplitude nos valores experimentais de cerca de 25 vezes, comparativamente com o caso de referência. Esta situação é também evidenciada pelos valores eficazes apresentados na Tabela 13. Os resultados experimentais e de simulação são, na generalidade, coerentes.

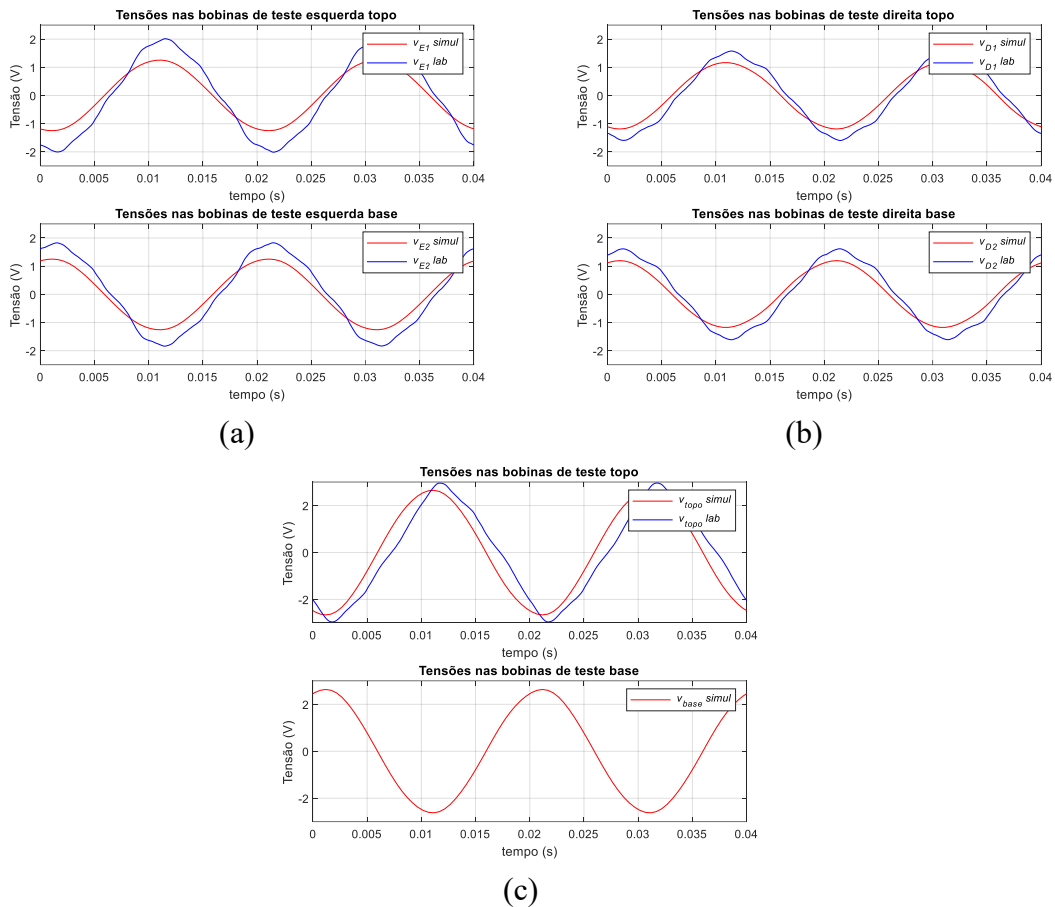


Figura 60 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime alimentação desequilibrada: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base.

As tensões induzidas nas bobinas de testes são aproximadamente proporcionais às forças magnetomotrices homopolares. No seguinte exemplo numérico seguinte utilizam-se os resultados experimentais. A força magnetomotriz homopolar por coluna vem, de (5.21):

$$\mathcal{F}_{0_{Dyn11}} = N_2 I_S = 90 \times 7.8 = 702 \text{ Ae} \quad (5.21)$$

onde para  $I_s$  se utilizou a média das correntes no secundário. Os valores das tensões induzidas nas bobinas de teste no ensaio Dyn11 com regime assimétrico são aproximadamente  $1/2.9 \approx 702/2037$  dos valores obtidos no ensaio homopolar (Tabela 4). Por exemplo, para a bobina de teste esquerda-superior (E1):

$$V_{E1_{Dyn11}} = V_{E1_{homopolar}} \frac{\mathcal{F}_{0_{Dyn11}}}{\mathcal{F}_{0_{EH}}} = 3.4 \frac{702}{2037} \approx 1.17 \text{ V} \quad (5.22)$$

O valor medido foi de  $V_{E1_{Dyn11}} = 1.36 \text{ V}$ , a que corresponde um erro de cerca de 13%, perfeitamente aceitável em função das hipóteses simplificativas envolvidas.

O aumento da amplitude das tensões induzidas nas bobinas de teste permite detetar a presença de um regime de funcionamento assimétrico, o qual não é possível identificar apenas pela análise das correntes de entrada/saída do transformador. Apesar do aumento da amplitude, as tensões induzidas nas bobinas de teste continuam a apresentar simetria vertical.

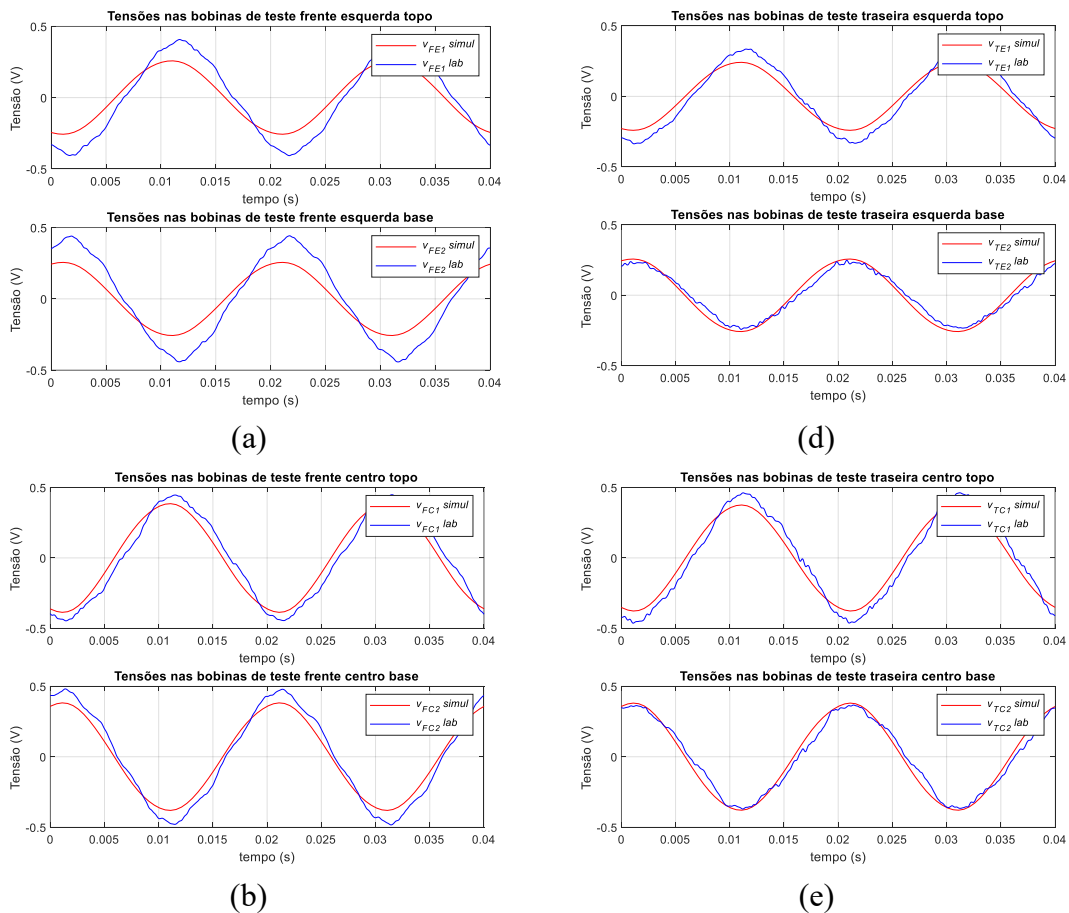


Figura 61 – Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita (continua na página seguinte).

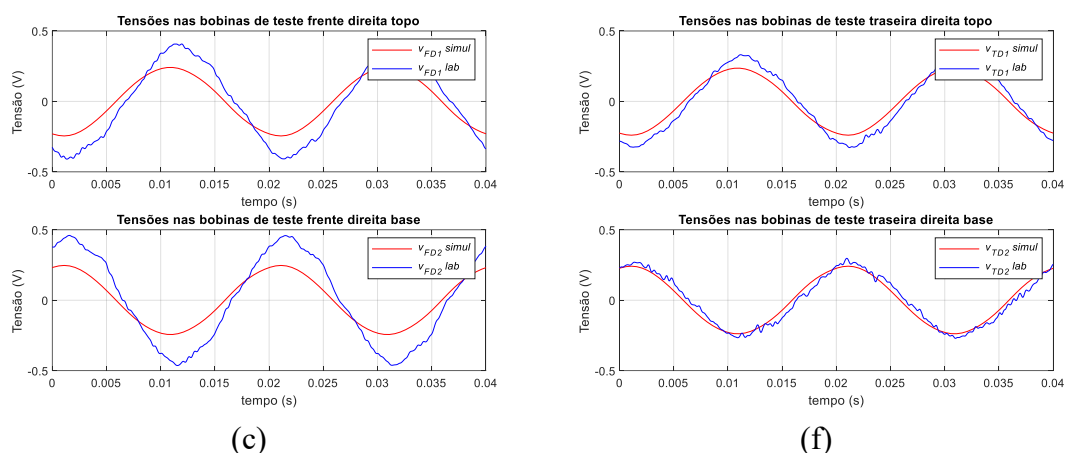


Figura 61 – (continuação) Tensões nas bobinas de teste no ensaio com ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita.

Tabela 13 – Valor eficaz das tensões nas bobinas de teste: ligação Dyn11, regime de alimentação assimétrica.

Bobinas de teste nas laterais, topo e base						
Resultados	$V_{E1}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
Experimental	1360.4	1239.4	1065.7	1086.5	1886.8	--
Simulação	893.8	894.3	838.8	843.4	1884.3	1863.2
Erro (%)	-34.3	-27.8	-21.3	-22.4	-0.1	--
Bobinas de teste frontais						
Resultados	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
Experimental	271.3	291.6	298.5	320.1	271.3	308.1
Simulação	183.2	182.4	273.2	270.7	172.8	174.5
Erro (%)	-32.5	-37.4	-8.5	-15.4	-36.3	-43.4
Bobinas de teste na traseira						
Resultados	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
Experimental	223.8	160.7	305.6	249.6	217.6	179.3
Simulação	171.8	183.6	266.3	269.7	169.1	170.9
Erro (%)	-23.2	14.3	-12.9	8.1	-22.3	-4.7

## 5.2. Defeitos internos no transformador

Nesta secção vão ser apresentados resultados obtidos para vários casos de defeitos internos no transformador. Inicialmente vão ser abordados os casos relativos a deformações mecânicas dos enrolamentos, tais como deslocamentos e alongamentos axiais. Neste tipo de defeitos apenas é possível apresentar resultados de simulação, pois o transformador experimental não permite introduzir deformações nos enrolamentos.

Posteriormente serão apresentados os casos relativos a defeitos de isolamento, nomeadamente curtos-circuitos entre espiras. Nestas situações serão apresentados resultados experimentais, mas com algumas condicionantes na realização dos ensaios (limitação da corrente de defeito por forma a preservar a integridade do transformador).

Para evitar repetições desnecessárias será só considerado o caso da ligação Dyn11, que inclui a generalidade das condições a analisar.

### 5.2.1. Deformações mecânicas nos enrolamentos

Nos transformadores, a deformação do enrolamento pode ocorrer devido a vários motivos, como mudanças de temperatura, esforços eletromecânicos e vibrações. Esta deformação pode levar a uma falha no isolamento dos enrolamentos e conseqüente curto-circuito entre as partes ativas.

Quando a deformação do enrolamento resulta num curto-circuito entre espiras a corrente de defeito provoca um aumento da temperatura e à deterioração adicional do isolamento. Esta reação em cadeia pode levar à falha completa do transformador.

Durante a operação normal de um transformador as forças eletromagnéticas geradas nos enrolamentos são relativamente reduzidas, estando muito abaixo dos valores máximos admissíveis definidos no dimensionamento da máquina. Quando ocorre uma sobrecarga significativa ou um curto-circuito externo as forças eletromagnéticas podem atingir valores muito elevados, as quais são proporcionais ao quadrado da corrente [18]-[20], podendo levar à destruição mecânica do transformador.

As forças magnéticas nos enrolamentos são representadas na Figura 62 [18]. Considerando o sentido das correntes conforme indicado, nota-se que a força é perpendicular às linhas de fluxo e segue a sua curvatura. A meio da altura dos enrolamentos é produzida uma força predominantemente radial, que tende a afastar os

enrolamentos. Nas extremidades dos enrolamentos a força tem uma componente axial, que comprime verticalmente os enrolamentos. As forças eletromagnéticas nos enrolamentos do transformador podem ser assim subdivididas nestas duas componentes:

- Forças radiais: provocam forças de compressão no enrolamento interior e de alongamento no enrolamento exterior. A consequência mais frequente é a deformação (encurvamento) do enrolamento interior, que pode ser de dois tipos, livre ou forçado, Figura 63(a) e (b) [2], [18], [20].
- Forças axiais: estas forças são geradas paralelamente à altura do enrolamento. O modo de falha caracteriza-se tipicamente pela inclinação dos condutores (*tilting*), Figura 63(c), curvatura das espiras entre espaçadores, Figura 63(d), efeito telescópico com deslocamento axial de espiras e/ou colapso axial do enrolamento [2], [18], [20].

A existência de uma pequena assimetria vertical entre as bobinas provoca um aumento significativo nas forças axiais nos dois enrolamentos [18].

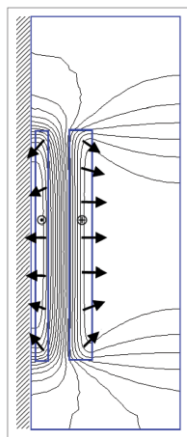


Figura 62 – Linhas de fluxo e forças magnéticas [18].

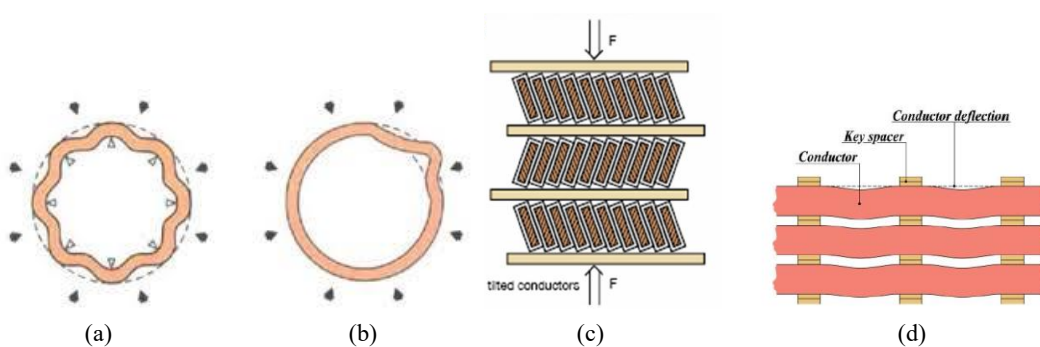


Figura 63 – Efeitos típicos de forças nos enrolamentos do transformador: (a) encurvamento forçado; (b) encurvamento livre; (c) inclinação de condutores; (d) curvatura de condutores entre espaçadores [20].

As deformações mecânicas dos enrolamentos podem constituir defeitos latentes, que não provocam imediatamente alterações perceptíveis no funcionamento do transformador. De facto, a experiência mostra que um transformador com os enrolamentos parcialmente deformados pode manter-se em serviço durante muito tempo, mas com reduzida fiabilidade [21]. Estes defeitos podem permanecer praticamente indetetáveis até que ocorra uma outra perturbação, externa ou interna, que desencadeie e/ou acelere o colapso das estruturas da máquina, conduzindo normalmente à destruição do transformador. A deteção precoce destas anomalias é essencial para salvaguardar a integridade física do transformador, pretendendo este trabalho contribuir com um novo método de diagnóstico.

#### 5.2.1.1. Deslocamento ascendente do enrolamento de 230 V da fase A

Foi introduzido um deslocamento no enrolamento primário da fase A para analisar a distribuição do fluxo homopolar. O enrolamento primário (interno) sofreu um deslocamento ascendente de 5.9 mm, Figura 64. O transformador foi alimentado com a tensão nominal em regime simétrico e no secundário foi ligada uma carga trifásica equilibrada, com 48  $\Omega$  por fase. As correntes e tensões nos enrolamentos não sofrem alterações significativas em relação ao caso de funcionamento normal, sendo esses resultados aqui omitidos.

As tensões induzidas nas bobinas de teste são afetadas pela presença do defeito, conforme apresentado Figura 65 e na Figura 66. Na Tabela 14 são representados os valores eficazes das respetivas tensões induzidas nas bobinas de teste. Devido ao deslocamento do enrolamento nota-se que ocorre uma alteração na tensão das bobinas de teste mais próximas do local do defeito (lado esquerdo, topo e base). A monitorização destes sinais constitui assim um indicador da presença do defeito.

A análise dos resultados permite também concluir que os sinais de tensão nas bobinas de teste já não apresentam simetria vertical, entre a parte superior e inferior do transformador. Esta característica permite discriminar entre desequilíbrios externos (como por exemplo o ensaio com alimentação assimétrica apresentado anteriormente) e deformações nos enrolamentos.

Esta configuração das bobinas de teste designa-se por “configuração separada”, pois todos os 18 sinais são obtidos e analisados individualmente.

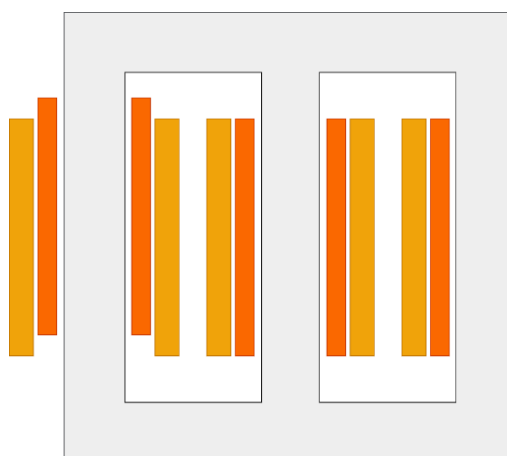


Figura 64 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento primário (interno), fase A.

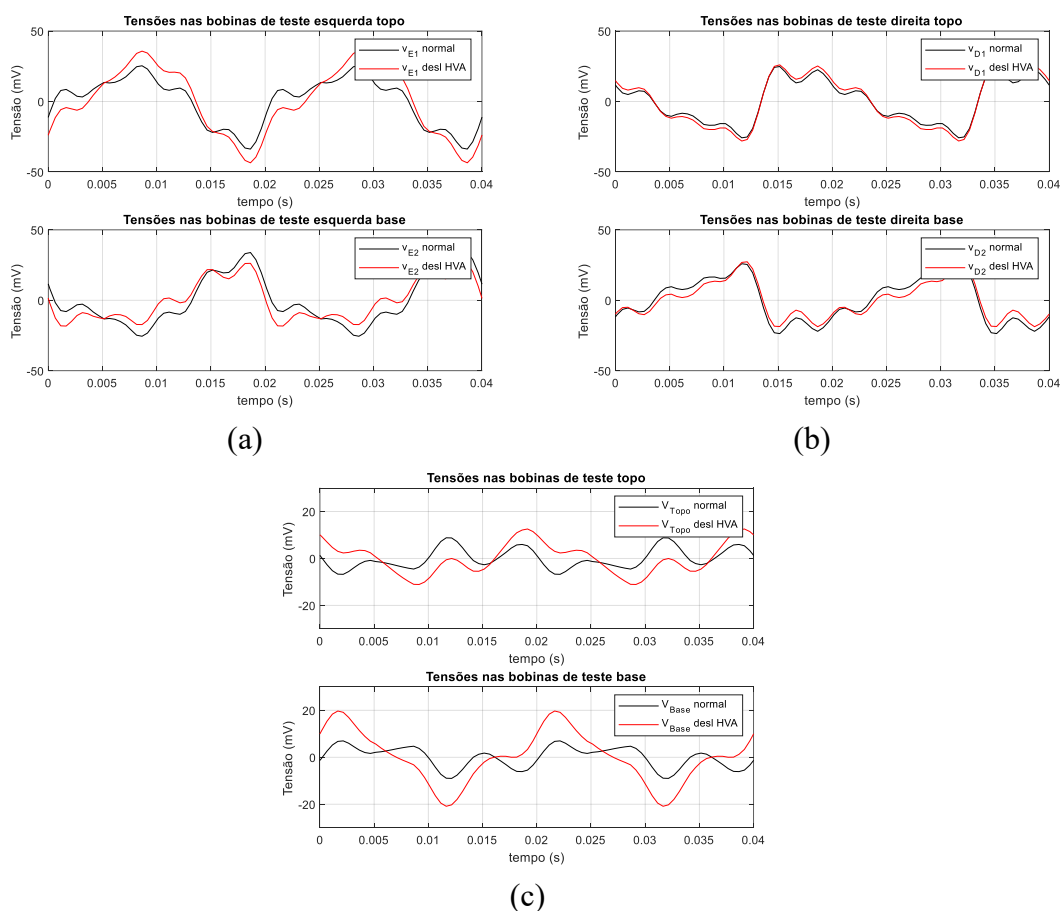


Figura 65 – Tensão nas bobinas de teste: (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

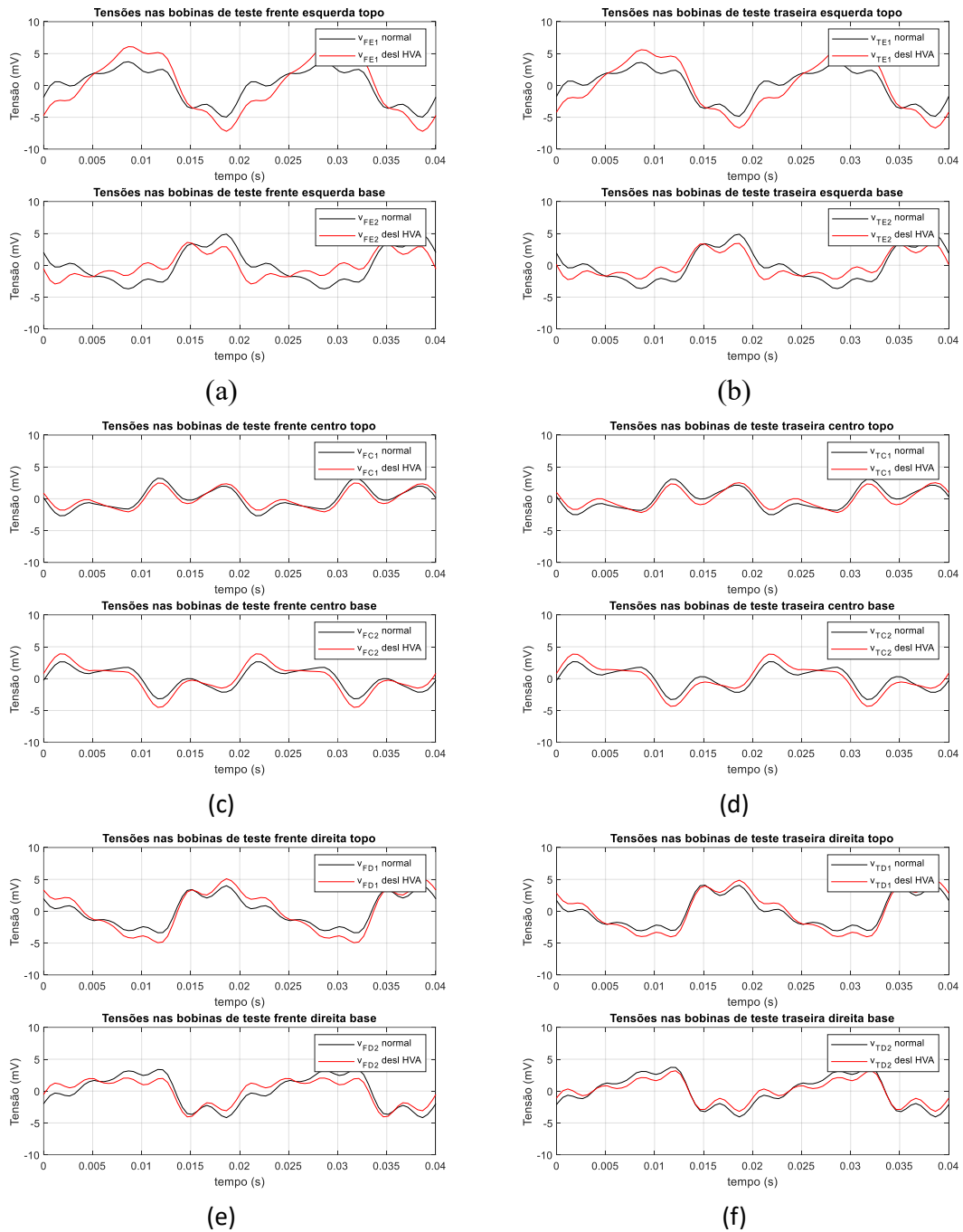


Figura 66 – Tensão nas bobinas de teste: (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Tabela 14 – Valor eficaz das tensões obtidas aos terminais das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

<b>Bobinas de teste nas laterais, topo e base</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{E1}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
<b>Normal</b>	17.09	17.06	15.31	15.00	4.29	4.50
<b>Deformação</b>	23.12	14.42	17.34	13.01	6.46	11.11
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	35.3	-15.5	13.3	-13.3	50.6	146.9
<b>Bobinas de teste frontais</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
<b>Normal</b>	2.62	2.58	1.61	1.67	2.34	2.44
<b>Deformação</b>	4.22	1.88	1.41	2.18	3.16	1.96
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	61.1	-27.1	-12.4	30.5	35.0	-19.7
<b>Bobinas de teste na traseira</b>						
<b>Resultados</b>	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
<b>Normal</b>	2.56	2.56	1.63	1.66	2.46	2.38
<b>Deformação</b>	3.87	1.90	1.41	2.18	3.00	1.77
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	51.2	-25.8	-13.5	31.3	22.0	-25.6

A diminuição (ou ausência) da simetria nas tensões induzidas pode ser utilizada para realçar a presença da deformação no enrolamento. De facto, somando-se a tensão induzida na bobina da parte superior com a correspondente da parte inferior, obtêm-se os seguintes sinais:

$$v_H = v_{topo} + v_{base} \quad (5.23)$$

$$v_E = v_{E1} + v_{E2} \quad (5.24)$$

$$v_D = v_{D1} + v_{D2} \quad (5.25)$$

$$v_{FE} = v_{FE1} + v_{FE2} \quad (5.26)$$

$$v_{TE} = v_{TE1} + v_{TE2} \quad (5.27)$$

$$v_{FC} = v_{FC1} + v_{FC2} \quad (5.28)$$

$$v_{TC} = v_{TC1} + v_{TC2} \quad (5.29)$$

$$v_{FD} = v_{FD1} + v_{FD2} \quad (5.30)$$

$$v_{TD} = v_{TD1} + v_{TD2} \quad (5.31)$$

Estes sinais representam de facto a diferença entre as linhas de fluxo que atravessam a parte superior e a parte inferior da cuba. A deformação provoca uma assimetria na distribuição do fluxo, a qual pode ser detetada pela alteração das tensões induzidas nas bobinas de teste.

Cada um dos sinais de (5.23) a (5.31) representa, idealmente, a tensão induzida na associação-série das duas bobinas separadas ou, noutra perspetiva, a tensão induzida numa única bobina de teste com a área total igual à soma das áreas individuais de cada uma das bobinas envolvidas, conforme representado na Figura 67. A utilização destes sinais permite identificar mais facilmente as diferenças entre as condições de funcionamento com e sem defeito, conforme ilustrado na Figura 68. A Tabela 15 apresenta os correspondentes valores eficazes, verificando-se que as alterações nos sinais entre a situação normal e a situação de defeito atingem mais de 4000%. Os sinais mais afetados pelo defeito são aqueles associados às bobinas de teste que lhe estão mais próximas (bobinas de teste do lado esquerdo e horizontais, neste caso).

Com esta nova configuração das bobinas de teste (designada por diferencial) reduz-se para metade (18 para 9) o número de sinais a ser adquirido e analisado, simplificando-se o processo de aplicação do método de diagnóstico.

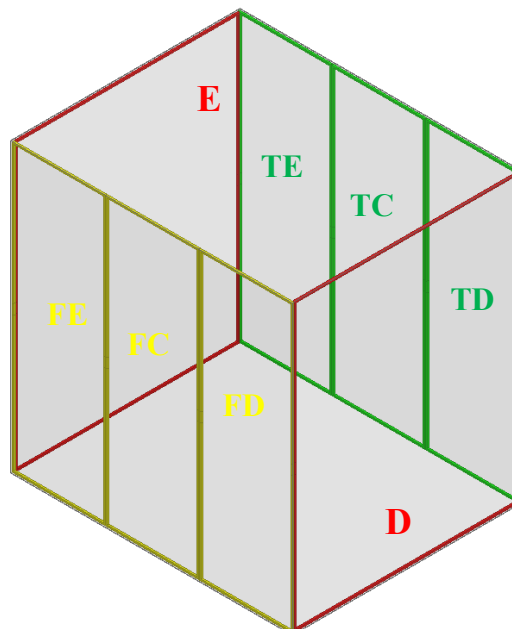


Figura 67 – Configuração diferencial das bobinas de teste (bobinas horizontais omitidas).

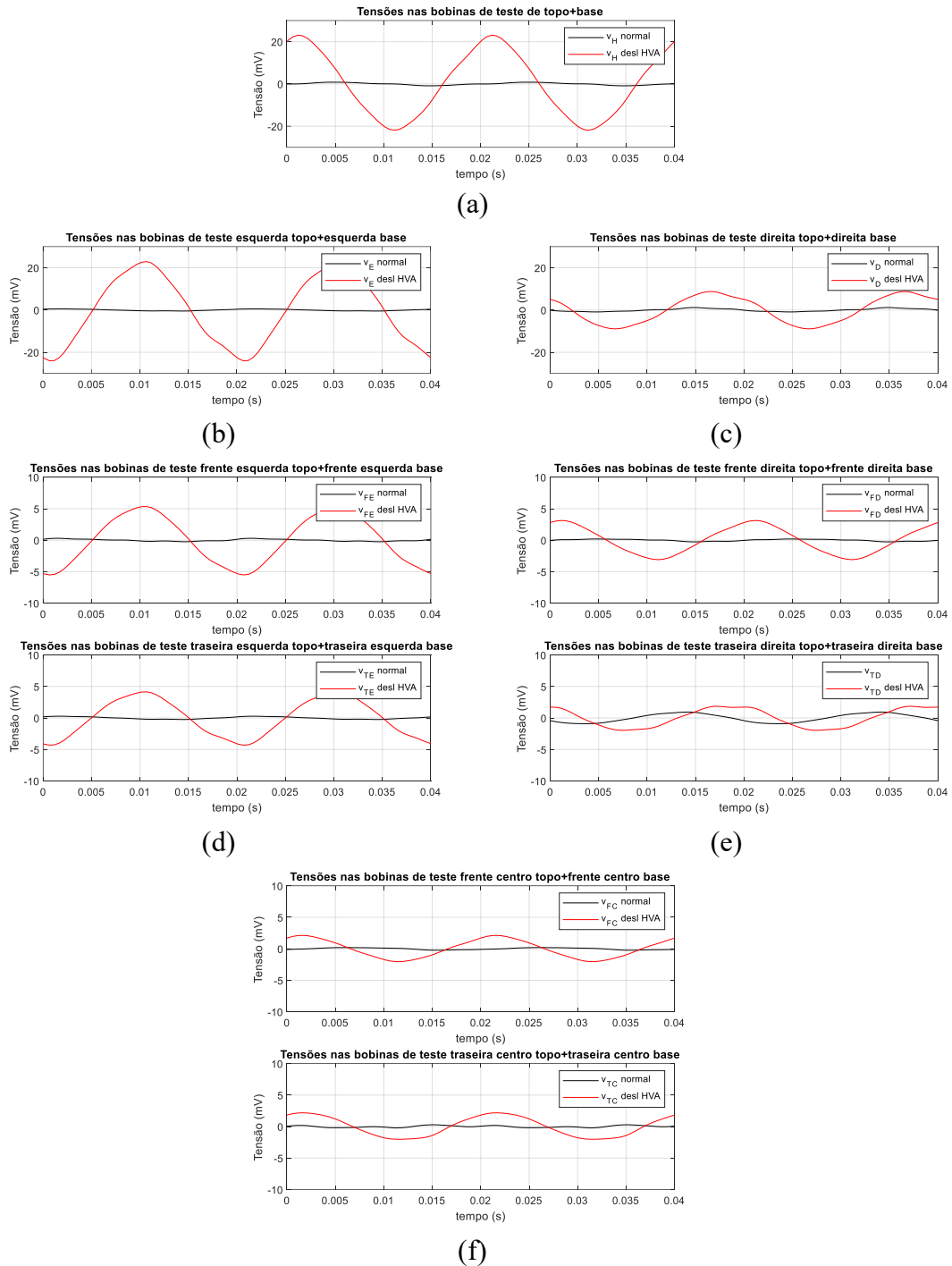


Figura 68 – Sinais das tensões aos terminais das bobinas de teste (configuração diferencial). Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Tabela 15 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste (configuração diferencial). Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Resultados	$V_H$ (mV)	$V_E$ (mV)	$V_D$ (mV)	$V_{FE}$ (mV)	$V_{TE}$ (mV)	$V_{FC}$ (mV)	$V_{TC}$ (mV)	$V_{FD}$ (mV)	$V_{TD}$ (mV)
Normal	0.52	0.36	0.65	0.16	0.18	0.14	0.15	0.14	0.65
Deformação	15.24	15.98	6.07	3.76	2.91	1.41	1.54	2.10	1.41
$\Delta V$ (%)	2830.8	4338.9	833.8	2250.0	1516.7	907.1	926.7	1400.0	116.9

O número de sinais a adquirir pode ainda ser mais reduzido, associando os sinais de todas as bobinas do lado esquerdo, do centro e do lado direito, mais concretamente:

$$v_{Etotal} = v_E + v_{FE} + v_{TE} \quad (5.32)$$

$$v_{Ctotal} = v_{FC} + v_{TC} \quad (5.33)$$

$$v_{Dtotal} = v_D + v_{FD} + v_{TD} \quad (5.34)$$

Desta forma o número de sinais a processar reduz-se a 4:  $v_{Etotal}$ ,  $v_{Ctotal}$ ,  $v_{Dtotal}$  e  $v_H$  (note-se que se continua a utilizar-se aqui o sinal  $v_H$  proveniente da associação-série das bobinas de topo e base). Neste caso poder-se-ia utilizar apenas 4 bobinas de teste, conforme representado na Figura 69. Estes sinais continuam a representar a diferença das linhas de fluxo entre as partes superior e inferior da cuba, ou seja, identificam assimetrias na distribuição do fluxo, mas agora as bobinas estão agrupadas por zonas. Para distinguir das configurações anteriores designa-se esta por “configuração agrupada”.

A evolução temporal das tensões induzidas é ilustrada na Figura 70, com os correspondentes valores eficazes apresentados na Tabela 16. Com as bobinas agrupadas o aumento do fluxo homopolar faz-se sentir nos 4 sinais analisados, mas o deslocamento do enrolamento provoca uma tensão muito superior do lado esquerdo, permitindo identificar o defeito e a sua zona de ocorrência (aumento superior a 30 vezes).

Obviamente, ao agrupar-se todos os 18 sinais em apenas 4 perde-se alguma informação que pode ser relevante para análises mais detalhadas.

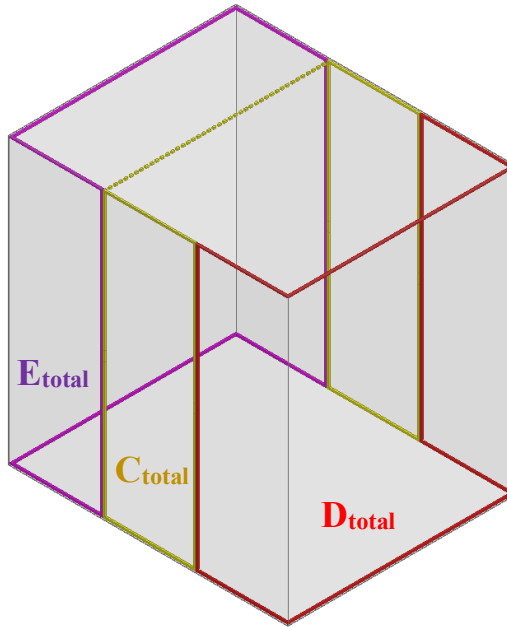


Figura 69 – Configuração agrupada das bobinas de teste.

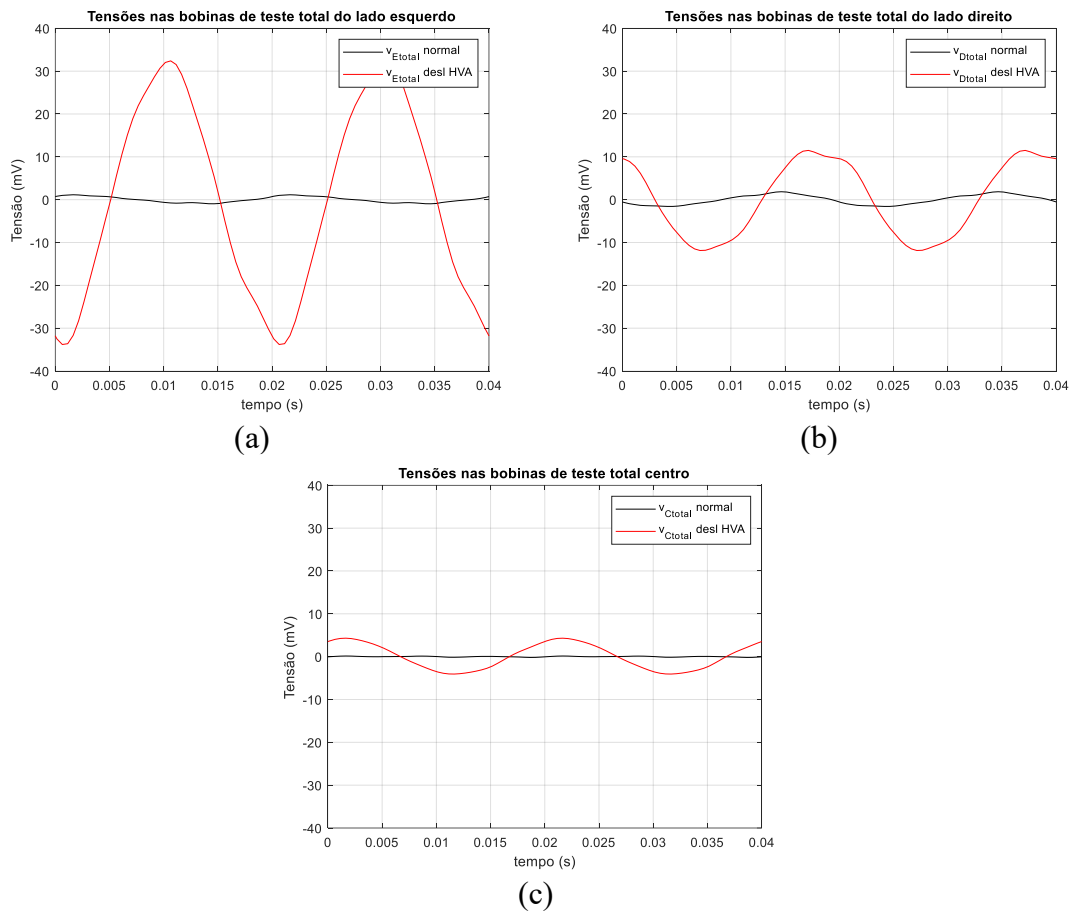


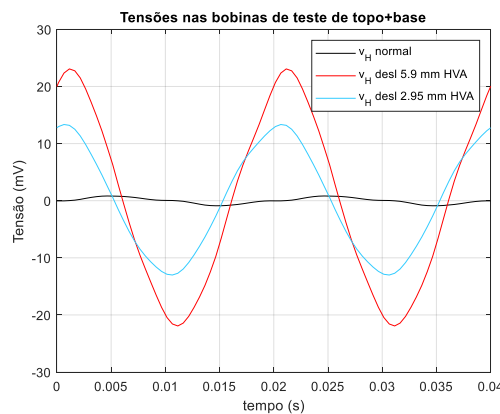
Figura 70 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Tabela 16 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	22.64	2.94	8.46	15.24
$\Delta V$ (%)	3181.2	3166.7	648.7	2830.8

#### 5.2.1.1.1. Influência da severidade do defeito nas tensões nas bobinas de teste

As tensões induzidas nas bobinas de teste permitem também identificar a severidade da avaria. Na Figura 71 apresentam-se uma comparação entre o caso anterior e um deslocamento ascendente de 2.95 mm do enrolamento primário da fase A (metade da deformação da situação precedente, ou seja, com menor severidade). Verifica-se que o sinal mais relevante para a identificação da presença deste tipo de defeito ( $v_{Etotal}$ ) aumenta com a deformação do enrolamento, permitindo identificar a severidade da avaria. A mesma conclusão se pode retirar do gráfico da Figura 72, que apresenta uma comparação entre o valor eficaz das tensões induzidas nas bobinas de teste (configuração agrupada) para as condições normal versus deslocamentos de 2.95 mm e 5.9 mm.



(a)

Figura 71 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 2.95 mm e 5.9 mm do enrolamento primário da fase A (continua na página seguinte).

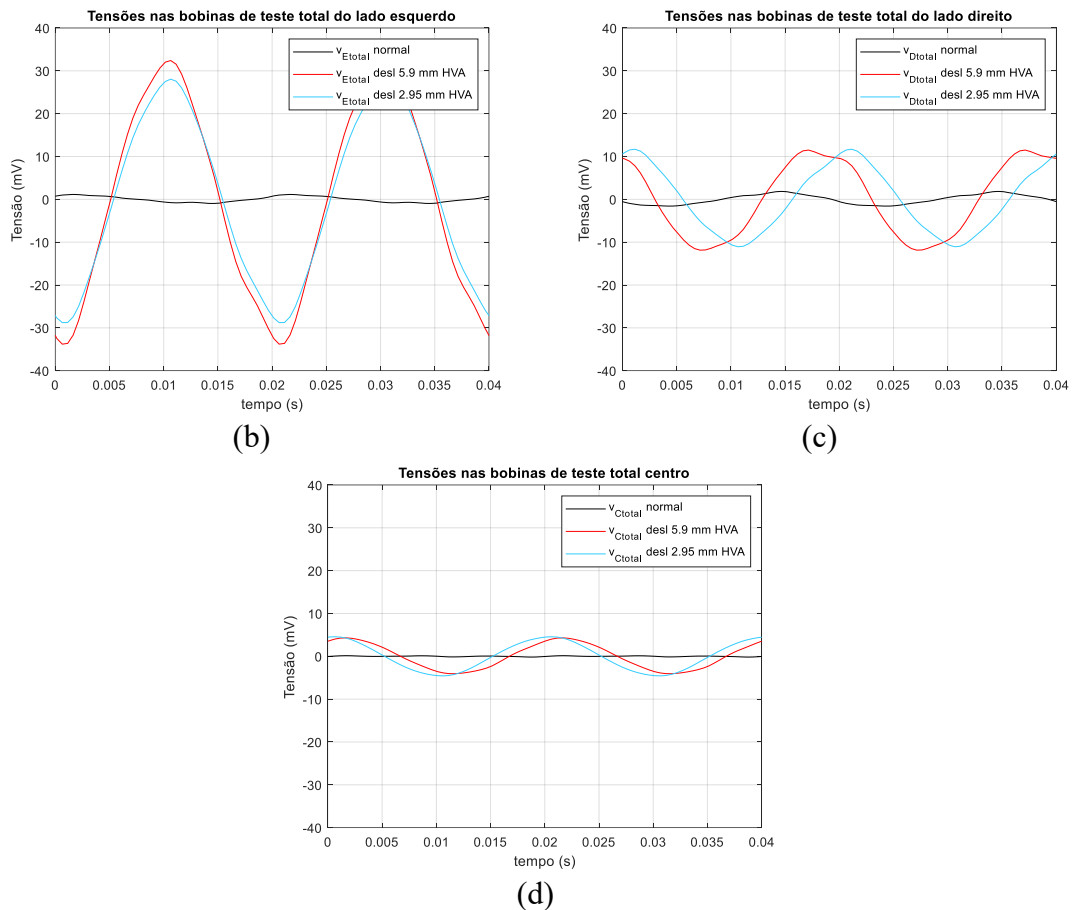


Figura 71 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 2.95 mm e 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

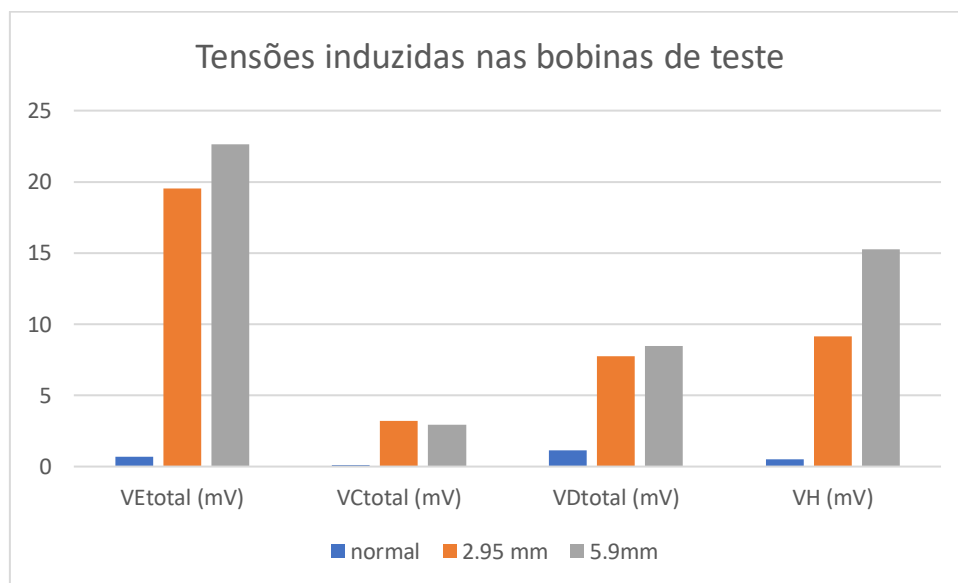


Figura 72 – Comparação do valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste (configuração agrupada) para deslocamentos ascendente de 2.95 mm e 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

### 5.2.1.2. Deslocamento ascendente do enrolamento de 230 V da fase B

Caso o deslocamento do enrolamento ocorra na fase B (coluna central), Figura 73, o comportamento dos fluxos homopolares e, conseqüentemente, das tensões induzidas nas bobinas de teste, é análogo à situação anterior. Neste caso a detecção do defeito é possível através da análise dos sinais de tensão induzida nas bobinas de teste horizontais e localizadas na zona central ( $v_H$ , e  $v_{Ctotal}$ , respetivamente). A Figura 74 ilustra os resultados obtidos para o caso da configuração agrupada e a Tabela 17 apresenta os correspondentes valores eficazes. Verifica-se que  $v_{Ctotal}$  e  $v_H$  (este último com menor variação) identificam claramente a ocorrência da deformação no enrolamento.

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo II.

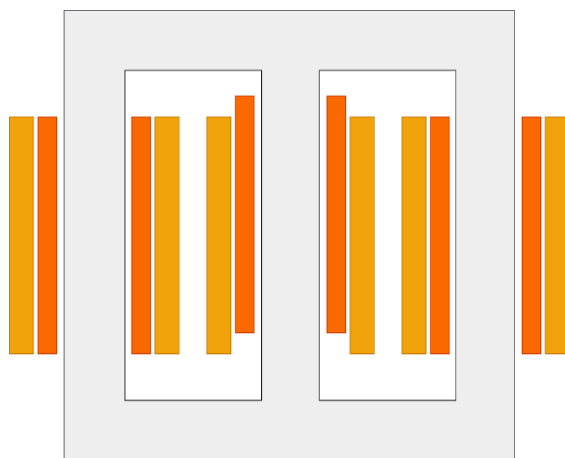


Figura 73 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento primário (interno), fase B.

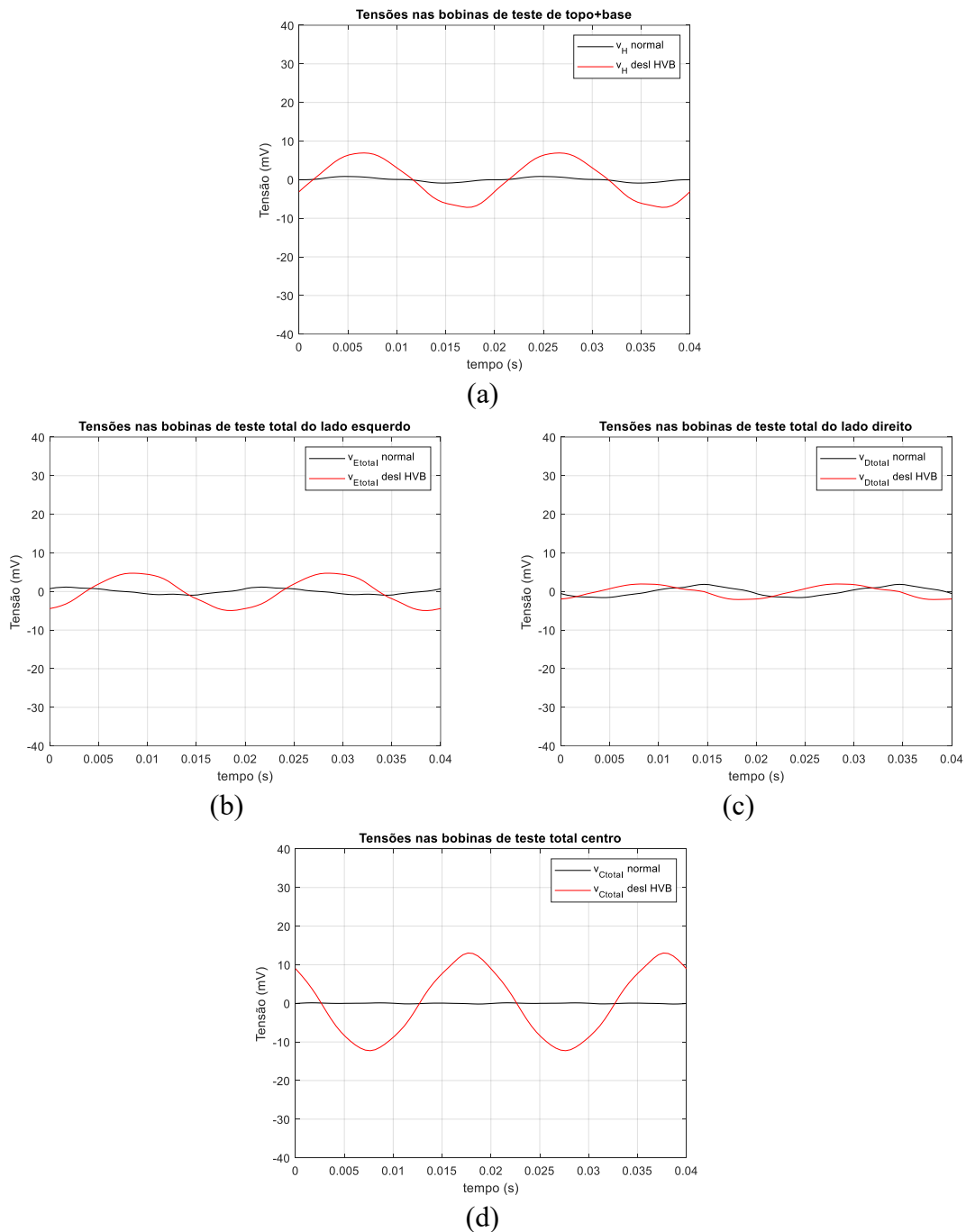


Figura 74 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase B.

Tabela 17 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase B.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	3.47	8.65	1.41	4.98
$\Delta V$ (%)	402.9	9511.1	24.8	857.7

### 5.2.1.3. Deslocamento ascendente do enrolamento de 230 V da fase C

No caso da deformação ocorrer na fase C, Figura 75, obtêm-se resultados análogos aos anteriores. Os sinais  $v_{Dtotal}$  e  $v_H$  (este último com menor alteração) são indicadores da ocorrência da deformação no enrolamento. A Figura 76 e a Tabela 18 apresentam os resultados obtidos para o caso da configuração agrupada. Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial são apresentados no Anexo III.

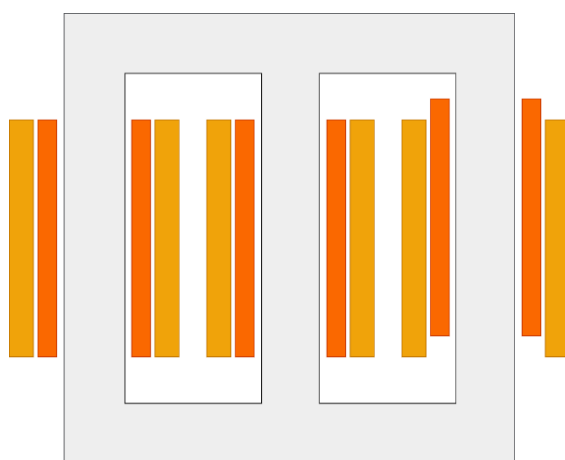
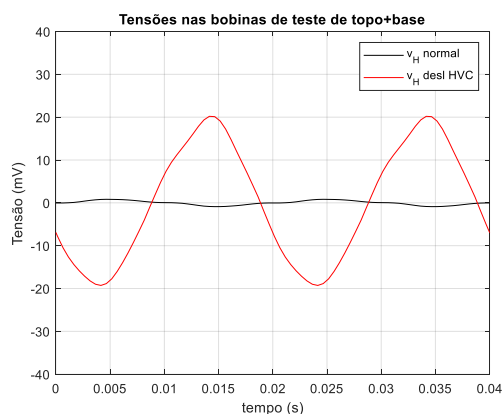


Figura 75 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento primário (interno), fase C.



(a)

Figura 76 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase C (continua na página seguinte).

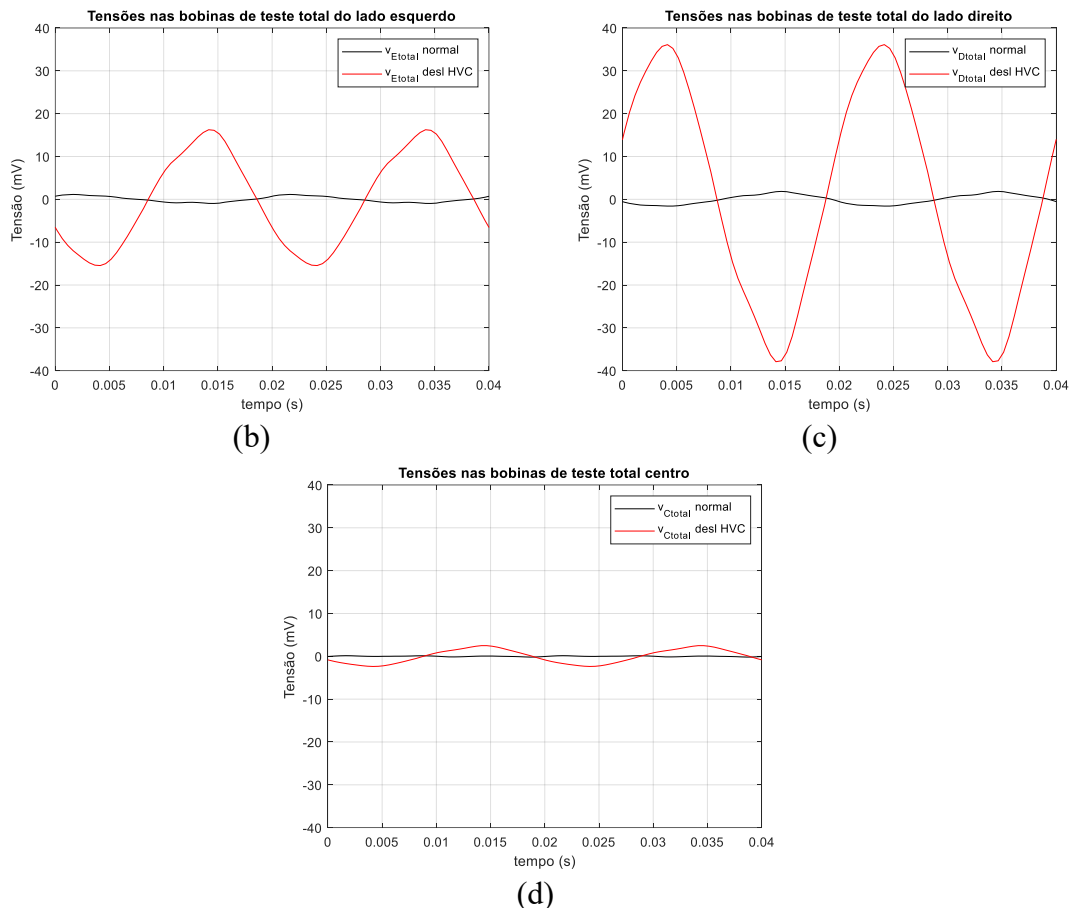


Figura 76 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase C.

Tabela 18 – Valor eficaz das tensões nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase C.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	10.80	1.63	25.15	13.42
$\Delta V$ (%)	1465.2	1711.1	2125.7	2480.8

#### 5.2.1.4. Deslocamento descendente do enrolamento de 230 V da fase A

Se ocorrer um deslocamento no sentido descendente obtêm-se também resultados análogos aos anteriores. Para esta situação os resultados obtidos são apresentados na Figura 77 e a Tabela 19 (deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento de 230 V da fase A, configuração agrupada), aplicando-se aqui a mesma análise de resultados exposta anteriormente. Destaca-se aqui a particularidade dos sinais das tensões nas bobinas de teste estarem invertidos em relação ao deslocamento ascendente.

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo IV.

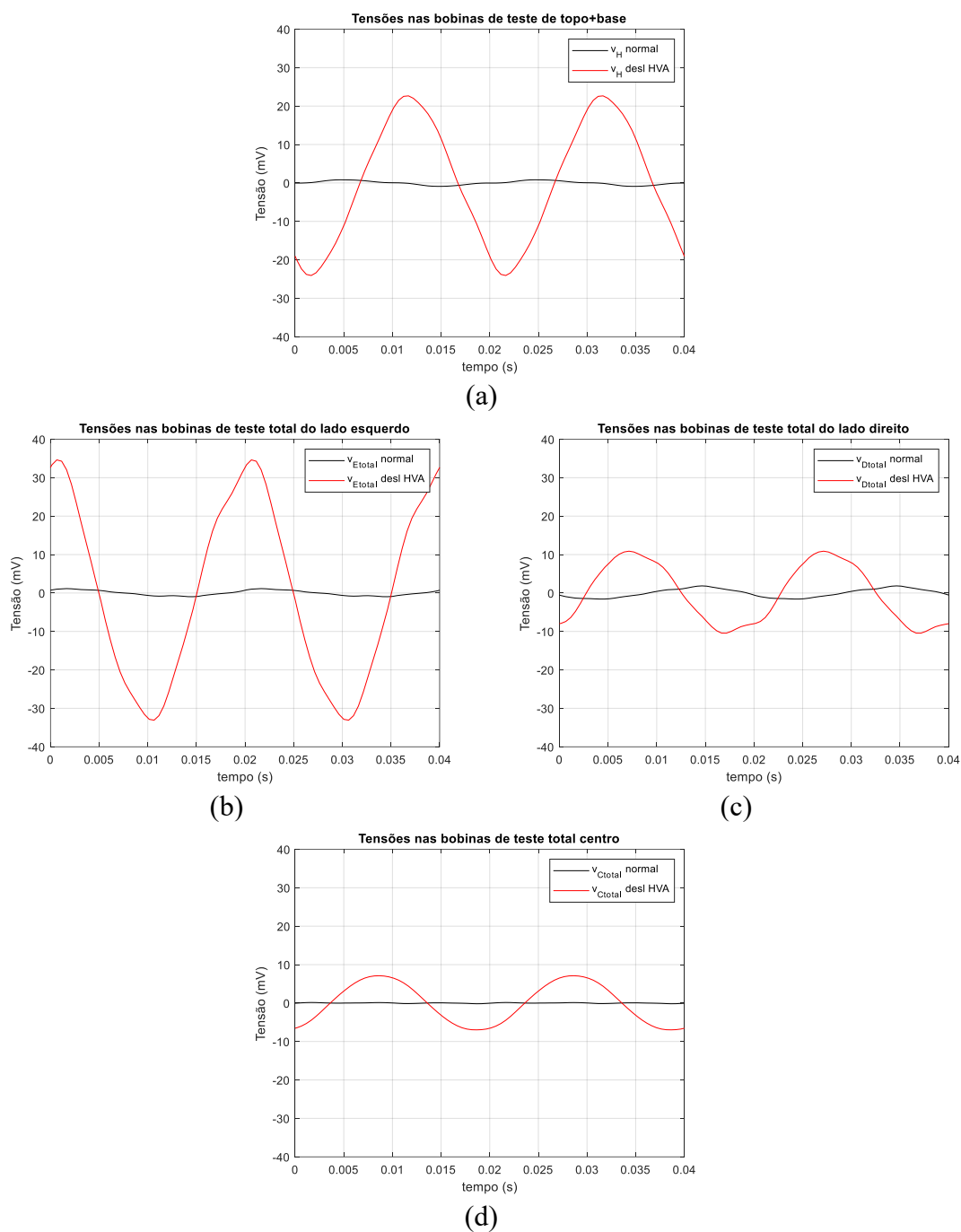


Figura 77 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Tabela 19 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	23.20	5.11	7.52	15.89
$\Delta V$ (%)	3262.3	5577.8	565.5	2955.8

### 5.2.1.5. Deslocamento ascendente do enrolamento de 132 V da fase A

Não existem também diferenças significativas se for o enrolamento secundário (externo) a sofrer um deslocamento, Figura 78. Para esta situação os resultados obtidos são apresentados na Figura 79 e a Tabela 20 (deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento de 132 V da fase A, configuração agrupada). Também aqui os sinais das tensões nas bobinas de teste estão invertidos em relação ao deslocamento ascendente do enrolamento primário (interno).

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo V.

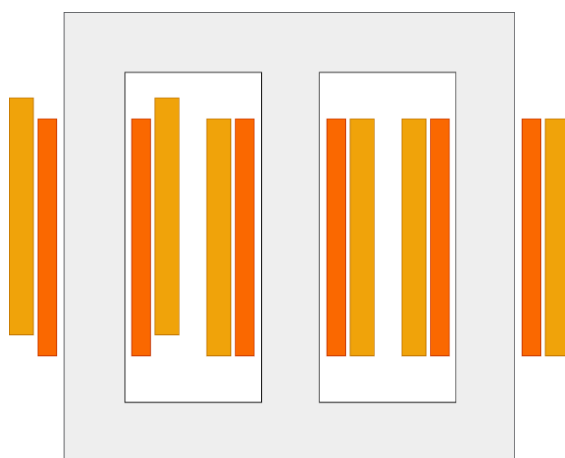
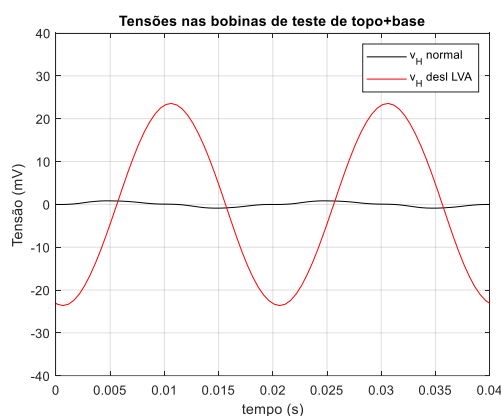


Figura 78 – Deslocamento axial ascendente do enrolamento secundário (externo), fase A.



(a)

Figura 79 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A (continua na página seguinte).

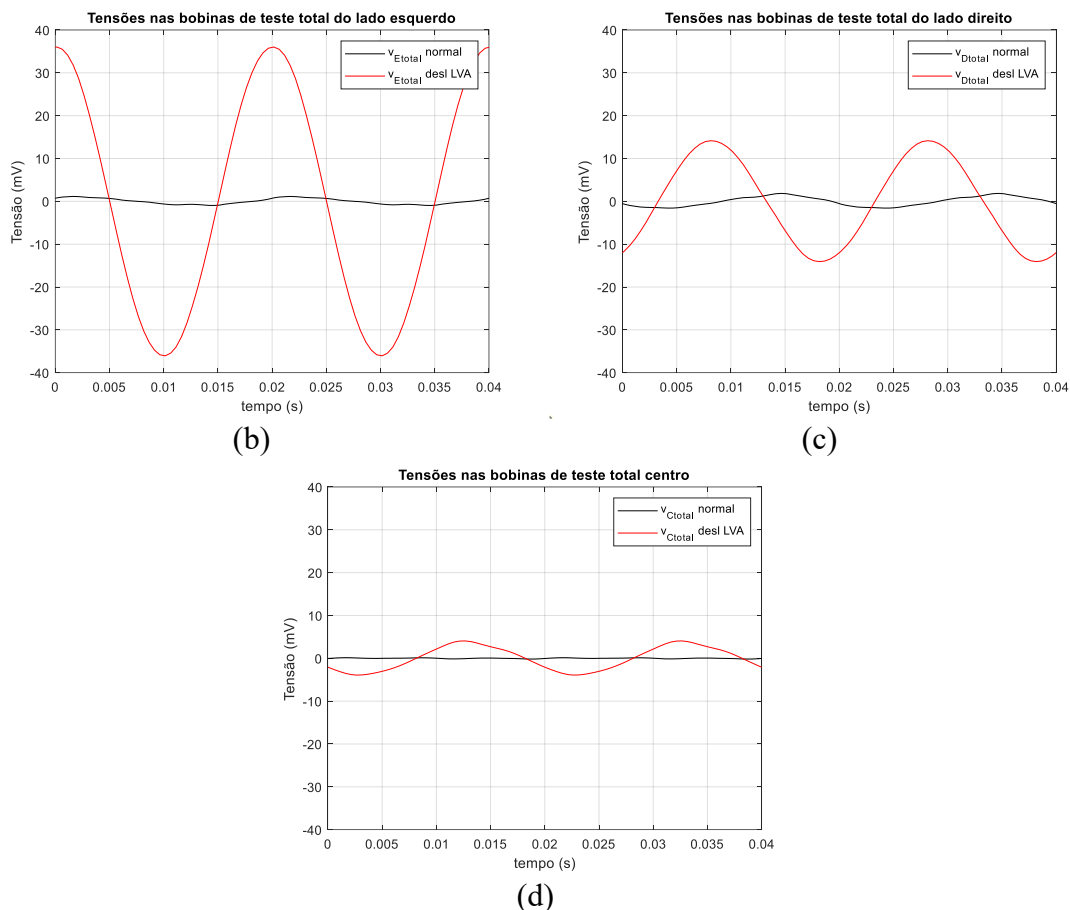


Figura 79 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A.

Tabela 20 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento ascendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	25.69	2.71	9.89	16.78
$\Delta V$ (%)	3623.2	2911.1	775.2	3126.9

### 5.2.1.6. Deslocamento descendente do enrolamento de 132 V da fase A

A ocorrência deste tipo de deformação provoca resultados análogos aos anteriores, sendo possível detetar o deslocamento o enrolamento através das tensões induzidas nas bobinas de teste (neste caso o melhor indicador baseia-se nos sinais das bobinas do lado esquerdo). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 80 e a Tabela 21 (deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento de 132 V da fase A, configuração agrupada).

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo VI.

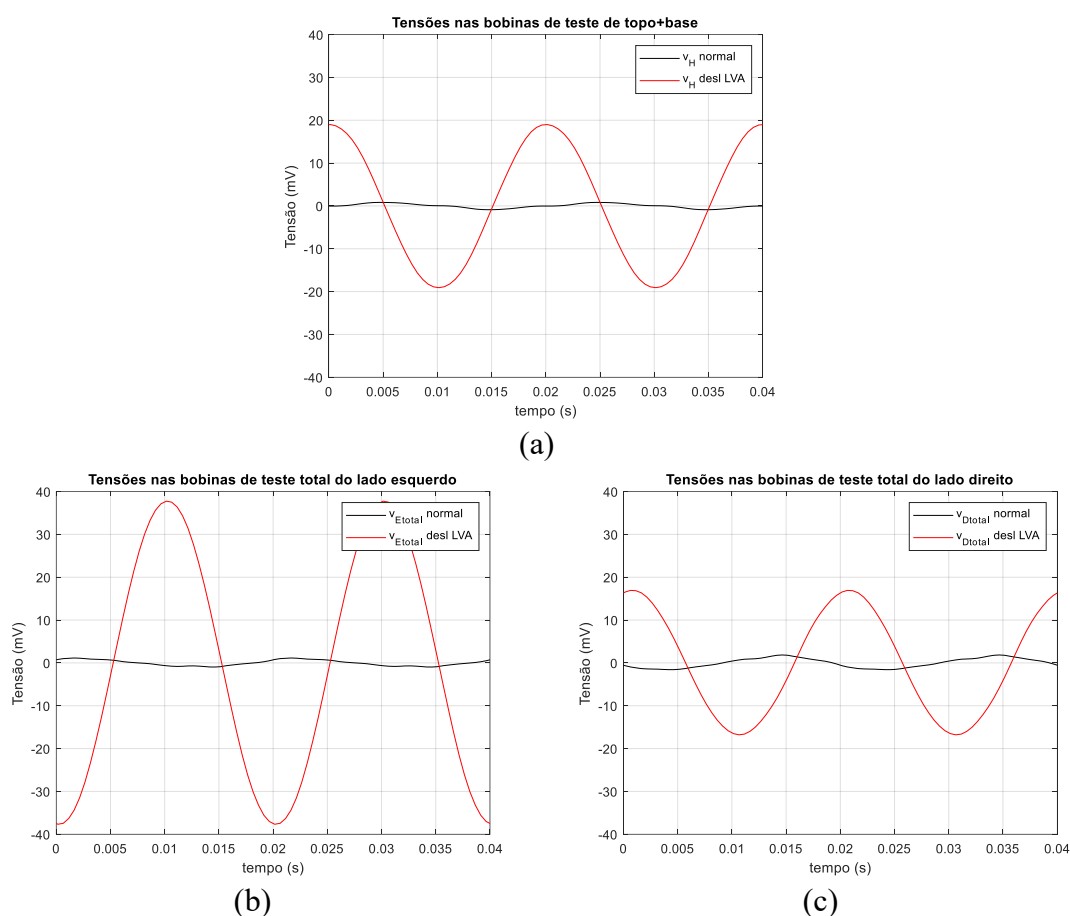
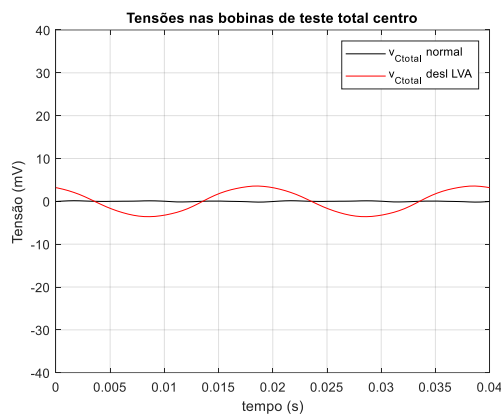


Figura 80 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A (continua na página seguinte).



(d)

Figura 80 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A.

Tabela 21 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento descendente de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A.

Resultados	$V_{Etot} \text{ (mV)}$	$V_{Ctotal} \text{ (mV)}$	$V_{Dtotal} \text{ (mV)}$	$V_H \text{ (mV)}$
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	26.92	2.56	11.98	13.60
$\Delta V \text{ (%)}$	3801.4	2744.4	960.2	2515.4

#### 5.2.1.7. Alongamento superior do enrolamento de 230 V da fase A

O alongamento de um enrolamento provoca uma assimetria menor na distribuição de fluxo que um deslocamento: no caso do alongamento (superior) a assimetria existe apenas no topo dos enrolamentos, enquanto no deslocamento a assimetria está presente no topo e na base. É assim expectável que as tensões induzidas nas bobinas sofram alterações menos significativas, comparativamente com o caso de referência, que nos casos anteriores. Adicionalmente, se o alongamento estiver localizado no enrolamento mais próximo do núcleo; como é o caso do enrolamento de 230 V, Figura 81, as linhas de fluxo fecham-se preferencialmente pelo caminho de menor relutância fornecido pelo circuito magnético. A conjugação destas duas condições resulta em menores alterações da tensão induzida nas bobinas de teste, comparativamente com o caso dos deslocamentos apresentados anteriormente. Os resultados obtidos para o caso de um alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento de 230 V da fase A são apresentados na Figura 82 e a Tabela 22 (configuração agrupada). Neste caso o melhor indicador da ocorrência da deformação é a tensão induzida na bobina central (aumento superior a 1600%) e não a tensão na bobina de teste mais próxima do defeito (esquerda), pois a localização do defeito provoca alterações menos significativas no fluxo radial.

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo VII.

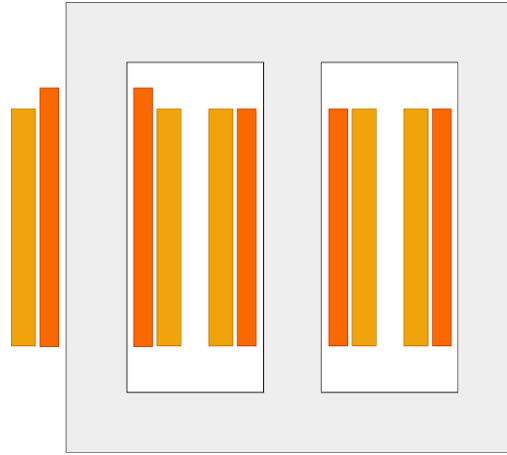


Figura 81 – Alongamento superior do enrolamento primário (interno), fase A.

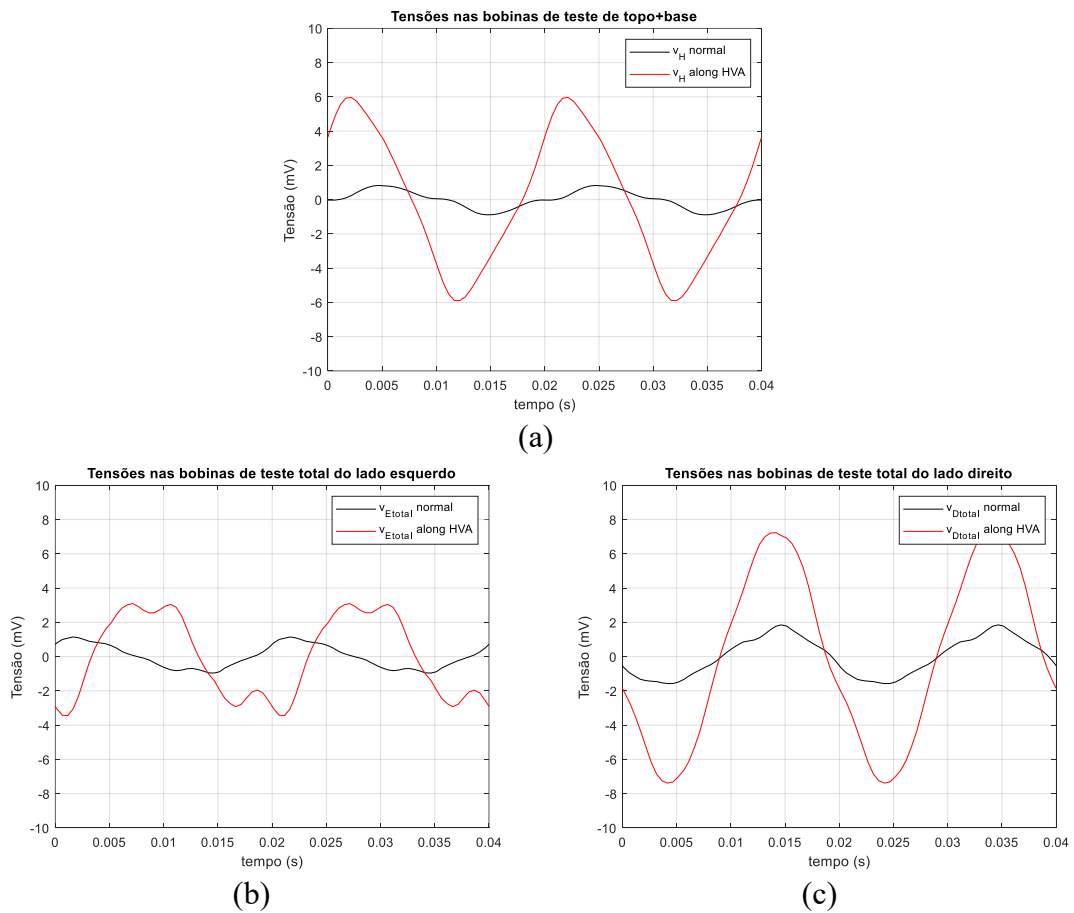
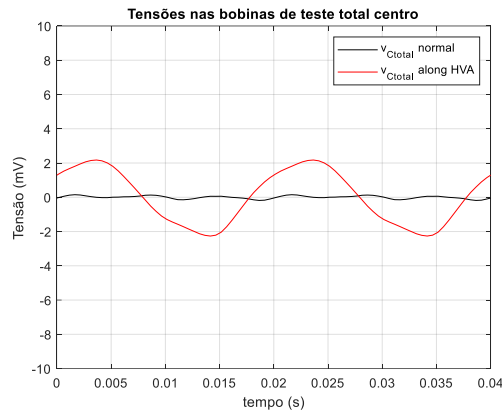


Figura 82 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A (continua na página seguinte).



(d)

Figura 82 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Tabela 22 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	2.37	1.55	5.05	3.90
$\Delta V$ (%)	243.5	1622.2	346.9	650.0

#### 5.2.1.8. Alongamento superior do enrolamento de 132 V da fase A

A ocorrência do alongamento no enrolamento exterior, Figura 83, provoca maiores alterações na distribuição do fluxo magnético, resultando numa maior variação das tensões induzidas nas bobinas de teste, particularmente naquelas que estão mais próximas do defeito, Figura 84 e Tabela 23. Da análise dos sinais verifica-se que o método de diagnóstico permite identificar a deformação, existindo um aumento da tensão  $V_{Etotal}$  de cerca de 17 vezes em relação ao valor da situação de referência.

A ocorrência de alongamento provoca um aumento no valor eficaz das tensões induzidas que corresponde a cerca de metade do obtido para o caso do deslocamento, o que é coerente com o grau de assimetria provocado por estas deformações (o alongamento provoca uma assimetria apenas numa extremidade e o deslocamento provoca assimetria nas duas extremidades).

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo VIII.

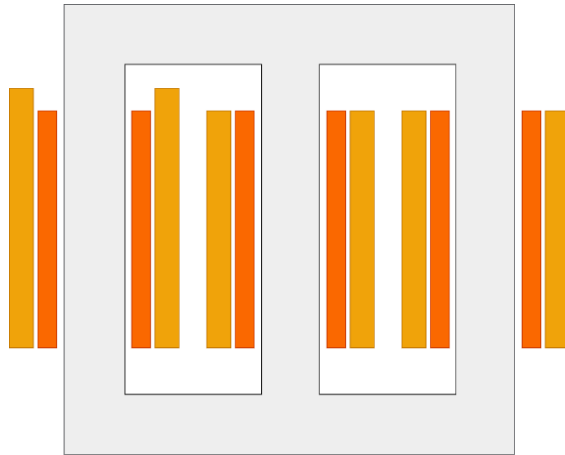


Figura 83 – Alongamento superior do enrolamento secundário (externo), fase A.

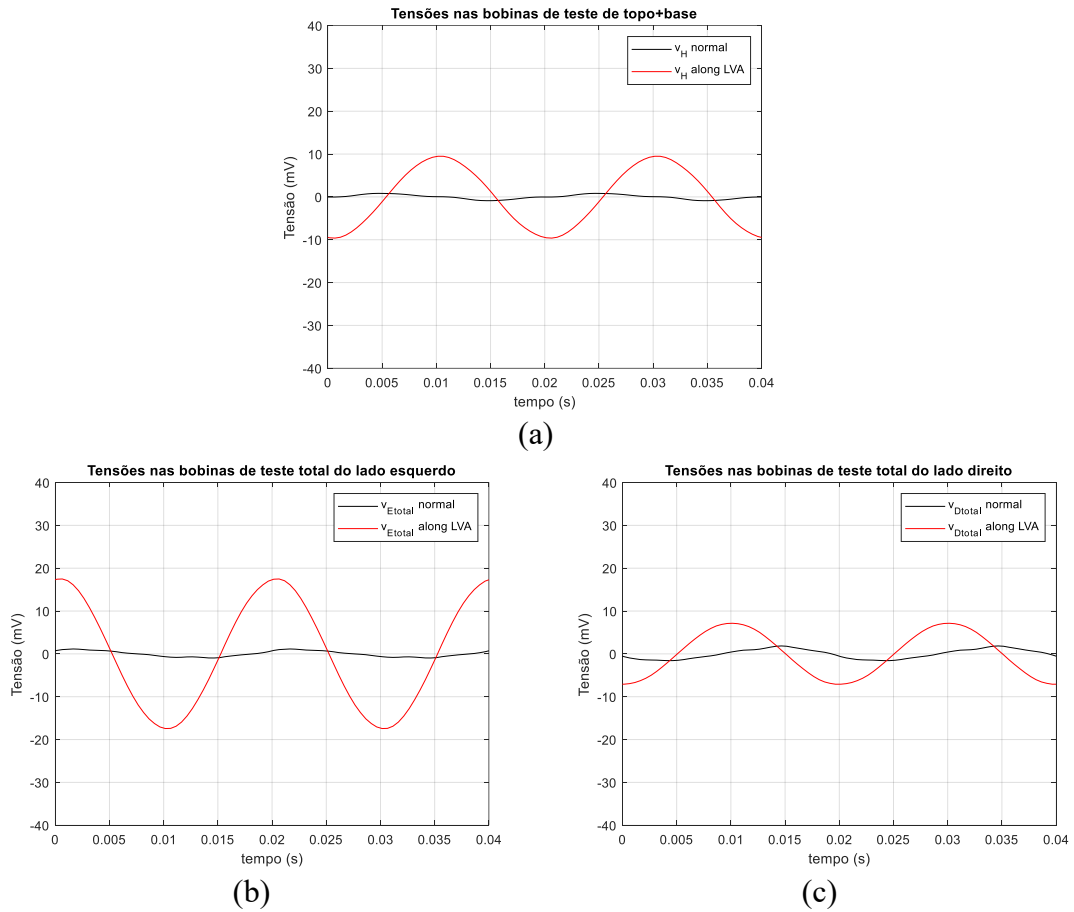
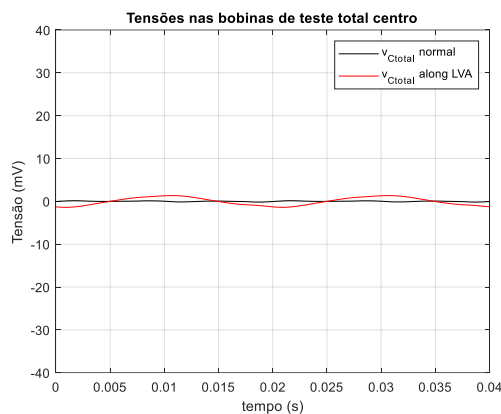


Figura 84 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A (continua na página seguinte).



(d)

Figura 84 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A.

Tabela 23 - Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento superior de 5.9 mm do enrolamento secundário da fase A.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	12.41	0.93	5.10	6.76
$\Delta V$ (%)	1698.6	933.3	351.3	1200.0

#### 5.2.1.9. Alongamento simétrico do enrolamento de 230 V da fase A

No caso de um alongamento com simetria vertical perfeita a identificação da deformação é possível, mas o método não possui a mesma sensibilidade comparativamente ao caso de modificações de geometria assimétricas. Nesta condição de funcionamento considerou-se que o enrolamento primário (interno) da fase A sofreu um alongamento superior e inferior de 5.9 mm, Figura 85.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 86 e na Tabela 24, considerando as bobinas de teste com a configuração agrupada. As tensões induzidas aumentam em todas as bobinas de teste, com maior variação nas horizontais e nas mais afastadas do defeito (central e direita), à semelhança do que ocorre no alongamento assimétrico analisado na Secção 5.2.1.7. O valor das tensões induzidas em todas as bobinas aumenta, em média, mais de 125%, o que é um indicador da presença da anomalia.

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo IX.

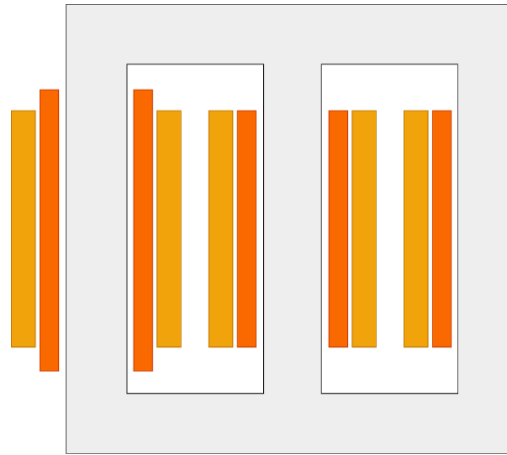


Figura 85 – Alongamento simétrico do enrolamento primário (interno), fase A.

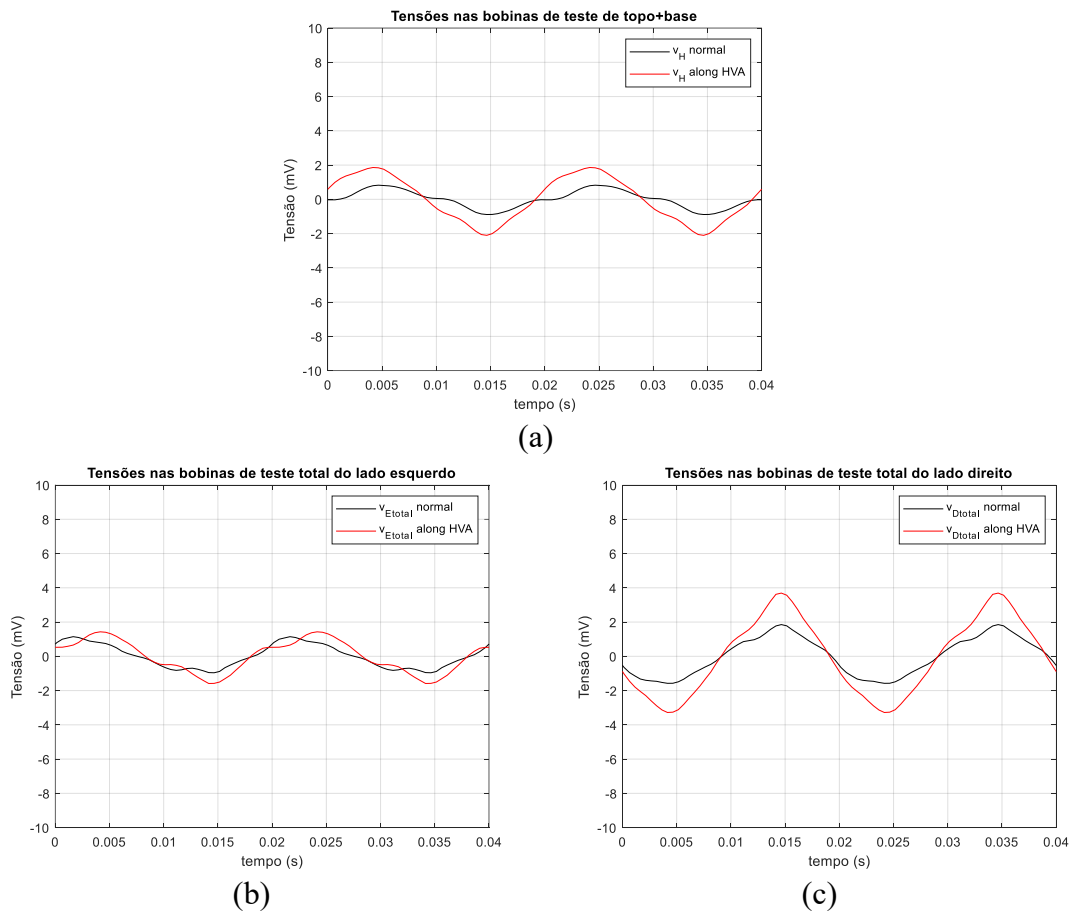
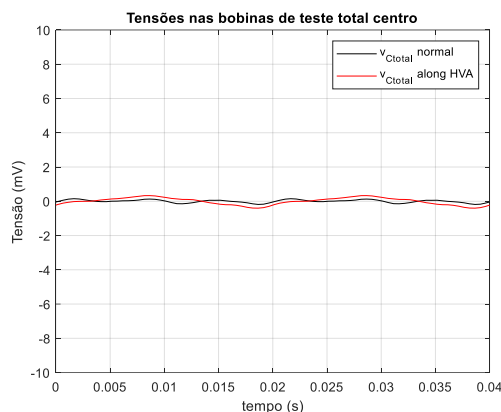


Figura 86 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento simétrico de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A (continua na página seguinte).



(d)

Figura 86 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento simétrico de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Tabela 24 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus alongamento simétrico de 5.9 mm do enrolamento primário da fase A.

Resultados	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Deformação	0.92	0.21	2.22	1.29
$\Delta V$ (%)	33.3	133.3	96.5	148.1

#### 5.2.1.10. Enrolamento de discos: deslocamento de um disco no enrolamento de 132 V da fase A

Os transformadores com enrolamentos em discos foram também considerados no estudo. Manteve-se o transformador com enrolamentos concêntricos, mas agora o enrolamento externo (132 V) foi alterado, sendo constituído por 5 discos, Figura 87. Foi analisado o impacto do deslocamento ascendente (5.9 mm) do disco superior da fase A, conforme ilustrado na Figura 87.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 88 e na Tabela 25, considerando as bobinas de teste com a configuração agrupada. As tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e do lado esquerdo são significativamente afetadas pela presença da deformação, constituindo um bom indicador do defeito.

Os resultados obtidos para as configurações detalhada e diferencial das bobinas de teste são apresentados no Anexo X.

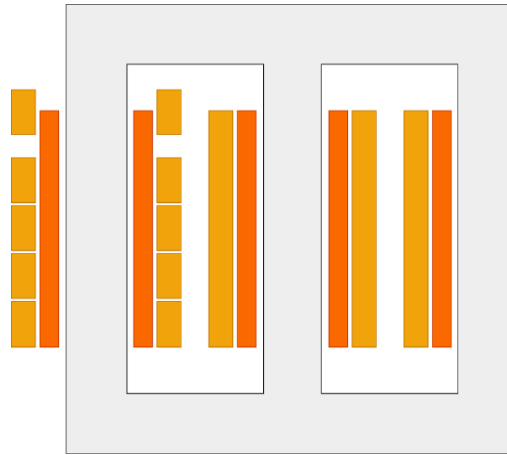
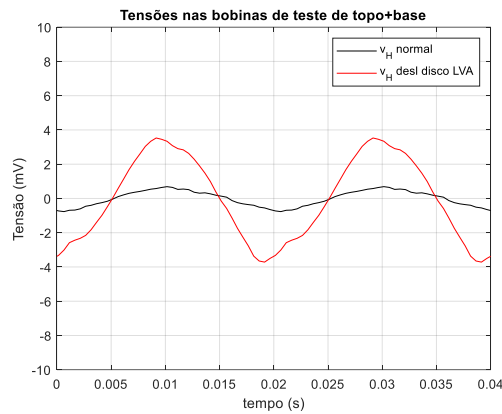
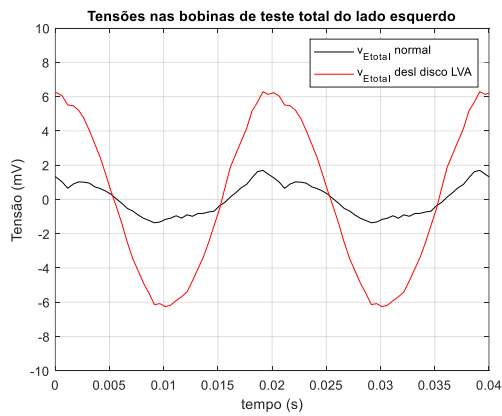


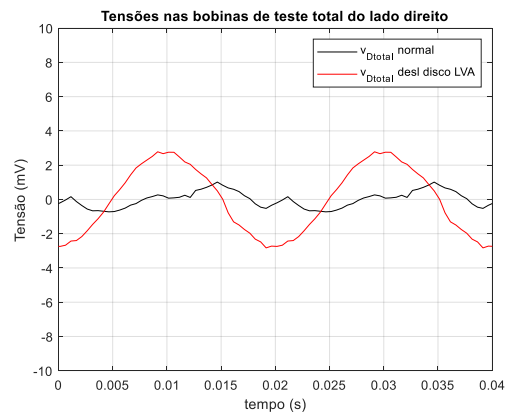
Figura 87 – Deslocamento axial ascendente do disco superior da fase A do enrolamento secundário (externo), fase A.



(a)

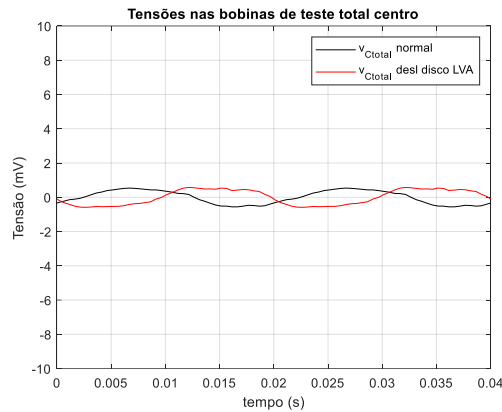


(b)



(c)

Figura 86 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento de 5.9 mm de um disco do enrolamento secundário da fase A (continua na página seguinte).



(d)

Figura 88 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento de 5.9 mm de um disco do enrolamento secundário da fase A.

Tabela 25 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus deslocamento de 5.9 mm de um disco do enrolamento secundário da fase A.

Resultados	$V_{Ettotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dttotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.94	0.39	0.48	0.46
Deformação	4.47	0.44	1.96	2.42
$\Delta V$ (%)	375.5	12.8	308.3	426.1

#### 5.2.1.11. Assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A

O transformador usado nos ensaios experimentais não permite introduzir deformações mecânicas nos enrolamentos. Para poder comparar os resultados de simulação com os resultados experimentais realizou-se um ensaio onde foram excluídas duas espiras no enrolamento primário da fase A (utilizaram-se 150 espiras em vez de 152), Figura 89. A ausência das 2 espiras resulta numa assimetria muito ligeira, pouco significativa comparativamente com as modificações geométricas dos deslocamentos e alongamentos apresentados anteriormente. Adicionalmente, esta condição de funcionamento inclui, em simultâneo, um desequilíbrio no sistema trifásico das forças magnetomotrizes nas três colunas. Consequentemente, a distribuição de fluxos resulta da conjugação destes dois tipos de assimetria, onde o impacto da deformação mecânica é disfarçado pelo desequilíbrio das forças magnetomotrizes.

Utilizou-se ligação Dyn11, tensão de alimentação nominal e simétrica, e carga resistiva equilibrada de 48  $\Omega$ . O modelo computacional utilizado nesta simulação tem uma geometria mais pormenorizada, pois foi incluído o detalhe das camadas no

enrolamento primário, conforme ilustrado na Figura 14(b), para tomar em consideração o local das espiras excluídas.

A Figura 90 ilustra a evolução temporal das correntes nos enrolamentos do transformador, notando-se algum desequilíbrio entre as três fases, em resultado do diferente número de espiras das fases dos enrolamentos primários.

As Figuras 91 e 92 ilustra a evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (configuração detalhada), verificando-se que existe, globalmente, uma boa concordância entre os resultados de simulação e computacionais. Todavia, verifica-se que os sinais experimentais apresentam uma componente de ruído não desprezável (utilizou-se neste caso uma frequência de corte de 2 kHz), a qual vai influenciar a análise de resultados, como se verá de seguida.

Comparativamente com o caso de referência (situação normal) o valor eficaz da tensão induzida aumenta em todas as bobinas de teste, Tabela 26. Por exemplo, a tensão na bobina de topo aumenta mais de 5 vezes nos resultados laboratoriais enquanto nos resultados de simulação aumenta cerca de 17 vezes. A presença de ruído e erros de medição nos sinais experimentais constitui a principal causa para estas diferenças no valor do aumento percentual. Não obstante, os sinais das tensões induzidas nas bobinas de teste permitem claramente identificar a presença de uma anomalia no transformador.

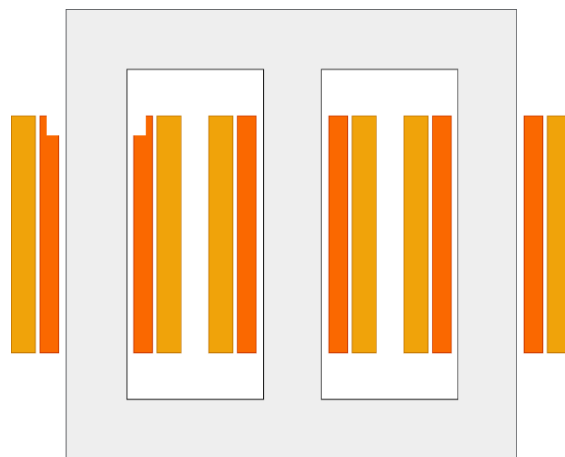


Figura 89 – Assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.

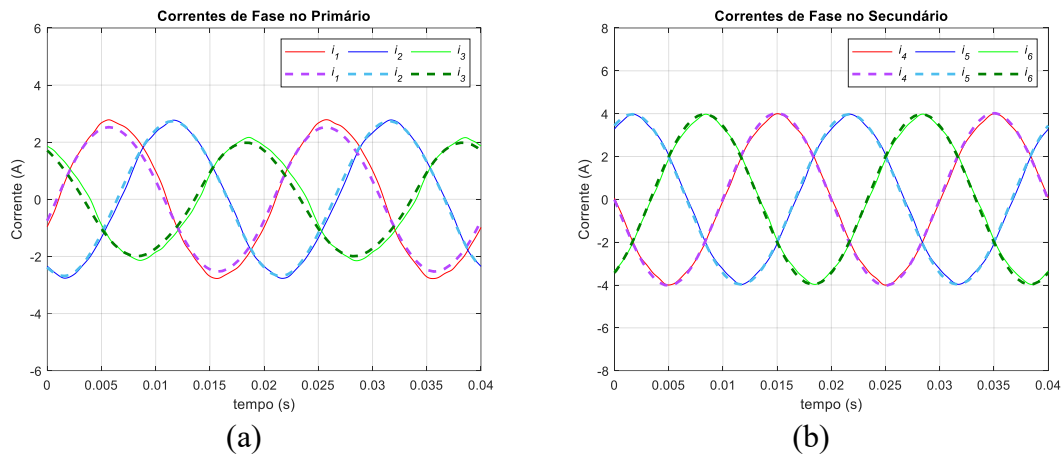


Figura 90 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A: (a) correntes de fase no primário; (b) correntes de fase no secundário. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

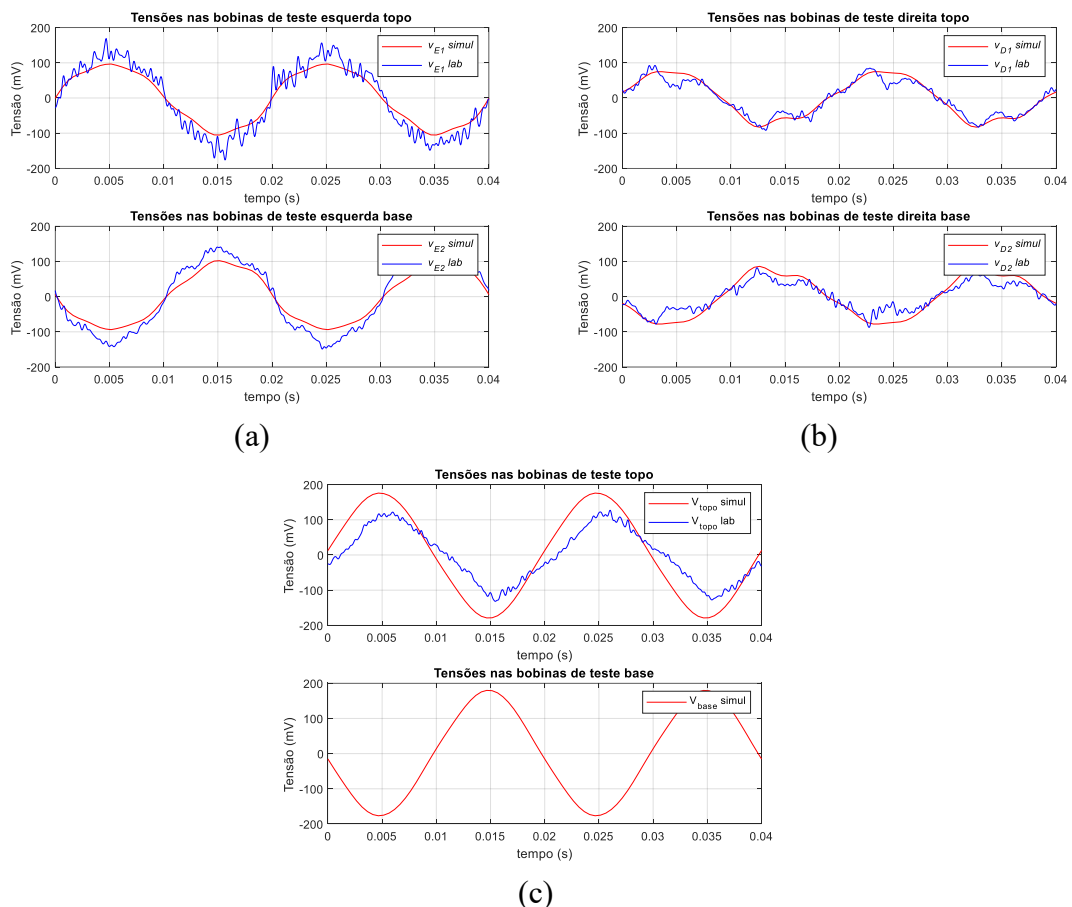


Figura 91 – Comparação dos resultados experimentais e de simulação dos sinais das tensões induzidas nas bobinas de teste (configuração detalhada): (a) lateral esquerda, topo e base; (b) lateral direita topo e base; (c) topo e base. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada, com exclusão de 2 espiras no enrolamento primário da fase A.

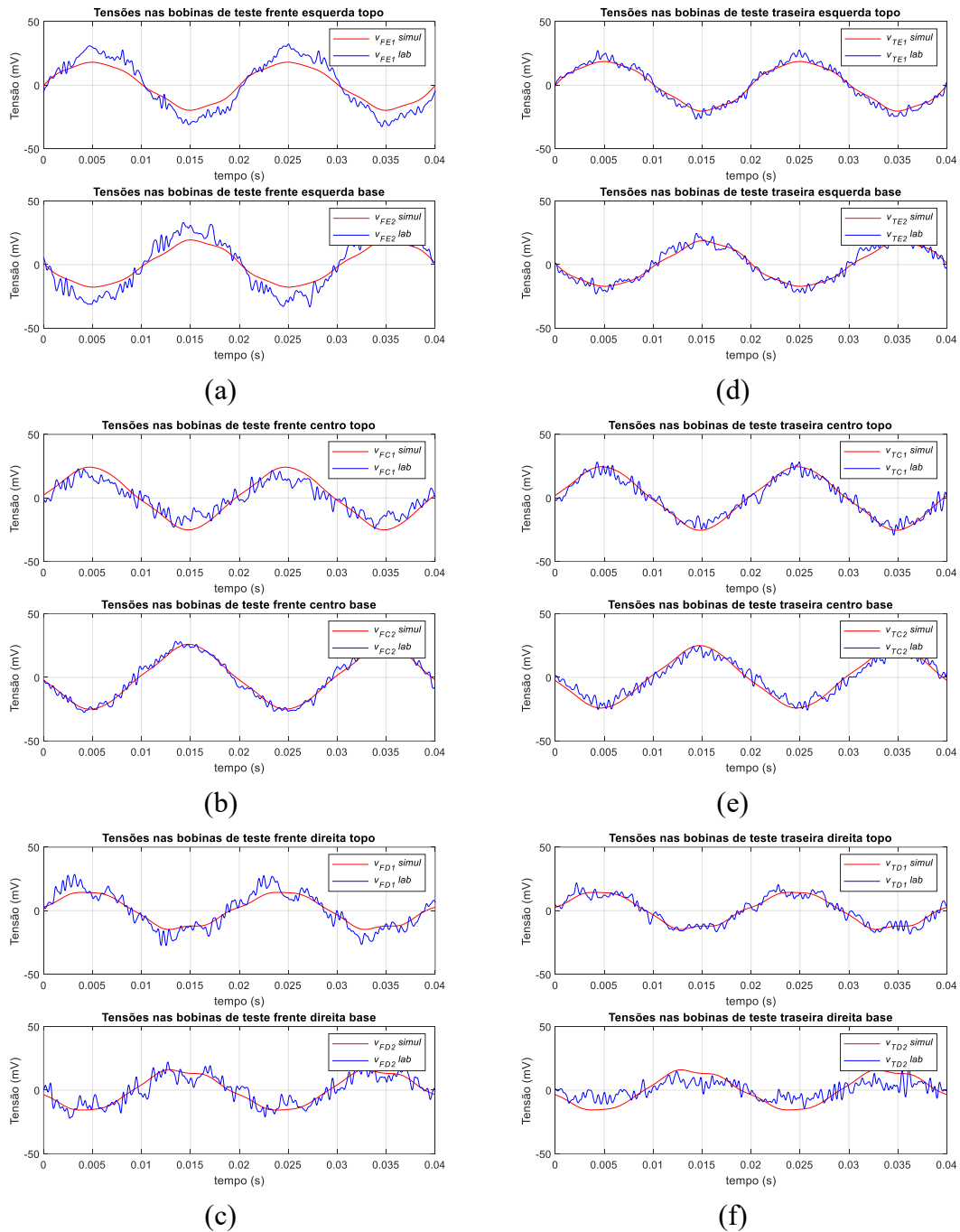


Figura 92 – Comparação dos resultados experimentais e de simulação dos sinais das tensões induzidas nas bobinas de teste (configuração detalhada): (a) frontal esquerda; (b) frontal centro; (c) frontal direita; (d) traseira esquerda; (e) traseira centro; (f) traseira direita. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada, com exclusão de 2 espiras no enrolamento primário da fase A.

Tabela 26 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração detalhada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal versus assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.

<b>Bobinas de teste nas laterais, topo e base</b>						
<b>Resultados - Experimentais</b>	$V_{EI}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
<b>Normal</b>	26.47	29.19	26.96	27.76	11.40	--
<b>Assimetria 150 espiras</b>	92.53	94.55	47.22	38.09	75.15	--
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	249.6	223.9	75.1	37.2	559.2	--
<b>Resultados - Simulação</b>	$V_{EI}$ (mV)	$V_{E2}$ (mV)	$V_{D1}$ (mV)	$V_{D2}$ (mV)	$V_{topo}$ (mV)	$V_{base}$ (mV)
<b>Normal</b>	25.40	24.67	20.90	20.95	6.74	7.94
<b>Assimetria 150 espiras</b>	71.38	69.26	54.02	56.13	122.25	122.86
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	181.0	180.7	158.5	167.9	1713.8	1447.4
<b>Bobinas de teste frontais</b>						
<b>Resultados - Experimentais</b>	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
<b>Normal</b>	8.69	4.78	4.11	3.56	6.25	5.64
<b>Assimetria 150 espiras</b>	20.55	21.20	12.71	17.81	14.30	12.67
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	136.5	343.5	209.2	400.3	128.8	124.6
<b>Resultados - Simulação</b>	$V_{FE1}$ (mV)	$V_{FE2}$ (mV)	$V_{FC1}$ (mV)	$V_{FC2}$ (mV)	$V_{FD1}$ (mV)	$V_{FD2}$ (mV)
<b>Normal</b>	3.35	3.97	2.97	3.27	3.31	3.44
<b>Assimetria 150 espiras</b>	13.11	12.89	16.44	16.99	10.32	11.21
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	291.3	224.7	453.5	419.6	211.8	225.9
<b>Bobinas de teste na traseira</b>						
<b>Resultados - Experimentais</b>	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
<b>Normal</b>	5.47	3.31	3.52	3.05	4.90	5.15
<b>Assimetria 150 espiras</b>	15.16	13.27	14.45	14.24	10.60	6.14
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	177.1	300.9	310.5	366.9	116.3	19.2
<b>Resultados - Simulação</b>	$V_{TE1}$ (mV)	$V_{TE2}$ (mV)	$V_{TC1}$ (mV)	$V_{TC2}$ (mV)	$V_{TD1}$ (mV)	$V_{TD2}$ (mV)
<b>Normal</b>	3.46	4.41	5.53	1.78	3.33	3.35
<b>Assimetria 150 espiras</b>	13.54	12.42	16.69	16.41	10.33	11.13
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	291.3	181.6	201.8	821.9	210.2	232.2

Os erros de medição e o ruído presentes nos resultados experimentais afetam de forma significativa a obtenção dos sinais  $v_{Etotal}$ ,  $v_{Ctotal}$  e  $v_{Dtotal}$ , particularmente quando se realiza o cálculo diferencial através da aplicação das equações (5.23) a (5.31). Por esse motivo os resultados de simulação destes sinais diferem dos experimentais, conforme ilustrado na Figura 93. Foram testadas outras frequências de corte no filtro digital para tentar remover o ruído, mas sem ganhos significativos na qualidade do sinal. Este problema poderá ser mitigado adoptando técnicas de minimização de ruído, aplicadas no sistema de instrumentação, e também no projecto e dimensionamento das bobinas, cujo estudo e implementação sai fora do âmbito deste trabalho.

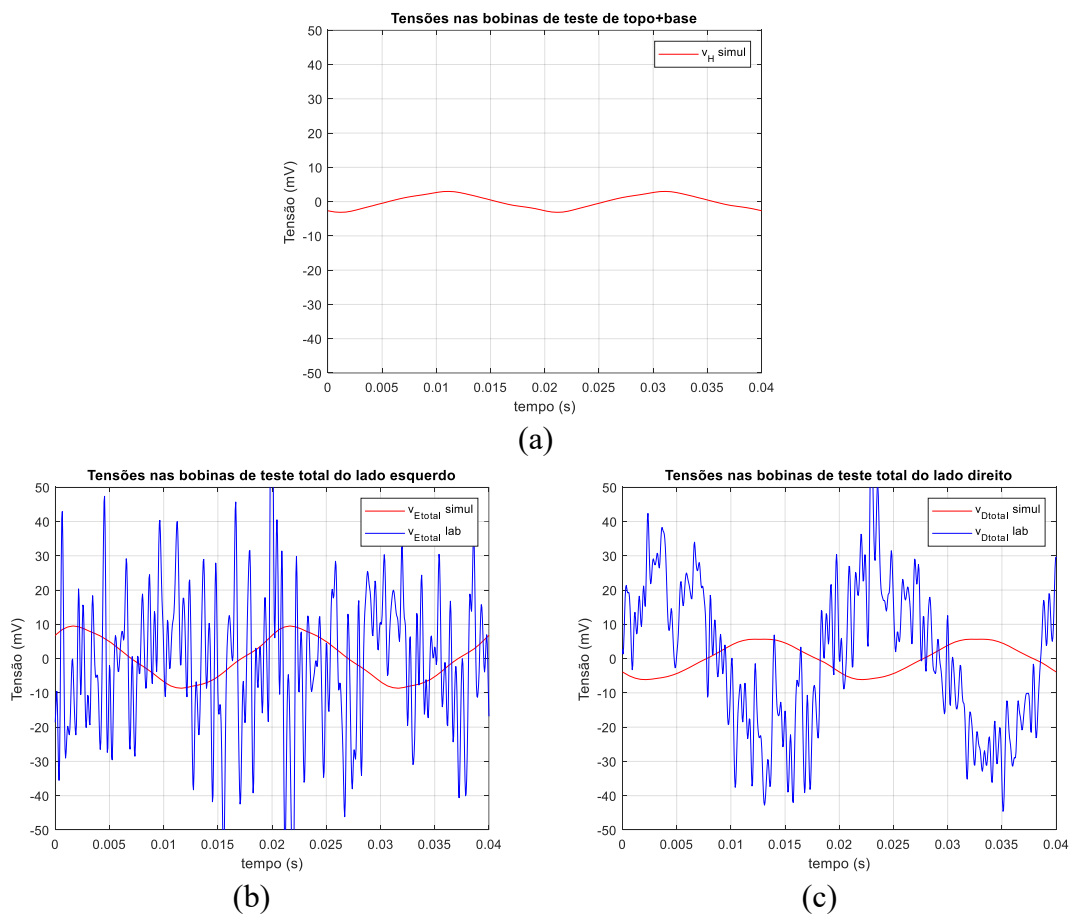
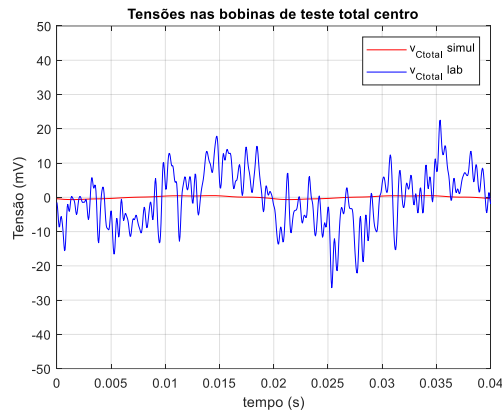


Figura 93 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A (contínua na página seguinte).



(d)

Figura 93 – (continuação) Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: assimetria devido a exclusão de 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.

### 5.2.2. Ocorrência de defeitos de isolamento nos enrolamentos

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados relativos à ocorrência de defeitos de isolamento nos enrolamentos. Quando o isolamento dos enrolamentos se deteriora ocorre um curto-circuito entre espiras que provoca a circulação de uma corrente elevada nos condutores afetados. Esta corrente interna pode atingir valores muito elevados e destrutivos; no entanto pode não provocar alterações significativas na corrente de entrada do enrolamento, sendo por isso defeitos difíceis de detetar. A corrente de curto-circuito produz um sobreaquecimento na zona afetada, com a consequente degradação do papel isolante, provocando um efeito dominó que, caso não seja interrompido, conduz à completa destruição do enrolamento e, conseqüentemente, do transformador.

A simulação das condições experimentais para este tipo de defeito envolve algum grau de incerteza pois a cablagem interna e os cabos de alimentação entre o exterior e interior da cuba podem ter alguma influência nas tensões induzidas nas bobinas de teste. Esta situação é particularmente importante no caso de defeitos de isolamento onde as correntes são mais elevadas. Adicionalmente, a localização exata das espiras em curto-circuito pode não corresponder exatamente à geometria especificada pelo fabricante, a qual foi utilizada no modelo computacional. A conjugação destes fatores resulta, por vezes, nalgumas discrepâncias entre os sinais experimentais e de simulação, apesar de, globalmente, os resultados estarem em razoável concordância.

De seguida apresentam-se alguns exemplos de defeitos de isolamento de forma a permitir testar e analisar o desempenho do método de diagnóstico proposto.

#### 5.2.2.1. Curto-circuito entre espiras na fase A

##### 5.2.2.1.1. Avaria com grau de severidade elevado: curto-circuito entre 74 espiras

Neste caso o curto-circuito envolve uma percentagem significativa de espiras, resultando numa avaria com elevado grau de severidade. O curto-circuito envolve 74 espiras ( $N_b = 74$  espiras  $\approx 47\%$  do total) na fase A do enrolamento de 230 V. Utilizou-se ligação Dyn11, tensão de alimentação nominal trifásica simétrica e carga resistiva equilibrada de  $48 \Omega$ .

O curto-circuito entre espiras foi inserido no transformador ligando uma resistência entre os terminais U e  $U_B$  (Figura 14 e Figura 94). Esta resistência permite limitar a corrente de curto-circuito e proteger o transformador utilizado nos ensaios experimentais de uma avaria efetiva. Neste ensaio a corrente na resistência de curto-circuito foi ajustada para 24 A, por forma a limitar a corrente nas espiras afetadas a um valor ligeiramente inferior à corrente nominal do enrolamento.

A ocorrência do defeito provoca um aumento na corrente de entrada do enrolamento afetado, conforme ilustrado na Figura 95(b), resultando num desequilíbrio significativo nas correntes no lado primário (linha e fase, Figura 95(a) e Figura 95(b), respetivamente). As correntes nos enrolamentos secundários não apresentam alterações significativas comparativamente com a condição de funcionamento normal, Figura 95(c). O valor eficaz das correntes no transformador é apresentado na Tabela 27.

O enrolamento onde ocorre o defeito tem um comportamento idêntico ao de um autotransformador redutor, onde as correntes estão em oposição de fase nos enrolamentos comum e série (neste caso refere-se às espiras com e sem defeito, respetivamente). Similarmente, a corrente nas espiras em curto-circuito,  $i_b$ , está em oposição de fase com a corrente  $i_1$ , Figura 95(d).

Na simulação realizada utilizou-se uma resistência de curto-circuito ligeiramente maior do que o valor utilizado no ensaio experimental, pois a resistência de contacto e das cablagens é difícil de estimar. Por esse motivo as correntes obtidas na simulação no enrolamento afetado são ligeiramente inferiores ao valor medido, Figura 95.

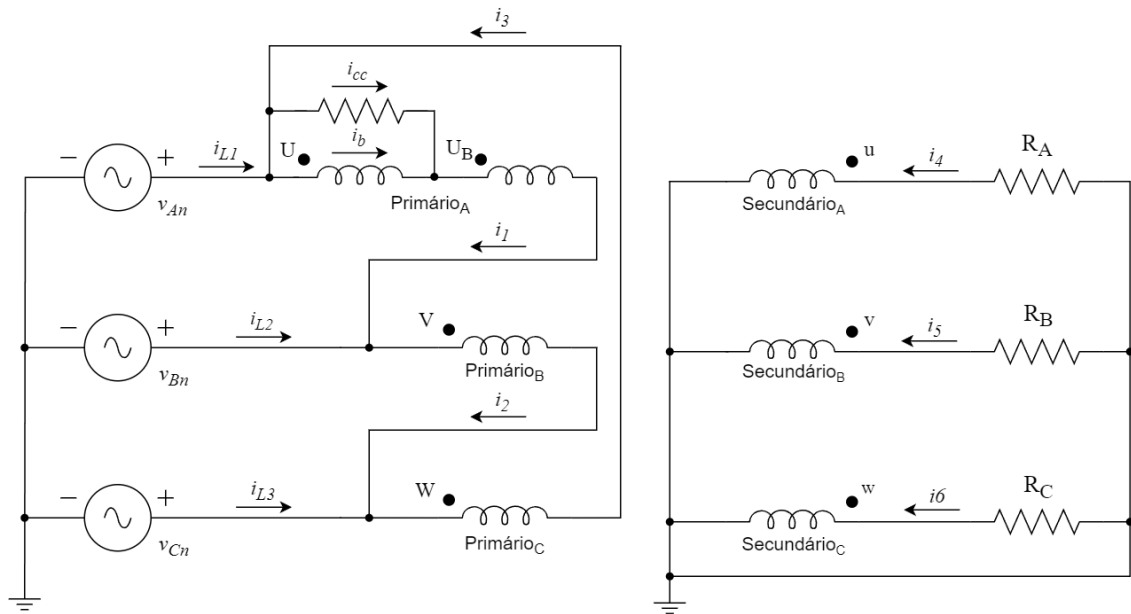


Figura 94 – Esquema da ligação Dyn11 com curto-circuito entre os terminais U e UB.

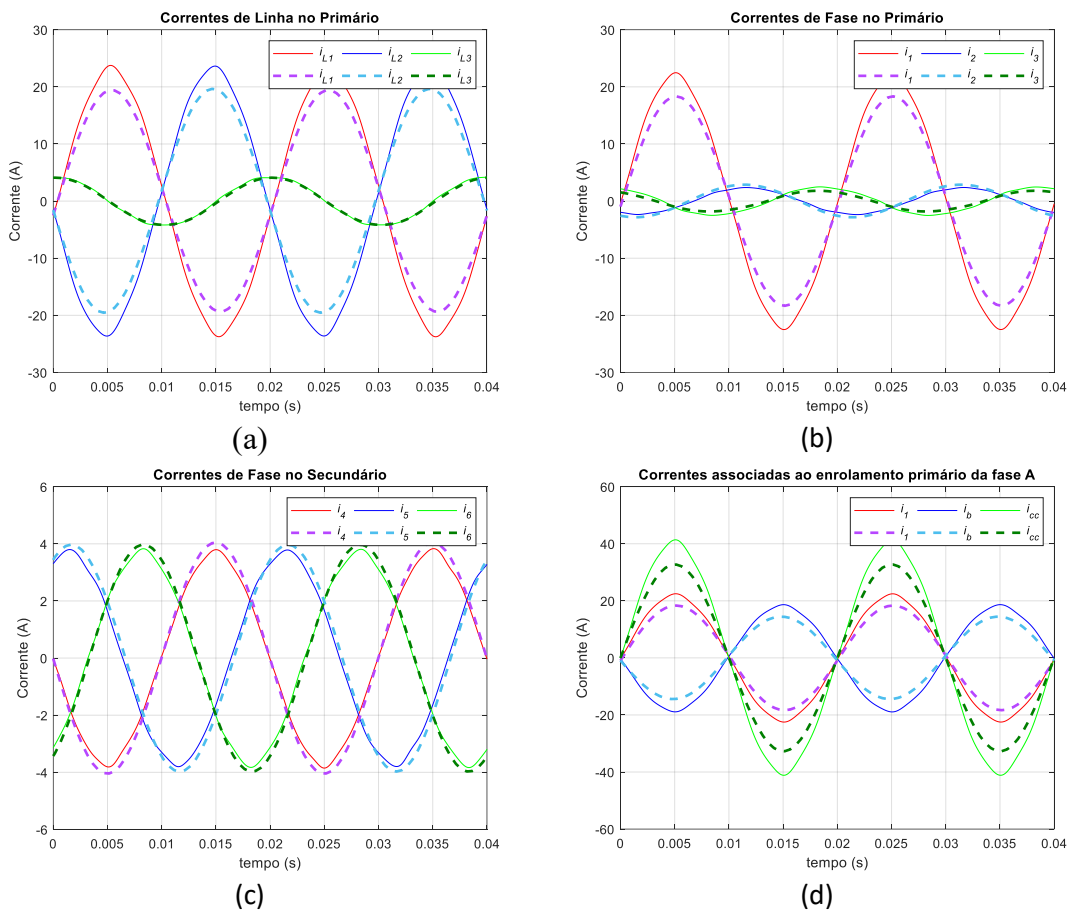


Figura 95 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase A: (a) correntes de linha no primário; (b) correntes de fase no primário; (c) correntes de fase no secundário (d) correntes associadas ao defeito. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

A Figura 96 ilustra a evolução das tensões induzidas nas bobinas para o caso da configuração agrupada. A ocorrência do defeito provoca um aumento significativo de todos os sinais, mas com maior relevância naquele que está mais próximo do defeito,  $V_{Etotal}$ , permitindo claramente identificar o curto-circuito e a sua localização, Tabela 28. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e de simulação.

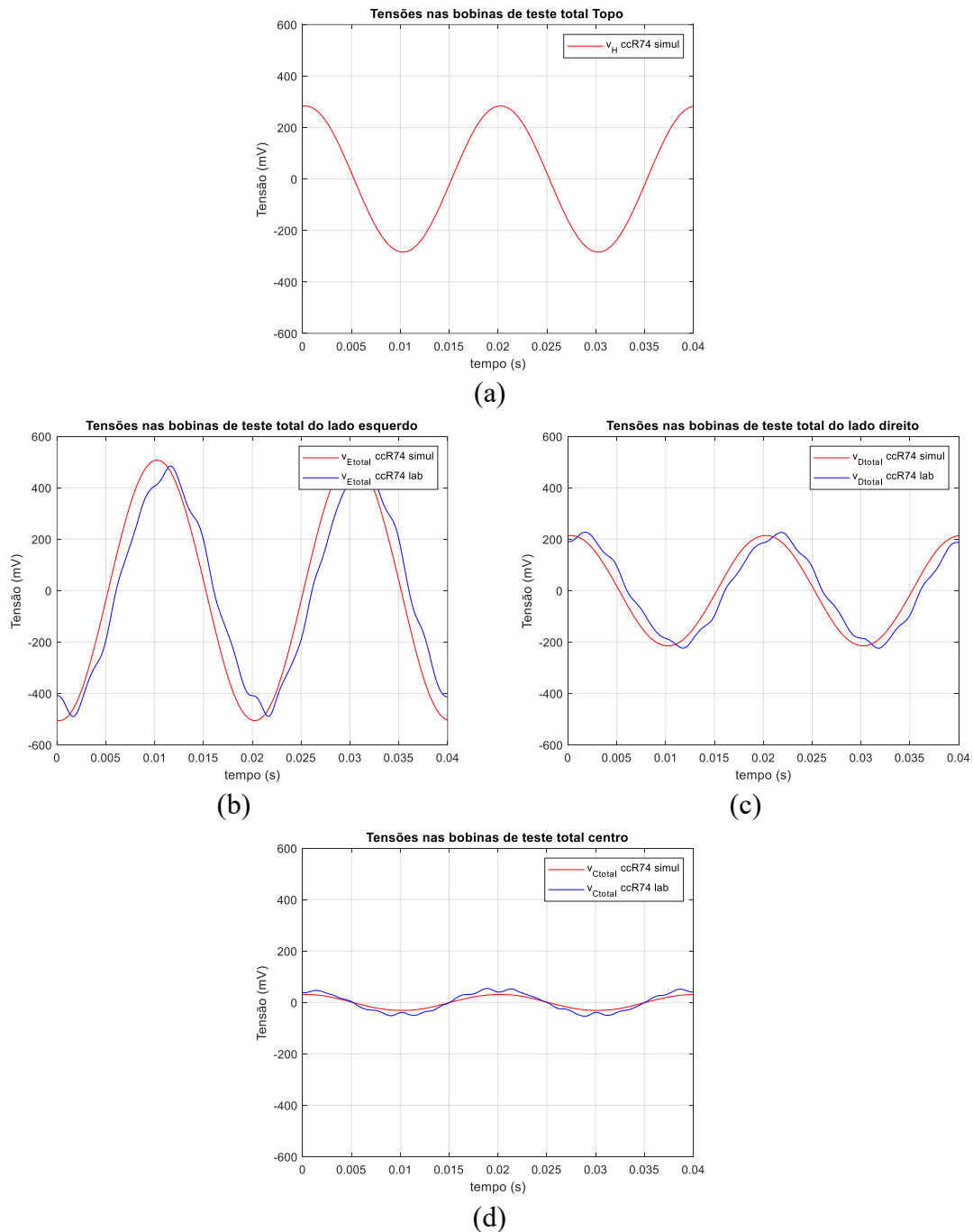


Figura 96 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.

Tabela 27 – Valor eficaz das correntes. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.

<b>Resultados</b>	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)	$I_b$ (A)	$I_{cc}$ (A)
<b>Experimental</b>	13.2	16.4	3.1	15.5	1.7	1.8	2.6	2.7	2.7	13.0	28.5
<b>Simulação</b>	13.7	13.8	3.0	12.9	2.0	1.3	3.0	2.8	2.8	10.2	23.1
<b>Erro (%)</b>	3.8	-15.9	-3.2	-16.8	17.6	-27.8	15.4	3.7	3.7	-21.5	-18.9

Tabela 28 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação de curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase A.

<b>Resultados Experimentais</b>				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
<b>Normal</b>	6.56	6.86	6.96	-
<b>Curto-circuito</b>	328.32	34.99	151.23	-
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	4904.9	410.1	2072.8	-
<b>Resultados de Simulação</b>				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
<b>Normal</b>	0.69	0.09	1.13	0.52
<b>Curto-circuito</b>	362.68	22.24	153.76	194.42
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	52462.3	24611.1	13507.1	37288.5

#### 5.2.2.1.2. Avaria com grau de severidade reduzido: curto-circuito entre 2 espiras

Este caso refere-se a uma condição de avaria relativamente incipiente, pois o número de espiras em curto-circuito é reduzido ( $N_b = 2$  espiras  $\approx 1.3\%$  do total). A severidade da avaria depende também da corrente nas espiras em defeito, a qual é limitada pela resistência auxiliar de curto-circuito. Nos ensaios experimentais esta corrente não excedeu o valor da corrente nominal do enrolamento, não sendo assim ultrapassado nenhum parâmetro nominal da máquina. Nestas condições a avaria não provoca por si só danos irreversíveis no estado do transformador, desde que a resistência de defeito não se altere. É assim muito provável que o defeito permaneça indetetável até que progrida para uma avaria de maior gravidade [6].

O curto-circuito ocorre na fase A do enrolamento de 230 V (primário). Utilizou-se ligação Dyn11, tensão de alimentação nominal trifásica simétrica e carga resistiva equilibrada de 48  $\Omega$ . A forma de onda das correntes no transformador é ilustrada na Figura 97. No caso deste defeito com menor severidade, a corrente de entrada no enrolamento afetado,  $i_1$ , não sofre alterações significativas, não sendo possível detetar a avaria através da análise das correntes de entrada do transformador. O valor eficaz da corrente nas espiras em curto-circuito,  $i_b$ , foi ajustada a aproximadamente 14 A, abaixo

da corrente nominal do enrolamento, para salvaguardar a integridade física do transformador utilizado nos ensaios experimentais, Tabela 29.

A Figura 98 ilustra a evolução das tensões induzidas nas bobinas (configuração agrupada). À semelhança do caso anterior, o sinal da bobina de teste mais próxima do defeito,  $v_{Etotal}$ , permite identificar o defeito, pois aumenta cerca de 7 vezes em relação ao valor de referência, Tabela 30. Os resultados experimentais e de simulação encontram-se em razoável concordância em amplitude, mas existe um desfasamento entre os sinais, o qual pode ser originado pelas razões já mencionadas anteriormente.

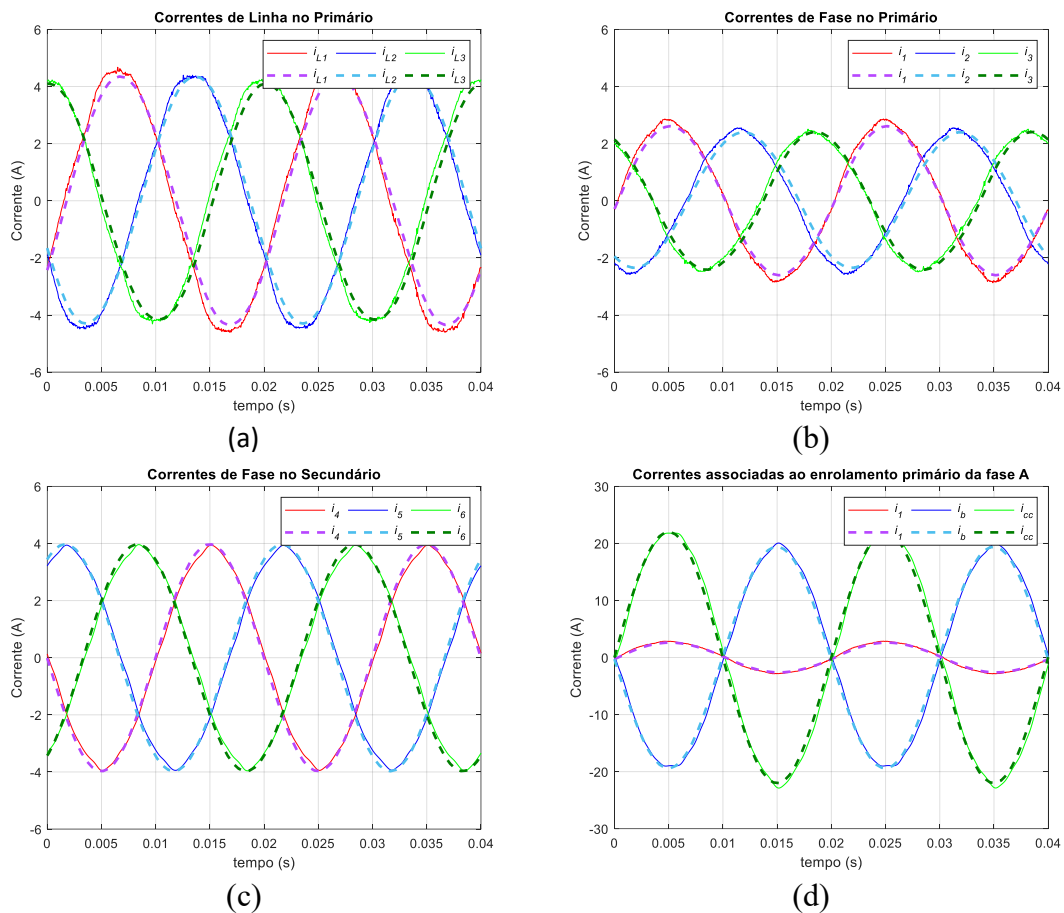
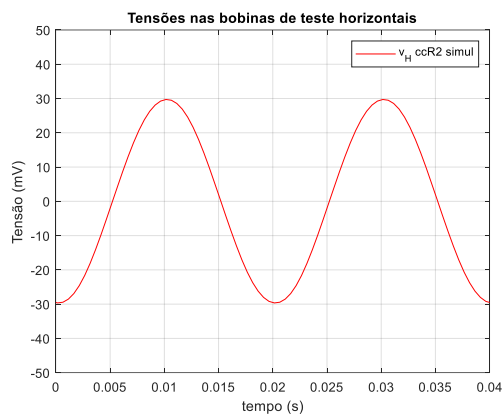


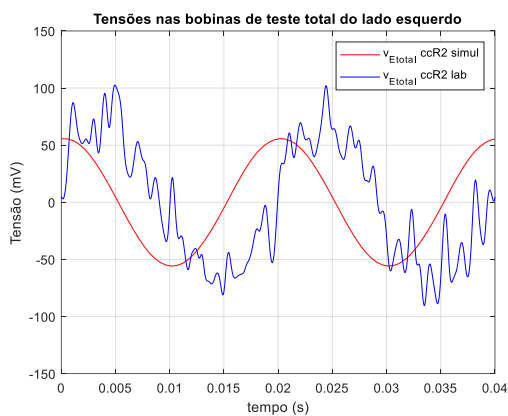
Figura 97 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b \approx 14$  A: (a) correntes de linha no primário; (b) correntes de fase no primário; (c) correntes de fase no secundário (d) correntes associadas ao defeito.  
Linha contínua; experimental. Linha a tracejado: simulação.

Tabela 29 – Valor eficaz das correntes. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b \approx 14$  A.

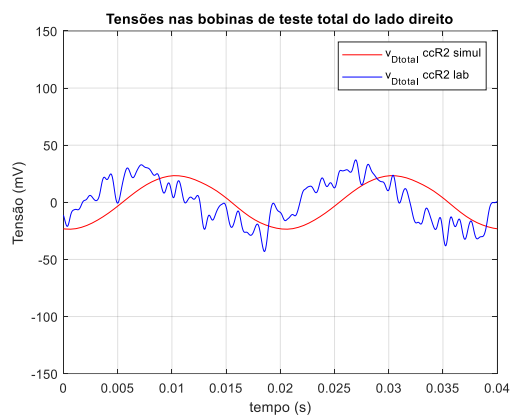
Resultados	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)	$I_b$ (A)	$I_{cc}$ (A)
Experimental	3.3	3.2	3.1	2.0	1.8	1.7	2.7	2.7	2.7	13.8	15.8
Simulação	3.1	3.0	3.0	1.8	1.7	1.7	2.8	2.8	2.8	13.7	15.5
Erro (%)	-6.1	-6.3	-3.2	-10.0	-5.6	0.0	3.7	3.7	3.7	-0.7	-1.9



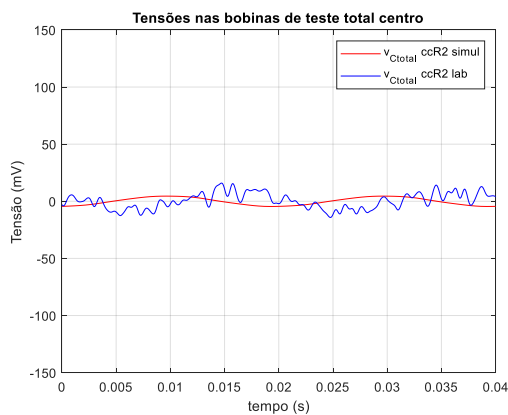
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 98 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b \approx 14$  A.

Tabela 30 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b \approx 14$  A.

Resultados Experimentais				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	6.56	6.86	6.96	--
Curto-circuito	52.65	7.57	19.46	--
$\Delta V$ (%)	702.6	10.3	179.6	--
Resultados de Simulação				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Curto-circuito	39.82	3.25	16.70	20.30
$\Delta V$ (%)	5671.0	3511.1	1377.9	3803.8

O modelo computacional foi utilizado para analisar outras condições de ocorrência do defeito de isolamento, com correntes de curto-circuito superiores à corrente nominal. Nas Figuras 99 e 100 apresenta-se a evolução das correntes nos enrolamentos quando ocorre um curto-circuito com  $N_b=2$  espiras e correntes de defeito de  $I_b = 45$  A e de  $I_b = 126$  A, respetivamente. Como expetável, o aumento da corrente de defeito provoca um aumento da corrente no enrolamento afetado. Os correspondentes valores eficazes são apresentados na Tabela 31.

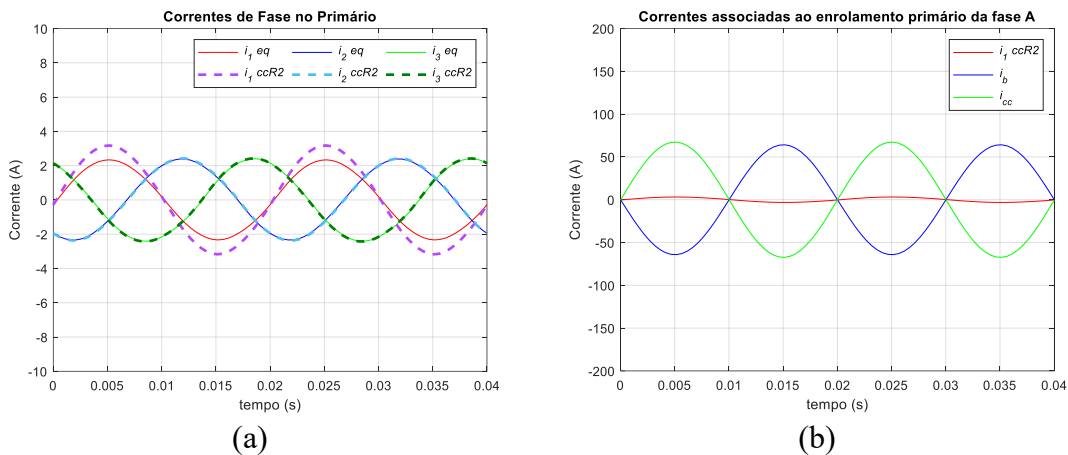


Figura 99 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b = 45$  A: (a) correntes de fase no primário; (b) correntes associadas ao defeito.

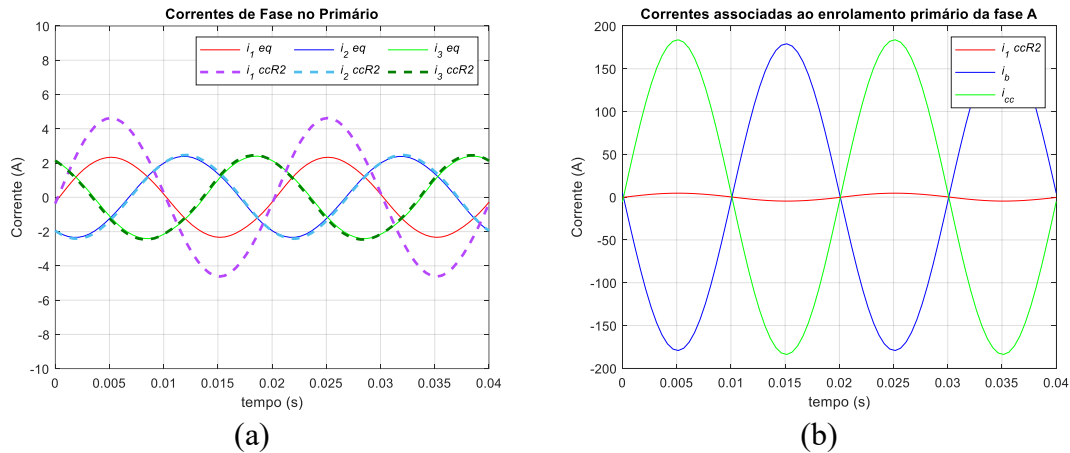
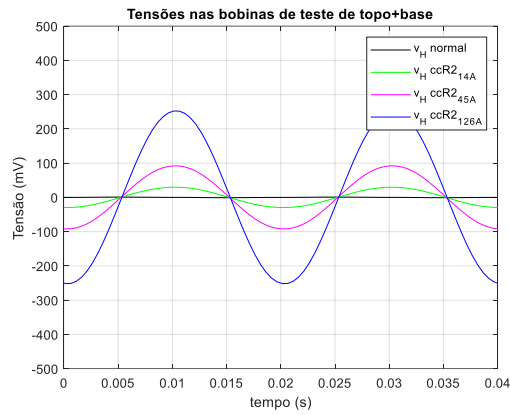


Figura 100 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b = 126$  A: (a) correntes de fase no primário; (b) correntes associadas ao defeito.

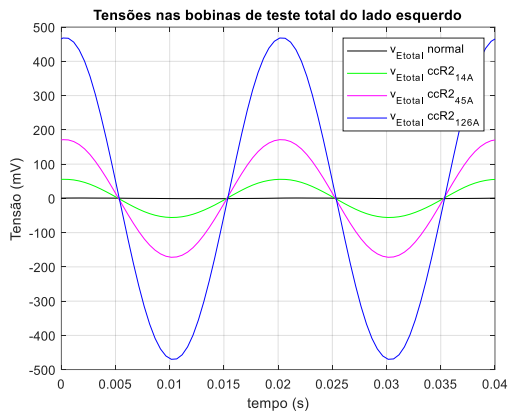
Tabela 31 – Valor eficaz das correntes. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A com  $I_b = 45$  A e  $I_b = 126$  A.

Resultados	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)	$I_b$ (A)	$I_{cc}$ (A)
Simulação $I_b = 45$ A	3.5	3.0	3.4	2.2	1.7	1.7	2.8	2.8	2.8	45.3	47.5
Simulação $I_b = 126$ A	4.5	3.0	4.4	3.3	1.7	1.7	2.8	2.8	2.8	126.3	129.5

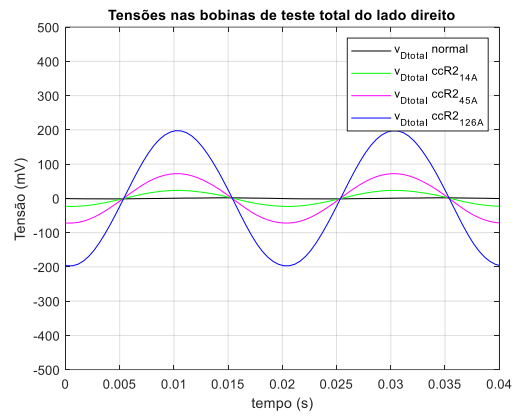
A Figura 101 ilustra a evolução das tensões induzidas nas bobinas (configuração agrupada) para os casos de  $I_b \approx 14$  A,  $I_b = 45$  A e de  $I_b = 126$  A. Também aqui o aumento da severidade do defeito provoca um aumento nas tensões induzidas nas bobinas de teste, Tabela 32.



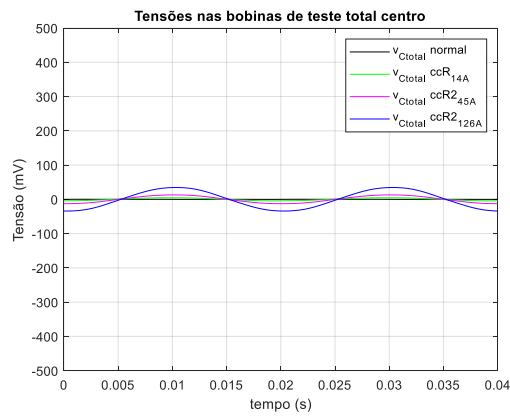
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 101 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A para várias correntes de defeito.

Tabela 32 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: curto-circuito entre 2 espiras no enrolamento de 230 V da fase A para  $I_b=45$  A e  $I_b=126$  A.

Resultados Simulação $N_b=2; I_b=45$ A				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Curto-circuito	122.73	9.25	51.60	65.67
$\Delta V$ (%)	17687.0	10177.8	4466.4	12528.8
Resultados Simulação $N_b=2; I_b=126$ A				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
Normal	0.69	0.09	1.13	0.52
Curto-circuito	335.69	24.74	141.30	180.01
$\Delta V$ (%)	48550.7	27388.9	12404.4	34517.3

Os gráficos da Figura 102 apresentam uma comparação dos resultados obtidos para as várias condições de avaria, observando-se aqui claramente que a amplitude das tensões induzidas aumenta com a severidade da avaria, particularmente naquelas mais próximas do defeito. O método de diagnóstico permite assim detetar a avaria, identificar a sua localização e caracterizar o seu grau de severidade.

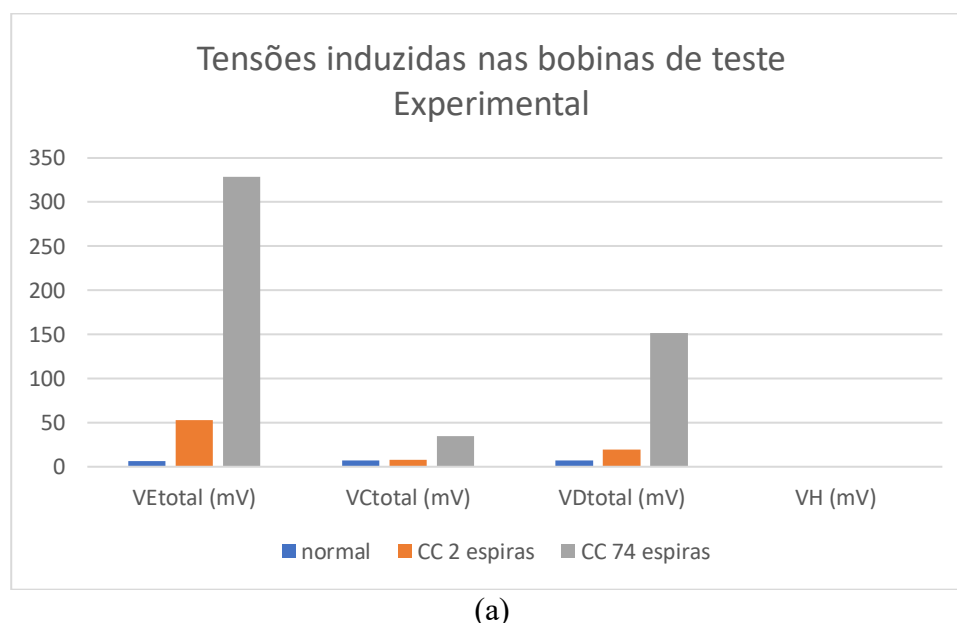
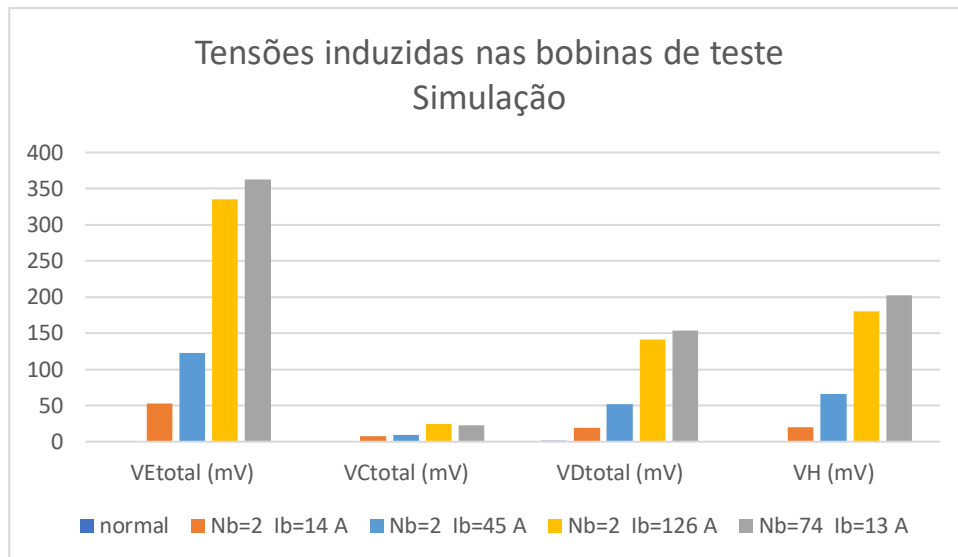


Figura 102 – Comparação do valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste (configuração agrupada) para condição normal e presença de defeitos de isolamento:  
 (a) Resultados experimentais; (b) resultados de simulação (continua na página seguinte).



(b)

Figura 102 – (continuação) Comparação do valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste (configuração agrupada) para condição normal e presença de defeitos de isolamento:  
(a) Resultados experimentais; (b) resultados de simulação.

### 5.2.2.2. Curto-circuito entre 74 espiras na fase B

Utilizou-se também para este caso a ligação Dyn11, tensão de alimentação nominal trifásica, simétrica e carga resistiva equilibrada de  $48 \Omega$ . A ocorrência de um curto-circuito entre espiras no enrolamento primário da fase B, Figura 103, provoca um aumento da corrente nesse enrolamento, em relação à condição de funcionamento normal. A evolução temporal das correntes no transformador e correspondente valor eficaz são apresentados na Figura 104 e Tabela 33, respectivamente.

A presença do defeito provoca um aumento da amplitude das tensões induzidas em todas as bobinas de teste (configuração agrupada), conforme apresentado na Figura 105 e na Tabela 34. Para esta localização do defeito os sinais das tensões induzidas nas bobinas centrais e horizontais são indicadores fiáveis da ocorrência da anomalia.

Foram realizados outros estudos e ensaios laboratoriais para outras condições de funcionamento e de defeito no transformador, tendo-se obtido conclusões semelhantes.

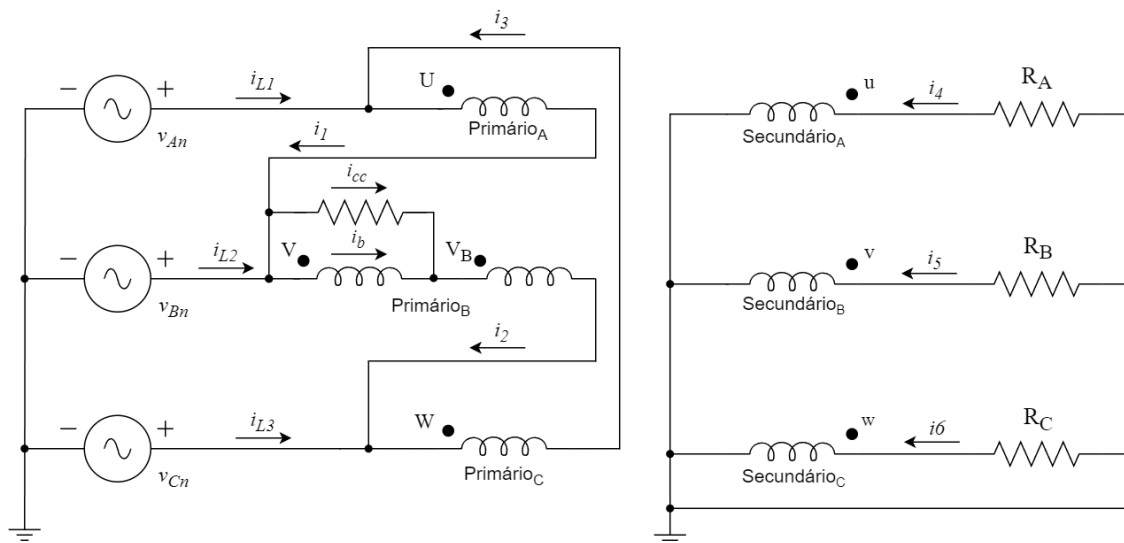


Figura 103 – Esquema da ligação Dyn11 com curto-circuito entre os terminais V e V<sub>B</sub>.

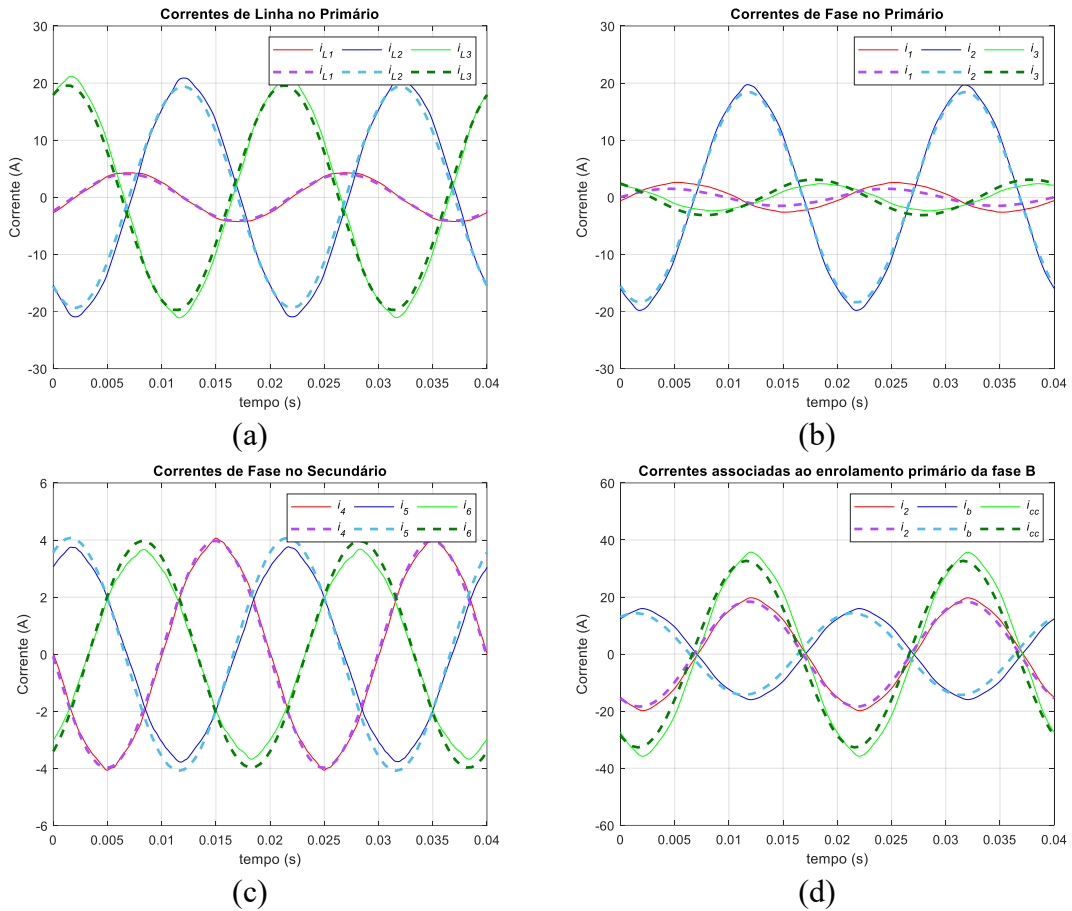
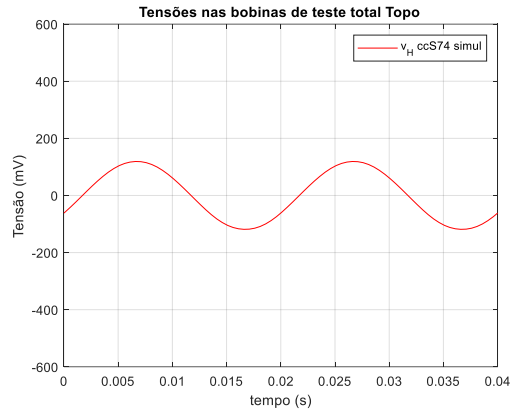


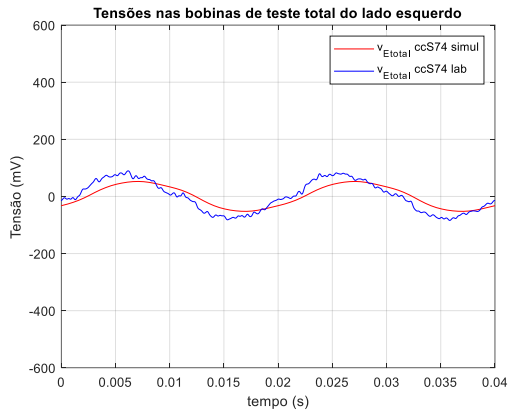
Figura 104 – Resultados obtidos para a ligação Dyn11, curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase B: (a) correntes de linha no primário; (b) correntes de fase no primário; (c) correntes de fase no secundário (d) correntes associadas ao defeito. Linha contínua: experimental. Linha a tracejado: simulação.

Tabela 33 – Valor eficaz das correntes. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase B.

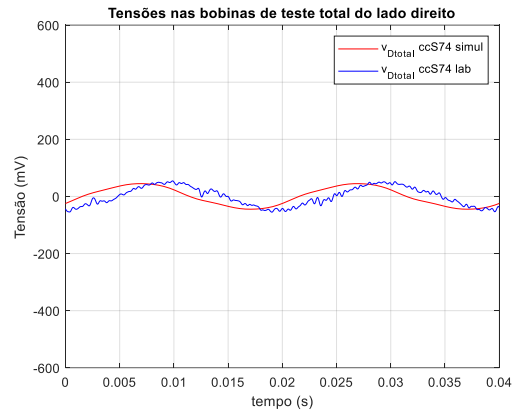
Resultados	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_4$ (A)	$I_5$ (A)	$I_6$ (A)	$I_b$ (A)	$I_{cc}$ (A)
Experimental	3.1	14.5	14.6	1.8	13.7	1.7	2.8	2.6	2.5	11.0	24.7
Simulação	2.9	13.8	14.0	1.1	13.1	2.2	2.8	2.9	2.8	10.2	23.7
Erro (%)	-6.5	-4.8	-4.1	-38.9	-4.4	29.4	0.0	11.5	12.0	-7.3	-4.0



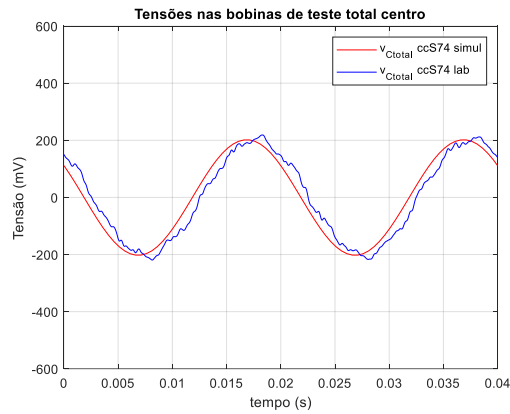
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 105 – Sinais das tensões induzidas na configuração agrupada das bobinas de teste. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada; curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase B.

Tabela 34 – Valor eficaz da tensão nas bobinas de teste para a configuração agrupada. Ligação Dyn11 com alimentação simétrica e carga equilibrada: situação normal curto-circuito entre 74 espiras no enrolamento de 230 V da fase B.

<b>Resultados Experimentais</b>				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
<b>Normal</b>	6.56	6.86	6.96	--
<b>Curto-circuito</b>	54.45	143.94	33.40	--
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	730.0	1998.3	379.9	--
<b>Resultados de Simulação</b>				
	$V_{Etotal}$ (mV)	$V_{Ctotal}$ (mV)	$V_{Dtotal}$ (mV)	$V_H$ (mV)
<b>Normal</b>	0.69	0.09	1.13	0.52
<b>Curto-circuito</b>	37.16	142.32	31.23	81.26
<b><math>\Delta V</math> (%)</b>	5285.5	158033.3	2663.7	15526.9



## 6. Conclusões

O trabalho apresentado nesta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um método de diagnóstico de avarias em transformadores trifásicos baseado na monitorização das tensões induzidas em bobinas de teste, que permitem caracterizar o fluxo homopolar no exterior do núcleo ferromagnético.

O método de diagnóstico proposto foi submetido a um vasto número de testes, para várias condições de funcionamento do transformador e diferentes tipos de avaria, tendo sido consideradas deformações mecânicas e defeitos de isolamento dos enrolamentos. Para o efeito foram utilizados resultados experimentais e resultados de simulação. Foi desenvolvido e implementado um modelo computacional tridimensional do transformador baseado em elementos finitos, que permitiu caracterizar a distribuição do fluxo homopolar nas condições de funcionamento normal e de avaria.

Foram propostas várias configurações para as bobinas de teste: originalmente foi concebido um sistema que realizava a medição 18 sinais, sendo depois adotadas configurações mais compactas que necessitavam apenas da monitorização de 4 sinais.

Da análise dos resultados obtidos é possível concluir que a monitorização do fluxo homopolar permite efetuar a deteção de defeitos internos de forma rigorosa e fiável, fornecendo indicações sobre a localização e grau de severidade da avaria. O método é muito sensível na deteção de deformações mecânicas que provoquem assimetria na distribuição de fluxos, possuindo menor sensibilidade na identificação de deformações perfeitamente simétricas. O método revela também elevada sensibilidade para detetar defeitos muito incipientes no isolamento dos enrolamentos.

Para trabalho futuro, sugere-se que o método de diagnóstico proposto seja aplicado a transformadores industriais, através de simulações computacionais, por forma a possibilitar analisar o desempenho à escala real. Neste contexto será essencial analisar a influência de acessórios e outros elementos construtivos do transformador que perturbem a distribuição de fluxos no interior da cuba, como os cabos de ligação internos, estruturas de fixação, comutador de tomadas, localização dos condutores e travessias, entre outros. Será também importante analisar a influência da presença de harmónicos e a ocorrência de transitórios no sistema elétrico onde o transformador está inserido. Finalmente, será

importante melhorar e/ou simplificar a configuração das bobinas de testes e do sistema de instrumentação numa tentativa de diminuir o ruído dos sinais medidos.

## 7. Referências

- [1] J.F.B. Bento: “Utilização de bobinas de teste para análise do fluxo homopolar em transformadores trifásicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve, 2018.
- [2] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde: “Transformer engineering: design and practice”, Marcel Dekker, New York, 2004.
- [3] P. C. Sen: “Principles of Electric Machines and Power Electronics”, John Wiley & Sons, 1989.
- [4] C. Cabral, J. Gonçalves: “Máquinas Elétricas I”, Universidade do Algarve, 1997.
- [5] E. Ras: “Transformadores de potência, de medida e de proteção”, Almedina, Coimbra, 1977.
- [6] L.M.R. Oliveira: “Desenvolvimento de métodos de deteção de avarias e algoritmos de proteção para aplicação em sistemas de monitorização contínua de transformadores trifásicos”. Coimbra: [s.n.], 2013. Tese de doutoramento.
- [7] R.A.A. Brás: “Papel do enrolamento terciário no diagnóstico de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos”, Coimbra, 2013. Tese de mestrado.
- [8] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava: “Review of condition assessment of power transformers in service,” in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 6, pp. 12-25, Nov.-Dec. 2002.
- [9] M. Belanger, “Transformer diagnosis: Part 1: A statistical justification for preventative maintenance,” *Electricity Today*, vol.11, no. 6, pp. 5-8, 1999.
- [10] A. Zargari, T.R. Blackburn: “Application of optical fiber sensor for partial discharge detection in high-voltage power equipment,” in *Proc. CEIDP*, San Francisco, CA, 1996, pp. 541-544.
- [11] S. C. Athikessavan, E. Jeyasankar, S. S. Manohar, S. K. Panda: “Inter-Turn Fault Detection of Dry-Type Transformers Using Core-Leakage Fluxes,” in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, pp. 1230-1241, Aug. 2019.
- [12] J. P. A. Rodrigues: “Deteção de deformações nos enrolamentos de transformadores através da análise do fluxo de fugas - Análise FEM”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve, 2018.
- [13] S. Humphries: “Finite-element Methods for Electromagnetics”, Field Precision LLC, 2010.
- [14] Y. Özüpak, M.S. Mamiş: “Analysis of electromagnetic and loss effects of sub-harmonics on transformers by Finite Element Method”. *Sādhanā* 45, 226 (2020).
- [15] Área tecnológica: “Transformador Trifásico”, <https://www.areatecnologia.com/electricidad/transformador-trifasico.html>. Acedido em 04/02/2025.
- [16] "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," in *IEEE Std C57.12.90-1999*, vol., no., pp.1-88, 30 Dec. 1999.
- [17] A. Carlson, J. Fuhr, G. Schemel, F. Wegscheider: “Testing of Power Transformers - Routine tests, Type tests and Special tests”, ABB Business Area Power Transformers, 2003.
- [18] N. Mahomed: “Electromagnetic forces in transformers under short circuit conditions”, *Energize*, pp. 36-40, March 2011.

- [19] A. C. Azevedo, I. Rezende, A. C. Delaiba, J. C. Oliveira, B.C. Carvalho, H. S. Bronzeado: “Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curtos-Circuitos Externos: Investigação Utilizando FEM”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Julho 2006.
- [20] G. Bertagnolli: “Short circuit duty of power transformers” - The ABB approach. 1996.
- [21] V. Sokolov, B. Vanin: “Experience with detection and identification of winding buckling in power transformers”, Proc. 68th Annual Int. Conf. Doble Clients, 2001. Sec. 8-3.