

JOÃO PEDRO ANDRADE RODRIGUES

**DETEÇÃO DE DEFORMAÇÕES NOS ENROLAMENTOS DE  
TRANSFORMADORES ATRAVÉS DA ANÁLISE DO FLUXO DE FUGAS**

ANÁLISE FEM



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

2019



JOÃO PEDRO ANDRADE RODRIGUES

**DETEÇÃO DE DEFORMAÇÕES NOS ENROLAMENTOS DE  
TRANSFORMADORES ATRAVÉS DA ANÁLISE DO FLUXO DE FUGAS**

ANÁLISE FEM

Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrónica  
Especialidade de Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:  
Professor Doutor Luís Manuel Ramos de Oliveira



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

2019



**DETEÇÃO DE DEFORMAÇÕES NOS ENROLAMENTOS DE  
TRANSFORMADORES ATRAVÉS DA ANÁLISE DO FLUXO DE FUGAS**

ANÁLISE FEM

**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.

---

(João Pedro Andrade Rodrigues)



Copyright ©2019, João Pedro Andrade Rodrigues

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.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar tenho a agradecer a uma pessoa fundamental para que este trabalho chegasse até este ponto, o meu professor e orientador Luís Oliveira. Obrigado pela sua dedicação, pela paciência, pela disponibilidade de ajudar sempre, pelo profissionalismo e pelos ensinamentos. Sem o seu apoio não teria conseguido. Muito obrigado!

Durante a realização deste trabalho muitas foram as pessoas que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para o seu sucesso. Quero agradecer a todos os professores que me acompanharam ao longo desta aventura que foi a licenciatura e o mestrado, obrigado pelo apoio e ensinamentos.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve os meios disponibilizados para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha namorada, Márcia, pelo seu permanente encorajamento, ajuda e paciência.

Um obrigado aos meus pais pelo esforço por eles realizado para me possibilitarem esta oportunidade, por toda a educação e incentivo que me deram.



## **Resumo**

Os transformadores são uma peça fundamental nos sistemas de produção e distribuição de energia elétrica. São um dos equipamentos mais dispendiosos presentes em qualquer subestação ou unidade geradora. Uma avaria inesperada pode originar prejuízos elevados, motivados não só pela reparação ou substituição do equipamento, mas também pelos custos relativos à energia não vendida e às eventuais compensações por interrupção do fornecimento de energia. Deste modo, existe um aumento da exigência em relação aos sistemas de manutenção e proteção dos transformadores para cumprir os elevados padrões de fiabilidade e qualidade de serviço. O desenvolvimento de novos métodos de diagnóstico de avarias e monitorização em tempo real destas máquinas tem merecido particular atenção por parte da comunidade científica, com o intuito de detetar os defeitos na sua fase mais precoce e evitar avarias catastróficas.

O trabalho apresentado nesta dissertação tem como principal objetivo verificar se através da análise do fluxo de fugas é possível diagnosticar avarias e pequenos defeitos numa fase inicial. Esta análise será efetuada através da utilização de bobinas de teste, cuja configuração e dimensionamento serão apresentados e discutidos. Por fim serão apresentados os resultados obtidos e as principais conclusões.

Palavras-chave: Transformadores de potência; deteção de defeitos internos; fluxo de fugas.

## **Abstract**

Transformers are a key part of electric power production and distribution systems. They are one of the most expensive equipment present in any substation or generating unit. An unexpected breakdown can lead to high losses due to the repair or replacement of the equipment, but also to the costs of unsold energy and interruptions in the power supply. Thus, there is an increased requirement for transformer maintenance and protection systems to meet the high standards of reliability and quality of service. The development of new methods for fault diagnosis and real-time monitoring of these machines has received particular attention from the scientific community in order to detect defects at their earliest stage and avoid catastrophic failures.

The work presented in this dissertation has as main objective to verify if it is possible through the analysis of the leakage flow diagnose faults and small defects in an initial phase. This analysis will be done using search coils, presented and analysed here. Finally, the results obtained, and the main conclusions will be presented.

Key-words: Power transformers; Internal fault detection; leakage flux.

## Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Objetivo .....	2
1.2 Estrutura da dissertação .....	2
Capítulo 2 – Diagnóstico de avarias em transformadores.....	3
2.1 Descrição das principais avarias .....	3
2.2 Métodos de diagnóstico .....	5
2.2.1 Análise de gases dissolvidos no óleo .....	5
2.2.2 Análise do óleo .....	5
2.2.3 Determinação do grau de polimerização.....	5
2.2.4 Análise dos compostos furânicos.....	6
2.2.5 Resistência de isolamento e índice de polarização .....	6
2.2.6 Fator de perdas do dielétrico ou $\tan(\delta)$ .....	6
2.2.7 Resistência dos enrolamentos .....	6
2.2.8 Relação entre espiras.....	7
2.2.9 Temperatura .....	7
2.2.10 Corrente de excitação.....	7
2.2.11 Descargas parciais.....	7
2.2.12 Análise da resposta em frequência.....	8
2.2.13 Indutância de fugas .....	8
2.2.14 Monitorização contínua do fluxo de fugas.....	8
Capítulo 3 – Detecção de defeitos: Método proposto .....	10
3.1 Distribuição do fluxo .....	10
3.1.1 Bobinas de teste .....	11
3.1.1.1 Princípio .....	11
3.1.1.2 Geometria e localização .....	12
3.1.1.3 Bobinas de teste horizontais .....	12
3.1.1.4 Bobinas de teste verticais .....	13
3.2 Caracterização do fluxo de fugas.....	13
Capítulo 4 – Modelo do transformador monofásico .....	15
4.1 Análise pelo método de elementos finitos: FEM.....	15
4.2 Modelo monofásico .....	15
4.2.1 Características .....	15

4.2.2	Funcionamento em regime nominal – Ausência de defeito.....	17
4.2.3	Análise estática .....	20
4.2.3.1	Normal.....	20
4.2.3.2	Curto-circuito .....	21
4.2.3.3	Deformação .....	23
4.2.4	Influência do regime de carga do transformador .....	25
4.2.4.1	Regime de funcionamento em vazio .....	25
4.2.4.2	Regime de funcionamento com 50% da carga nominal .....	26
4.2.4.3	Regime de funcionamento em sobrecarga .....	27
4.2.4.4	Regime de funcionamento com defeito externo.....	28
Capítulo 5	– Ocorrência de curtos-circuitos entre espiras .....	30
5.1	Curto-circuito entre espiras no enrolamento primário.....	30
5.1.1	Curtos-circuitos entre espiras na zona A do enrolamento primário.....	30
5.1.2	Curtos-circuitos entre espiras na zona B do enrolamento primário.....	34
5.1.3	Curtos-circuitos entre espiras na zona C do enrolamento primário.....	37
5.1.3.1	Bobina auxiliar .....	39
5.1.4	Curtos-circuitos entre espiras na zona D do enrolamento primário.....	40
5.1.5	Curtos-circuitos entre espiras na zona E do enrolamento primário .....	40
5.1.6	Síntese: CC entre espiras no enrolamento primário.....	41
5.2	Curto-circuito entre espiras no enrolamento secundário .....	41
5.2.1	Curtos-circuitos entre espiras na zona E do enrolamento secundário.....	42
5.3	Influência da dimensão e localização das bobinas de teste .....	44
5.3.1	Dimensão das bobinas de teste .....	44
5.3.2	Localização das bobinas de teste verticais.....	45
5.3.3	Localização das bobinas de teste horizontais.....	47
Capítulo 6	– Deformações nos enrolamentos.....	49
6.1	Deslocamento ascendente do enrolamento externo.....	49
6.2	Deslocamento ascendente do enrolamento interno .....	51
6.3	Alongamento vertical do enrolamento externo .....	53
6.3.1	Alongamento assimétrico.....	53
6.3.2	Alongamento simétrico.....	55
6.4	Alongamento vertical do enrolamento interno .....	57
6.5	Contração vertical do enrolamento externo.....	58
6.6	Contração vertical do enrolamento interno .....	60

6.7 Deformação radial: alteração do diâmetro dos enrolamentos .....	62
6.8 Influência da posição dos enrolamentos no transformador .....	63
6.9 Síntese.....	65
Capítulo 7 – Modelo do transformador trifásico.....	66
7.1 Funcionamento em regime nominal .....	66
7.2 Curto-circuito no enrolamento primário: Fase A – Zona E.....	68
7.3 Curto-circuito no enrolamento primário: Fase B – Zona E.....	71
7.4 Alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior: Fase A .....	73
7.5 Alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior: Fase B.....	75
7.6 Síntese.....	77
Capítulo 8 – Resultados experimentais .....	78
8.1 Características do transformador laboratorial.....	78
8.2 Ensaio com condições de funcionamento sem defeito .....	79
8.3 CC na zona superior do primário com enrolamentos simétricos.....	80
8.4 CC na zona central do primário com enrolamentos simétricos .....	82
8.5 CC na zona inferior do primário com enrolamentos simétricos.....	83
8.6 Deformação – Deslocamento ascendente do enrolamento externo .....	86
8.7 Enrolamentos assimétricos .....	87
8.8 CC na zona superior do primário com enrolamentos assimétricos .....	90
8.9 Síntese.....	91
Capítulo 9 – Conclusões e trabalho futuro .....	92
Referências .....	93

## Índice de figuras

Figura 2.1 – Curva da banheira [1]. .....	3
Figura 2.2 – Direção das forças mecânicas nos enrolamentos: (a) – esforços radiais e axiais sem deslocamento; (b) – esforços radiais e axiais com deslocamento [3]. .....	4
Figura 2.3 – Localização das bobinas de teste: (a) sobre o enrolamento de alta tensão para medição do fluxo axial [6]; (b) junto ao núcleo para medição do fluxo axial [8]; (c) sobre o enrolamento exterior para medição do fluxo de fugas radial [9]. .....	9
Figura 2.4 – Sensores planares: (a) constituição - vista topo; (b) exemplo de colocação [10]. .	9
Figura 3.1 – Distribuição do fluxo em transformador e referencial das componentes do fluxo de fugas (adaptado de [11])......	10
Figura 3.2 – Geometria e localização das bobinas de teste. ....	12
Figura 3.3 – Configuração das bobinas de teste horizontais. ....	13
Figura 3.4 – Configuração das bobinas de teste verticais. ....	14
Figura 3.5 – Efeito de dispersão do fluxo: (a) enrolamentos simétricos; (b) enrolamentos com dimensões diferentes ou assimétricos; (c) presença de uma distribuição de corrente não uniforme [3].....	14
Figura 3.6 – Distribuição do fluxo de fugas para o caso de um CC no enrolamento exterior [1]. .....	14
Figura 4.1 – Dimensões e geometria do núcleo, enrolamentos e bobinas de teste (em mm)...	16
Figura 4.2 – Esquema do transformador monofásico em regime nominal. ....	17
Figura 4.3 – Gráficos com as características nominais do transformador: (a) tensões nominais; (b) correntes nominais; (c) fluxo que abraça os enrolamentos; (d) fluxo que abraça as bobinas de teste. ....	18
Figura 4.4 – Gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais (a) e verticais (b) e respectivas ondas do MDTI.....	19
Figura 4.5 – Linhas de fluxo em regime de funcionamento nominal. ....	20
Figura 4.6 – Representação gráfica do modelo normal (dimensões em mm). ....	21
Figura 4.7 – Distribuição do fluxo ao longo das laterais do núcleo no modelo normal: (a) linha x que corresponde ao fluxo axial; (b) linha y que corresponde ao fluxo radial. ....	21
Figura 4.8 – Representação gráfica do modelo com curto-circuito (dimensões em mm).....	22
Figura 4.9 – Distribuição do fluxo ao longo das laterais do núcleo no modelo com curto-circuito: (a) linha x que corresponde ao fluxo axial; (b) linha y que corresponde ao fluxo radial.....	22
Figura 4.10 – Representação gráfica do modelo com deslocamento dos enrolamentos. ....	24

Figura 4.11 – Distribuição do fluxo ao longo das laterais do núcleo no modelo com deslocamento dos enrolamentos: (a) linha x que corresponde ao fluxo axial; (b) linha y que corresponde ao fluxo radial. ....	24
Figura 4.12 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para vazio. ....	25
Figura 4.13 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso de uma comutação do regime de carga de nominal para a condição de vazio.....	26
Figura 4.14 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para meia carga. ....	26
Figura 4.15 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso da comutação do regime de carga de nominal para meia carga.....	27
Figura 4.16 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para sobrecarga.....	27
Figura 4.17 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso da comutação do regime de carga de nominal para sobrecarga. ....	28
Figura 4.18 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para defeito externo.....	28
Figura 4.19 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso da comutação do regime de carga de nominal para defeito externo. ....	29
Figura 5.1 – Localização dos curtos-circuitos entre espiras no enrolamento primário.....	30
Figura 5.2 – Esquema elétrico utilizado na modelação do defeito na zona A do enrolamento primário. ....	31
Figura 5.3 – Correntes primária, secundária e de curto-circuito: (a) CC em 1% na zona superior do enrolamento primário; (b) CC em 20% na zona superior do enrolamento primário.....	32
Figura 5.4 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona A. ....	33
Figura 5.5 – Linhas de fluxo para um defeito na zona A do enrolamento primário, em t=125 ms. ....	34
Figura 5.6 – Esquema elétrico utilizado na modelação do defeito na zona B do enrolamento primário. ....	35
Figura 5.7 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona B. ....	36
Figura 5.8 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona C. ....	38

Figura 5.9 – Gráficos das tensões induzidas nas BT com inclusão de uma bobina de teste auxiliar no centro para um CC de 20% localizado na zona C.....	39
Figura 5.10 – Linhas de fluxo do CC na zona C (1%, 5%, 10% e 20% respetivamente) em $t = 125$ ms no enrolamento primário. ....	41
Figura 5.11 – Localização dos curtos-circuitos entre espiras no enrolamento secundário. ....	41
Figura 5.12 – Esquema elétrico utilizado na modelação do defeito na zona E do enrolamento secundário.....	42
Figura 5.13 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona E.....	43
Figura 5.14 – Influência da dimensão das BTV: (a) 5% em relação ao enrolamento primário; (b) 30% em relação ao enrolamento primário. ....	45
Figura 5.15 – Localização das BTV: (a) junto ao núcleo; (b) entre os enrolamentos; (c) exterior aos enrolamentos. ....	46
Figura 5.16 – Tensão induzida nas BTV e MDTI: (a) junto ao núcleo; (b) entre os enrolamentos; (c) no exterior dos enrolamentos. ....	46
Figura 5.17 – BTV com localização desalinhada.....	47
Figura 5.18 – Tensão induzida nas BTV e MDTI: Localização vertical desalinhada. ....	47
Figura 5.19 – Diversas localizações para as BTH: (a) junto ao núcleo; (b) posição intermédia entre o núcleo e os enrolamentos; (c) junto aos enrolamentos.....	48
Figura 5.20 – Gráficos de $v_{HT}$ , $v_{HB}$ e $\Delta v_H$ para diferentes localizações das bobinas de teste horizontais: (a) junto ao núcleo; (b) posição intermédia; (c) junto aos enrolamentos. ....	48
Figura 6.1 – Geometria utilizada no estudo de um deslocamento ascendente do enrolamento externo.....	50
Figura 6.2 – Tensões induzidas nas BT's no caso de um deslocamento ascendente do enrolamento externo.....	50
Figura 6.3 – Geometria utilizada no estudo de um deslocamento ascendente do enrolamento interno.....	51
Figura 6.4 – Tensões induzidas nas BT's para um deslocamento ascendente do enrolamento interno.....	52
Figura 6.5 – Geometria utilizada no estudo de um alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.....	54
Figura 6.6 – Tensões induzidas nas BT's para um alongamento assimétrico vertical do enrolamento externo.....	54

Figura 6.7 – Geometria utilizada no estudo de um alongamento vertical simétrico do enrolamento externo.....	56
Figura 6.8 – Tensões induzidas nas BT's para um alongamento simétrico vertical do enrolamento externo.....	56
Figura 6.9 – Geometria utilizada no estudo de um alongamento vertical assimétrico do enrolamento interno.....	57
Figura 6.10 – Tensões induzidas nas BT's para um alongamento vertical do enrolamento interno.....	58
Figura 6.11 – Geometria utilizada no estudo de uma contração vertical assimétrica do enrolamento externo.....	59
Figura 6.12 – Tensões induzidas nas BT's para uma contração vertical do enrolamento externo.....	59
Figura 6.13 – Geometria utilizada no estudo de uma contração vertical assimétrica do enrolamento interno.....	60
Figura 6.14 – Tensões induzidas nas BT's para uma contração vertical do enrolamento interno.....	61
Figura 6.15 – Geometria utilizada no estudo de uma deformação radial: alteração do diâmetro dos enrolamentos.....	62
Figura 6.16 – Tensões induzidas nas BT's para uma alteração do diâmetro dos enrolamentos.....	63
Figura 6.17 – Geometria utilizada no estudo da influência da posição dos enrolamentos no transformador.....	64
Figura 6.18 – Tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) com os enrolamentos assimétricos mais próximos da base.....	64
Figura 7.1 – Dimensões e geometria utilizadas na modelação do transformador trifásico (em mm).....	67
Figura 7.2 – Esquema elétrico do transformador trifásico em regime nominal.....	67
Figura 7.3 – Tensões induzidas de referência nas bobinas de teste: (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.....	67
Figura 7.4 – Esquema utilizado na modelação do transformador trifásico para um CC na zona E da fase A.....	69
Figura 7.5 – Resultados obtidos para um CC no enrolamento primário da fase A.....	70
Figura 7.6 – Esquema utilizado na modelação do transformador trifásico para um CC na zona E da fase B.....	71

Figura 7.7 – Resultados obtidos para um CC no enrolamento primário da fase B. ....	72
Figura 7.8 – Modelo trifásico para estudo do alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior: Fase A. ....	73
Figura 7.9 – Resultados obtidos para uma assimetria na fase A: alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.....	74
Figura 7.10 – Modelo trifásico para o estudo do alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior na fase B.....	75
Figura 7.11 – Resultados obtidos para uma assimetria na fase B: alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.....	76
Figura 8.1 – Aspeto, geometria e dimensões do transformador laboratorial e BT's (dimensões em mm). ....	78
Figura 8.2 – Esquema do transformador utilizado em laboratório nas suas condições normais de funcionamento. ....	79
Figura 8.3 – Resultados do caso de referência. ....	80
Figura 8.4 – Esquema utilizado na modelação do transformador utilizado em laboratório com a existência de um CC no topo do enrolamento primário.....	81
Figura 8.5 – Resultados do caso com CC na zona superior do enrolamento primário e enrolamentos simétricos. ....	82
Figura 8.6 – Esquema do transformador utilizado em laboratório com CC no centro do enrolamento primário. ....	83
Figura 8.7 – Resultados do caso com CC na zona central do enrolamento primário e enrolamentos simétricos.....	84
Figura 8.8 – Esquema do transformador laboratorial com CC na zona inferior do enrolamento primário. ....	85
Figura 8.9 – Resultados do caso com CC na zona inferior do enrolamento primário e enrolamentos simétricos.....	85
Figura 8.10 – Geometria representativa da deformação em estudo: Deslocamento ascendente do enrolamento externo.....	86
Figura 8.11 – Resultados do caso com deslocamento ascendente do enrolamento externo. ...	87
Figura 8.12 – Geometria representativa da geometria utilizada no modelo com enrolamentos assimétricos. ....	88
Figura 8.13 – Resultados do caso com enrolamentos assimétricos.....	89
Figura 8.14 – Resultados do caso com CC na zona superior do enrolamento primário e enrolamentos assimétricos.....	90

## Índice de tabelas

Tabela 4.1 Características elétricas do transformador [16].	16
Tabela 4.2 – Parâmetros nominais do transformador.	16
Tabela 4.3 – Valores de pico das tensões, correntes e fluxos para o regime nominal.	17
Tabela 4.4 – Valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste para o regime nominal.	19
Tabela 5.1 – Valores da resistência de defeito.	31
Tabela 5.2 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT e MDTI para um defeito no enrolamento primário: zona A.	32
Tabela 5.3 – Valores da resistência de defeito de modo a garantir $I_{cc} = 2I_n$ .	35
Tabela 5.4 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT e MDTI para um defeito no enrolamento primário: zona B.	37
Tabela 5.5 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT e MDTI para um defeito no enrolamento primário: zona C.	39
Tabela 5.6 – Valores de pico das tensões induzidas nas BTH, BTV e bobina de teste auxiliar para o caso de um defeito no enrolamento primário: zona C.	39
Tabela 5.7 – Valores da resistência de defeito de modo a garantir $I_{cc} = 2I_n$ .	44
Tabela 5.8 – Dados da simulação de um CC na zona E do enrolamento secundário.	44
Tabela 5.9 – Valores de pico das tensões induzidas nas BTV na análise da influência da sua dimensão.	45
Tabela 5.10 – Valores de pico da tensão induzida nas BTV na análise da sua localização.	46
Tabela 5.11 – Valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais na análise da sua localização.	48
Tabela 6.1 – Valores de pico das tensões induzidas: deslocamento ascendente do enrolamento externo.	51
Tabela 6.2 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: deslocamento ascendente do enrolamento interno.	52
Tabela 6.3 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.	55
Tabela 6.4 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alongamento vertical simétrico do enrolamento externo.	57
Tabela 6.5 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alongamento vertical do enrolamento interno.	57

Tabela 6.6 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: contração vertical do enrolamento externo.....	60
Tabela 6.7 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: contração vertical do enrolamento interno.....	61
Tabela 6.8 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alteração do diâmetro dos enrolamentos. ....	62
Tabela 6.9 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: influência da posição dos enrolamentos. ....	64
Tabela 7.1 – Valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste do modelo trifásico de referência.....	67
Tabela 7.2 – Tabela com os valores da resistência de defeito ( $R_{cc}$ ). ....	68
Tabela 7.3 – Valores de pico das tensões induzidas no modelo trifásico: CC no enrolamento primário da fase A – zona E.....	69
Tabela 7.4 – Valores de pico das tensões induzidas no modelo trifásico: CC no enrolamento primário da fase B – zona E. ....	71
Tabela 7.5 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's no modelo trifásico: alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior da fase A. ....	73
Tabela 7.6 – Valores de pico das tensões induzidas no modelo trifásico: alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior da fase B. ....	75
Tabela 8.1 – Características do transformador utilizado em laboratório. ....	78
Tabela 8.2 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's: funcionamento nominal.....	79
Tabela 8.3 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona superior do enrolamento primário e com os enrolamentos simétricos. ....	81
Tabela 8.4 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona central do enrolamento primário e com os enrolamentos simétricos. ....	83
Tabela 8.5 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona inferior do enrolamento primário e com os enrolamentos simétricos. ....	86
Tabela 8.6 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um deslocamento ascendente do enrolamento externo. ....	86

Tabela 8.7 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de uma localização assimétrica dos enrolamentos. ....	89
Tabela 8.8 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona superior do enrolamento primário e com os enrolamentos assimétricos. ....	91

## Lista de Símbolos

$f$  – Frequência (Hz);

$I_n$  – Corrente nominal (A);

$i_p$  – Corrente no enrolamento primário (A);

$\hat{I}_p$  – Valor de pico da corrente no enrolamento primário (A);

$I_p$  – Valor eficaz da corrente no enrolamento primário (A);

$\hat{I}_{pT}$  – Valor de pico teórico da corrente no enrolamento primário (A);

$I_{pT}$  – Valor eficaz teórico da corrente no enrolamento primário (A);

$i_s$  – Corrente no enrolamento secundário (A);

$\hat{I}_s$  – Valor de pico da corrente do enrolamento secundário (A);

$I_s$  – Valor eficaz da corrente no enrolamento secundário (A);

$I_{sL}$  – Valor eficaz da corrente de linha no enrolamento secundário (A);

$\hat{I}_{sT}$  – Valor de pico teórico da corrente do enrolamento secundário (A);

$I_{sT}$  – Valor eficaz teórico da corrente no enrolamento secundário (A);

$n_{BTHB}$  – Número de espiras da bobina de teste horizontal inferior;

$n_{BHTH}$  – Número de espiras da bobina de teste horizontal superior;

$n_{BTVB}$  – Número de espiras da bobina de teste vertical inferior;

$n_{BTVT}$  – Número de espiras da bobina de teste vertical superior;

$n_{cc}$  – Número de espiras em curto-circuito;

$n_p$  – Número de espiras do enrolamento primário;

$n_p'$  – Número de espiras da parte superior do enrolamento primário;

$n_p''$  – Número de espiras da parte inferior do enrolamento primário;

$n_s$  – Número de espiras do enrolamento secundário;

$\hat{\Phi}_{BHB}$  – Valor de pico do fluxo que abraça a bobina de teste horizontal inferior (mWb);

$\Phi_{BHB}$  – Valor eficaz do fluxo que abraça a bobina de teste horizontal inferior (mWb);

$\hat{\Phi}_{BHT}$  – Valor de pico do fluxo que abraça a bobina de teste horizontal superior (mWb);

$\Phi_{BHT}$  – Valor eficaz do fluxo que abraça a bobina de teste horizontal superior (mWb);

$\hat{\Phi}_{BVB}$  – Valor de pico do fluxo que abraça a bobina de teste vertical inferior (mWb);

$\Phi_{BVB}$  – Valor eficaz do fluxo que abraça a bobina de teste vertical inferior (mWb);

$\hat{\Phi}_{BVT}$  – Valor de pico do fluxo que abraça a bobina de teste vertical superior (mWb);

$\Phi_{BVT}$  – Valor eficaz do fluxo que abraça a bobina de teste vertical superior (mWb);

$\hat{\Phi}_p$  – Valor de pico do fluxo que abraça o enrolamento primário (Wb);

$\Phi_P$  – Valor eficaz do fluxo que abraça o enrolamento primário (Wb);  
 $\hat{\Phi}_S$  – Valor de pico do fluxo que abraça o enrolamento secundário (Wb);  
 $\Phi_S$  – Valor eficaz do fluxo que abraça o enrolamento secundário (Wb);  
 $R_1$  – Resistência da fonte de alimentação utilizada em laboratório ( $\Omega$ );  
 $R_2$  – Resistência de carga do ensaio em curto-circuito utilizada em laboratório ( $\Omega$ );  
 $R_c$  – Resistência de carga nominal ( $\Omega$ );  
 $R_c'$  – Resistência de carga comutada ( $\Omega$ );  
 $R_{cc}$  – Resistência de curto-circuito ( $\Omega$ );  
 $R_f$  – Resistência da fonte (m $\Omega$ );  
 $S$  – Potência aparente (VA);  
 $\hat{V}_{AB}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste inferior da fase A (V);  
 $V_{AB}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste inferior da fase A (V);  
 $\hat{V}_{AT}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste superior da fase A (V);  
 $V_{AT}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste superior da fase A (V);  
 $\hat{V}_{BB}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste inferior da fase B (V);  
 $V_{BB}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste inferior da fase B (V);  
 $\hat{V}_{BT}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste superior da fase B (V);  
 $V_{BT}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste superior da fase B (V);  
 $\hat{V}_{CB}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste inferior da fase C (V);  
 $V_{CB}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste inferior da fase C (V);  
 $\hat{V}_{CT}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste superior da fase C (V);  
 $V_{CT}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste superior da fase C (V);  
 $\hat{V}_{HB}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste horizontal inferior (V);  
 $V_{HB}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste horizontal inferior (V);  
 $\hat{V}_{HT}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste horizontal superior (V);  
 $V_{HT}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste horizontal superior (V);  
 $\hat{v}_p$  – Valor de pico da tensão no enrolamento primário (V);  
 $V_p$  – Valor eficaz da tensão no enrolamento primário (V);  
 $v_p$  – Tensão no enrolamento primário (V);  
 $v_p'$  – Tensão na parte superior do enrolamento primário (V);  
 $v_p''$  – Tensão na parte inferior do enrolamento primário (V);  
 $\hat{v}_s$  – Valor de pico da tensão no enrolamento secundário (V);  
 $V_s$  – Valor eficaz da tensão no enrolamento secundário (V).

$v_S$  – Tensão no enrolamento secundário (V);  
 $\widehat{V}_{VB}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste vertical inferior (V);  
 $V_{VB}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste vertical inferior (V);  
 $\widehat{V}_{VC}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste vertical central (V);  
 $V_{VC}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste vertical central (V);  
 $\widehat{V}_{VT}$  – Valor de pico da tensão induzida na bobina de teste vertical superior (V);  
 $V_{VT}$  – Valor eficaz da tensão induzida na bobina de teste vertical superior (V);  
 $x$  – Linha por onde se fecha o fluxo radial;  
 $y$  – Linha por onde se fecha o fluxo axial;  
 $\Delta\widehat{V}_A$  – Valor de pico do MDTI da fase A (V);  
 $\Delta V_A$  – Valor eficaz do MDTI da fase A (V);  
 $\Delta\widehat{V}_B$  – Valor de pico do MDTI da fase B (V);  
 $\Delta V_B$  – Valor eficaz do MDTI da fase B (V);  
 $\Delta\widehat{V}_C$  – Valor de pico do MDTI da fase C (V);  
 $\Delta V_C$  – Valor eficaz do MDTI da fase C (V);  
 $\Delta\widehat{V}_H$  – Valor de pico do MDTI das bobinas de teste horizontais (V);  
 $\Delta V_H$  – Valor eficaz do MDTI das bobinas de teste horizontais (V);  
 $\Delta\widehat{V}_V$  – Valor de pico do MDTI das bobinas de teste verticais (V);  
 $\Delta V_V$  – Valor eficaz do MDTI das bobinas de teste verticais (V);  
 $\lambda_{P\text{ máx}}$  – Valor máximo do fluxo encadeado no enrolamento primário (Wb);  
 $\lambda_{S\text{ máx}}$  – Valor máximo do fluxo encadeado no enrolamento secundário (Wb).

## **Abreviaturas**

BT – Bobina de teste;

BT's – Bobinas de teste;

BTC – Bobina de teste central;

BTFA – Bobinas de teste da fase A;

BTFB – Bobinas de teste da fase B;

BTFC – Bobinas de teste da fase C;

BTH – Bobinas de teste horizontais;

BTV – Bobinas de teste verticais;

CA – Corrente alternada;

CC – Curto-circuito;

Def. – Deformação;

Dim. – Dimensão;

FEM – Finite element method;

FMM – Força magnetomotriz;

MDTI – Método diferencial das tensões induzidas;

p.u. – Por unidade.



## Capítulo 1 – Introdução

Nos primórdios da eletrotécnica produzia-se energia sem grandes preocupações com o meio ambiente e o rendimento das máquinas. Com a eletrificação à escala global e a utilização cada vez maior de eletricidade esta situação foi-se alterando. Desenvolveram-se novas tecnologias e surgiram as primeiras produções de energia utilizando recursos renováveis. Nos dias que correm, os sistemas elétricos têm de lidar com a produção de energia proveniente de diversas fontes (carvão e vento, por exemplo) e locais distintos. Estes aspetos levam a uma enorme complexidade do sistema e a uma gestão, quer da própria energia quer de equipamentos e equipas, sem precedentes ao longo da história da eletricidade.

Os transformadores sempre se revelaram peças fundamentais de qualquer sistema elétrico em corrente alternada (CA). Sem a sua invenção a rede de distribuição não seria aquilo que hoje se conhece. Esta máquina permite que a produção de eletricidade se efetue a níveis de tensão relativamente baixos e seguros e posteriormente elevada de modo a diminuir as perdas existentes no transporte. Este aspeto permite que a produção de energia se realize a diferentes níveis de tensão (uma turbina eólica produz energia a um nível de tensão diferente de uma turbina de uma central termoelétrica, por exemplo) e a tensão na rede de distribuição permaneça constante.

Sendo esta máquina um componente vital que pode levar à inoperacionalidade de todo o sistema de transporte de energia elétrica, deve-se manter o seu bom estado de funcionamento e adaptar as técnicas de manutenção em função da sua vida útil/estado de funcionamento. Existem diversos métodos de deteção de avarias: alguns requerem a remoção do transformador de serviço enquanto outros não fornecem informação suficiente no caso de pequenos defeitos.

Os pequenos defeitos, como curtos-circuitos (CC) num número reduzido de espiras provocam alterações mínimas nas grandezas elétricas destas máquinas. As proteções possuem uma característica de disparo própria, não linear, para evitar disparos intempestivos. Ao mesmo tempo que são evitados estes disparos, a sua sensibilidade também é reduzida, não sendo possível atuar ou alertar uma equipa para este tipo de defeitos.

Os apagões são fenómenos raros nos dias de hoje, evitados pelos avanços tecnológicos nesta área e por alguns registos históricos de acontecimentos que marcaram, de forma negativa, a reputação da eletricidade. Além de indesejados, estes apagões provocam perdas económicas consideráveis para as operadoras de energia. Uma avaria catastrófica num transformador pode originar um apagão, afetando áreas populacionais consideráveis.

## 1.1 Objetivo

Esta dissertação tem como principal objetivo verificar a possibilidade de detetar anomalias nos enrolamentos de transformadores através da análise do fluxo de fugas. O fluxo de fugas, ainda que os fabricantes o tentem reduzir, estará sempre presente. Defeitos que ocorram no interior destas máquinas provocam alterações na circulação do fluxo e alteram não apenas o fluxo que é útil (fecha-se pelo circuito magnético) mas também o fluxo de fugas. Os principais defeitos analisados neste documento são curtos-circuitos entre espiras e deformações nos enrolamentos. Este estudo tem na sua base modelos computacionais que recorrem ao método de elementos finitos (FEM – Finite element method). O método FEM reparte a geometria do transformador em pequenos triângulos analisando posteriormente cada um de modo individual. Os resultados finais são obtidos através da soma dos resultados de cada triângulo. Este método é o mais utilizado neste tipo de análise devido à complexa geometria e fenómenos associados. É também dos métodos que permite obter resultados de uma forma mais rápida.

A deteção de defeitos terá na sua base o desenvolvimento de vários dispositivos de teste que permitam efetuar a monitorização contínua do fluxo de fugas. Estes dispositivos serão apelidados de bobinas de teste (BT's) e os seus princípios de funcionamento serão descritos ao longo deste documento.

## 1.2 Estrutura da dissertação

Após esta introdução, segue-se o capítulo 2 onde se descreve o estado da arte e são apresentados os principais avanços tecnológicos nesta área.

O capítulo 3 descreve os princípios do método de identificação de defeitos proposto e os princípios teóricos que o tornam possível.

Nos capítulos 4, 5 e 6 efetua-se uma análise detalhada do funcionamento do transformador monofásico, em regime nominal e em condição de avaria, e verificam-se os pressupostos teóricos enunciados no capítulo 3.

O capítulo 7 apresenta o modelo trifásico, onde também são validados os conceitos teóricos explicados no capítulo 3.

No capítulo 8 surgem os resultados laboratoriais onde é realizada uma validação prática dos capítulos anteriores.

Finalmente, no capítulo 9, apresentam-se as conclusões e algumas sugestões de trabalho futuro nesta área.

## Capítulo 2 – Diagnóstico de avarias em transformadores

Antes da introdução ao método proposto é importante conhecer os principais avanços tecnológicos e alguns trabalhos nesta área de investigação, o chamado ‘estado da arte’. Após esta contextualização apresentam-se as avarias mais comuns e os métodos de diagnóstico de utilização mais vulgar nos dias de hoje.

### 2.1 Descrição das principais avarias

De forma semelhante à maioria dos equipamentos, a evolução ao longo do tempo da taxa de avarias em transformadores é usualmente descrita pela curva apresentada na figura 2.1, designada por curva da banheira, devido à sua forma e aspeto. Esta curva divide o tempo de funcionamento do equipamento em três períodos distintos [1]:

- Mortalidade infantil – Este período é, na maior parte dos casos, bastante curto e possui uma taxa de avarias elevada, com tendência decrescente. As falhas são devidas a erros de projeto, defeitos de fabrico, montagem deficiente, entre outros [1].
- Vida útil – A sua principal característica é o facto de a taxa de avarias permanecer aproximadamente constante. As anomalias ocorrem, regra geral, devido a ocorrências externas ao equipamento, erros de manutenção e/ou operação, entre outras [1].
- Envelhecimento – Quando a vida útil do equipamento se esgota surge o período de envelhecimento onde a taxa de avarias possui uma tendência crescente e tende a aumentar ao longo dos anos. As irregularidades surgem maioritariamente pelo desgaste e fadiga dos materiais [1].

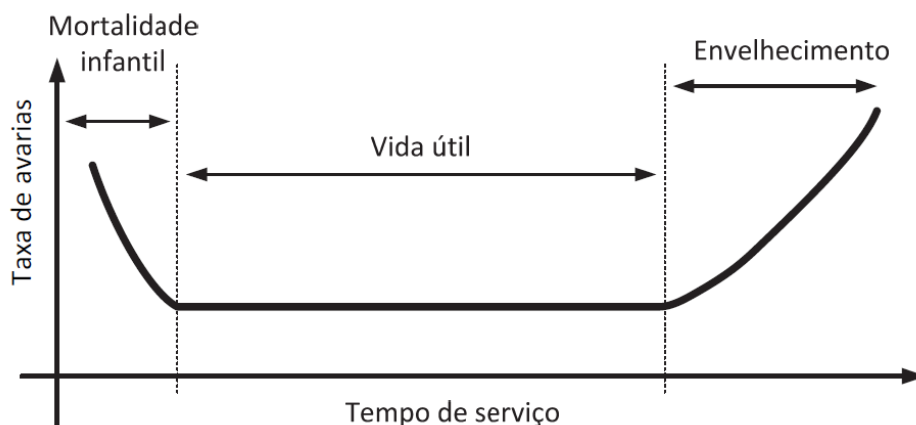


Figura 2.1 – Curva da banheira [1].

As avarias numa máquina deste tipo podem ter múltiplas origens, tais como elétrica, mecânica e térmica ou, na maior parte dos casos, uma associação destas. Torna-se assim complexa a tarefa de caracterizar um modo de falha típico dos transformadores. Em acréscimo, é também difícil localizar e definir com alguma precisão o ponto de início do defeito e explicar o efeito ‘bola de neve’ que se segue [1].

Um estudo realizado ao longo de vários anos demonstrou que cerca de 70 a 80% do total de falhas em transformadores, a origem dos seus defeitos prende-se com anomalias no isolamento interno dos enrolamentos [1]. Este fenómeno traduz-se na prática em curtos-circuitos entre espiras. Estes envolvem, no seu estado inicial, uma pequena porção do enrolamento, tendo tendência a alastrar-se e a agravar-se ao longo do tempo. As falhas no isolamento são resultado da sua degradação devido a esforços térmicos, elétricos ou mecânicos [2].

Num transformador simples, de apenas dois enrolamentos, os fluxos provocados pelos enrolamentos primário e secundário encontram-se em sentidos opostos em relação ao circuito magnético comum. No espaço entre os enrolamentos os fluxos primário e secundário encontram-se no mesmo sentido, o que origina um fluxo resultante não nulo, o fluxo de fugas. A existência deste fluxo, aliado a outros fenómenos, origina a criação de forças de repulsão múltipla, provocando esforços mecânicos adicionais. Estas forças tendem a alterar a normal geometria dos enrolamentos e/ou a provocar a sua movimentação. Os diagramas simplificados presentes na figura 2.2 mostram que essas forças podem ser analisadas mediante os seguintes esforços [3]:

- Radiais – Tendem a expandir o enrolamento exterior e a contrair o enrolamento interior [3];
- Axiais – Tendem a comprimir a altura das bobinas ou a provocar a sua uma deslocação em sentidos opostos [3].

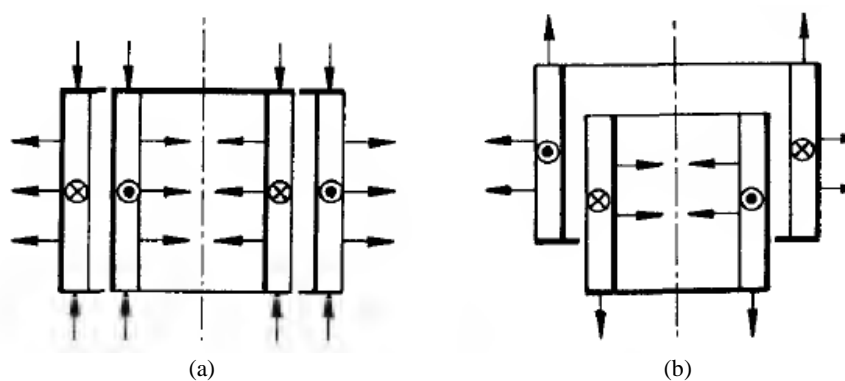


Figura 2.2 – Direção das forças mecânicas nos enrolamentos: (a) – esforços radiais e axiais sem deslocamento; (b) – esforços radiais e axiais com deslocamento [3].

## **2.2 Métodos de diagnóstico**

Existem diversos métodos de diagnóstico que visam determinar o estado de funcionamento do transformador. Parte dos métodos são considerados tradicionais, pois neles estão incluídas técnicas de utilização generalizada e com resultados confirmados. Os restantes são métodos recentes que se encontram ainda em fase de desenvolvimento. Abaixo segue uma lista com uma breve descrição dos principais métodos de diagnóstico existentes [1], [4].

### **2.2.1 Análise de gases dissolvidos no óleo**

O óleo isolante, sobre condições atípicas decompõe-se, libertando uma pequena quantidade de gases. A composição destes gases depende da severidade do defeito. Através da análise destes gases é possível diagnosticar a origem do problema. Este método requer que seja retirada uma amostra de óleo, durante um determinado período, para determinar a severidade e progressão do defeito. Os principais gases analisados são hidrogénio, metano, acetileno, etileno, etano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, nitrogénio e oxigénio. As desvantagens deste método prendem-se com as várias amostras de óleo necessárias e as sucessivas análises e comparações de resultados [5].

### **2.2.2 Análise do óleo**

As características do óleo influem em grande escala com o desempenho e tempo de vida do transformador. Para analisar as suas propriedades são conduzidos vários ensaios de carácter eléctrico, físico e químico com o intuito de verificar se ocorreram alterações significativas nas suas características e propriedades. De seguida são listados alguns ensaios que permitem efetuar esta análise [4]:

- Índice de acidez;
- Tensão interfacial;
- Cor;
- Lamas e sedimentos;
- Ponto de inflamação;
- Viscosidade cinemática;
- Teor de partículas.

### **2.2.3 Determinação do grau de polimerização**

A determinação do grau de polimerização da celulose é um método tradicional que permite analisar o estado de degradação do papel isolante. Este método consiste na medição do comprimento médio dos polímeros das moléculas de celulose. Ao longo do tempo a celulose envelhece e as cadeias de moléculas partem-se. Quando o envelhecimento é considerável o

papel torna-se quebradiço, perdendo parte das suas propriedades. A principal desvantagem do método é a retirada de serviço do aparelho e consequente abertura para amostragem. A amostra retirada pode não representar o estado real do papel pois existem zonas que suportam tensões e esforços distintos [1].

#### **2.2.4 Análise dos compostos furânicos**

O calor existente no interior da máquina origina compostos furânicos que se dissolvem no óleo. A sua análise, através de cromatografia líquida de alta pressão e alta resolução, permite determinar, ainda que de forma indireta, o grau de polimerização da celulose. Os resultados obtidos representam um valor médio de toda a estrutura de isolamento pois o papel não envelhece de modo uniforme [1].

#### **2.2.5 Resistência de isolamento e índice de polarização**

A medição da resistência de isolamento utiliza-se para obter a corrente de fugas no isolamento. Esta corrente dependente da temperatura, humidade e nível de impurezas existente nos materiais isolantes. Este teste fornece informações globais sobre a condição do isolamento.

O índice de polarização define-se pela razão entre as resistências de isolamento medidas após 1 e 10 minutos de tensão aplicada. Quando o isolamento se encontra em boas condições a sua resistência apresenta valores elevados. Um índice de polarização baixo indica problemas no transformador [1].

#### **2.2.6 Fator de perdas do dielétrico ou $\tan(\delta)$**

Quando se aplica uma tensão alternada a um material isolante, a corrente de fugas é composta por duas componentes, resistiva e capacitiva. No caso ideal, esta corrente seria puramente capacitiva, com um avanço de  $90^\circ$  relativamente à tensão. Na realidade existem perdas resistivas normais do material que reduzem o ângulo de avanço ( $<90^\circ$ ). Se as propriedades do dielétrico se degradarem, a componente resistiva da corrente de fugas aumenta. Deste modo o fator de perdas do dielétrico é definido como sendo a razão entre as componentes resistiva e capacitiva da corrente de fugas. Este fator pode também ser conhecido por  $\tan(\delta)$ , onde o ângulo  $\delta$  é o ângulo de perdas. Para traduzir os resultados do ensaio em aspetos práticos, quanto menor o valor de  $\tan(\delta)$  (ou a razão entre as componentes resistiva e capacitiva), menores são as perdas dielétricas, o que indica que o isolamento se encontra em boas condições. As principais desvantagens deste método prendem-se com o facto de esta técnica não detetar pequenos defeitos e de ser necessária a retirada de serviço do equipamento [1].

#### **2.2.7 Resistência dos enrolamentos**

Este ensaio visa a medição da resistência elétrica dos enrolamentos. Um aspeto a ter em conta é o facto de a resistência variar com a temperatura pelo que é necessário registar

simultaneamente a temperatura e resistência medidas. Mais tarde efetua-se uma conversão para uma temperatura padrão permitindo assim aferir o estado dos enrolamentos. Uma alteração destes valores igual ou superior a 2% é indicativa de defeito. A falta de sensibilidade e o carácter intrusivo são as principais desvantagens deste ensaio [5].

### **2.2.8 Relação entre espiras**

A medição da relação entre espiras consiste na medição da tensão nos enrolamentos. A razão de transformação medida deve possuir um erro inferior a 0.5% em relação à razão entre as tensões nominais. A vantagem principal é a facilidade de aplicação do método, pois normalmente as tensões estão em constante monitorização. A principal desvantagem prende-se com o facto de este método não detetar pequenos defeitos (poucas variações da tensão nos terminais dos enrolamentos) [4].

### **2.2.9 Temperatura**

O método tradicional consiste em medir a temperatura do óleo em dois locais distintos da cuba (partes superior e inferior) e efetuar uma estimativa para os enrolamentos. De modo a ultrapassar a falta de sensibilidade e incerteza do método anterior têm sido desenvolvidos novos sensores que visam a monitorização da temperatura diretamente nos enrolamentos. Apesar dos resultados promissores estes dispositivos encontram-se ainda em fase de desenvolvimento. Atualmente o método mais rápido e eficaz para medição da temperatura consiste na utilização de câmaras de análise termográfica [4].

### **2.2.10 Corrente de excitação**

Através da realização de um ensaio em vazio e medindo a corrente de excitação é possível detetar avarias no circuito magnético e nos enrolamentos dos transformadores. No caso trifásico, comparam-se as correntes entre as três fases, no caso monofásico a corrente é comparada com valores obtidos noutros ensaios ou em outros equipamentos similares. Algumas desvantagens deste método são o facto de a posição do regulador de tensão em carga influenciar a amplitude da corrente de excitação e a necessidade de retirar de serviço o equipamento [1].

### **2.2.11 Descargas parciais**

As descargas parciais são descargas elétricas que abrangem a estrutura isolante, de forma parcial, entre dois condutores. O número de descargas parciais tende a aumentar à medida que o isolamento do transformador se degrada, sendo a intensidade e frequência bons indicadores do estado dos materiais isolantes. A medição destas descargas efetua-se através da captação de ondas acústicas e elétricas que ocorrem simultaneamente com a descarga [1].

### **2.2.12 Análise da resposta em frequência**

Através da determinação da função de transferência da máquina podem ser detetadas anomalias nos enrolamentos, comparando os resultados obtidos com uma referência prévia (dados de fábrica). O defeito provoca uma alteração na geometria da máquina que, por sua vez, origina uma alteração na função de transferência. Este método possui algumas desvantagens tais como a necessidade de colocar o transformador fora de serviço, a existência de testes de referência e uma grande consistência na forma como os ensaios são conduzidos [1].

### **2.2.13 Indutância de fugas**

Um método convencional para detecção de alterações geométricas nos enrolamentos consiste na medição da indutância de fugas. Durante um curto-circuito são geradas forças tais que o diâmetro do enrolamento interior tende a diminuir e o do enrolamento exterior a aumentar. Estas alterações na geometria provocam um aumento do fluxo de fugas na zona entre os enrolamentos, o que implica uma maior reactância de fugas. A presença de curtos-circuitos entre espiras também afeta de forma significativa o fluxo de fugas. A medição da reactância de fugas, através do ensaio em curto-circuito, pode possibilitar a identificação destes defeitos [1].

Apesar dos dados promissores, existem outros fatores que alteram a medição da indutância de fugas. A influência da reactância de magnetização, o nível de tensão a que é conduzido o teste, a influência do tipo de ligações, o tipo de núcleo do transformador e a precisão do equipamento de medida, são apenas alguns exemplos. Adicionalmente, o carácter intrusivo do método constitui também uma desvantagem [1].

### **2.2.14 Monitorização contínua do fluxo de fugas**

Conforme referido anteriormente, o fluxo de fugas constitui um indicador do estado do transformador. Para possibilitar a monitorização contínua do fluxo de fugas têm sido propostos vários dispositivos que permitem medir esta grandeza sem remover o transformador de serviço, e assim identificar rapidamente defeitos que ocorram nos enrolamentos. Para a medição do fluxo de fugas são utilizadas bobinas de teste, inseridas junto dos enrolamentos do transformador. Têm sido propostas diversas soluções para a localização e formato destas bobinas de teste. Em [6]-[8] utilizam-se várias bobinas de teste concêntricas, dispostas ao longo da altura dos enrolamentos do transformador, possibilitando a medição conjunta do fluxo no núcleo e do fluxo de fugas. Para identificar a presença de defeitos comparam-se os sinais da tensão induzida nas várias bobinas de teste. A existência de diferenças entre esses sinais é indicadora da ocorrência de um defeito. Em [6] são utilizadas bobinas de teste colocadas sobre os dois enrolamentos do transformador, figura 2.3(a). O método requer um número significativo de bobinas de teste e um nível de isolamento elevado. Em [7] e [8] as bobinas de teste são

preferencialmente colocadas junto ao núcleo, figura 2.3(b), minimizando os requisitos de isolamento, pois o circuito magnético encontra-se normalmente ligado à terra. O sistema proposto requer, no entanto, um número significativo de sensores (18 no total, 6 por coluna). No trabalho apresentado em [9] utilizam-se bobinas de teste que permitem medir isoladamente a componente radial do fluxo de fugas. Estas bobinas de teste são colocadas sobre os enrolamentos de alta tensão, figura 2.3(c), exigindo um elevado nível de isolamento. Tem como principal vantagem o número reduzido de sensores e a maior sensibilidade da medição, pois detetam apenas as alterações no fluxo de fugas radial.

Mais recentemente foi proposta a utilização de sensores planares, [2] e [10], figura 2.4(a), localizados junto do núcleo, figura 2.4(b), para medição do fluxo de fugas radial. No caso proposto em [10] são necessários 15 sensores para aplicar o método de diagnóstico, podendo o seu número total variar consoante a dimensão e o tipo de transformador.

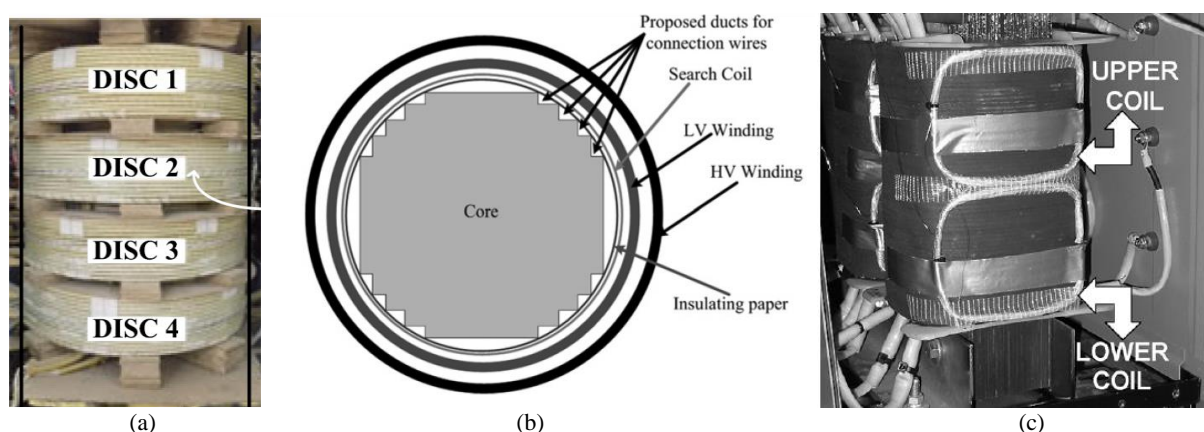


Figura 2.3 – Localização das bobinas de teste: (a) sobre o enrolamento de alta tensão para medição do fluxo axial [6]; (b) junto ao núcleo para medição do fluxo axial [8]; (c) sobre o enrolamento exterior para medição do fluxo de fugas radial [9].

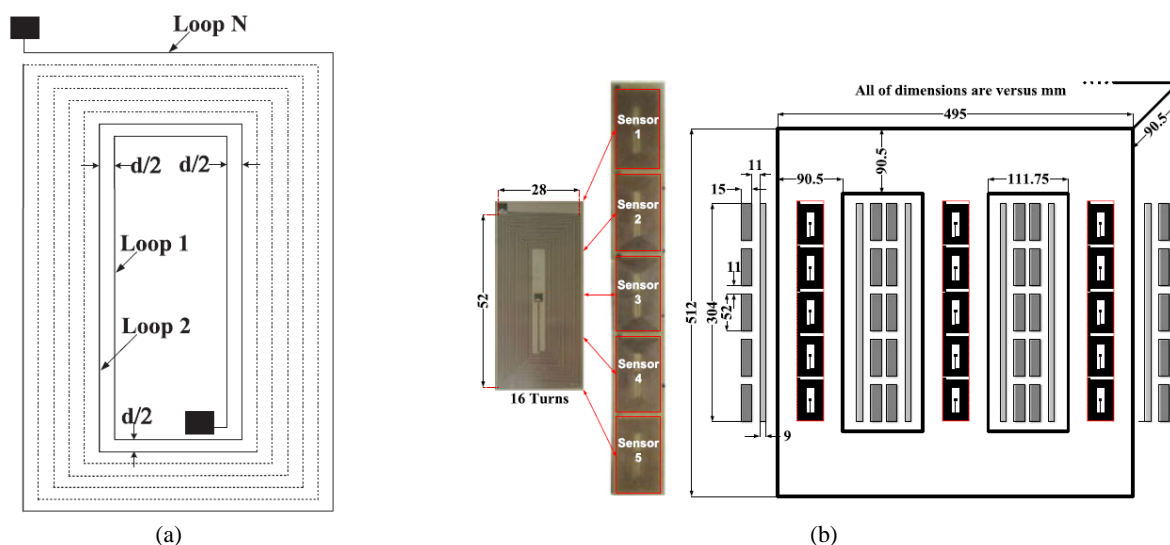


Figura 2.4 – Sensores planares: (a) constituição - vista topo; (b) exemplo de colocação [10].

## Capítulo 3 – Detecção de defeitos: Método proposto

O método proposto tem como objetivo a deteção de defeitos através da análise de parte do fluxo da máquina, o fluxo de fugas. Este capítulo analisa e aprofunda os princípios que sustentam a fundamentação deste método. De modo a simplificar esta exposição utilizou-se um modelo monofásico.

### 3.1 Distribuição do fluxo

A distribuição do fluxo é essencial para o funcionamento do transformador e é um fator bastante importante aquando do projeto destas máquinas. Para facilitar a explicação divide-se o fluxo em duas parcelas, o fluxo que é útil e que realiza efetivamente trabalho (fecha-se pelo circuito magnético) e o fluxo de dispersão (não se fecha pelo circuito magnético), que não contribui para a transferência de energia no transformador. O fluxo de dispersão engloba todo o fluxo que não circula pelo circuito magnético e que se fecha através de outros componentes da máquina, como o óleo (caso exista), o ar, os vários isolamentos, os próprios enrolamentos, etc. A figura 3.1 apresenta graficamente esta distribuição [11]-[14], válida para a situação onde a força magnetomotriz (FMM) do enrolamento externo é ligeiramente superior à FMM do enrolamento interno.

O fluxo de fugas tem sido calculado empiricamente pelos fabricantes ao longo de várias décadas de investigação. Embora os valores sejam baixos, em comparação com o fluxo útil, podem ser utilizados para outros fins que não a transmissão de energia, como por exemplo a monitorização do estado de funcionamento do transformador [1].

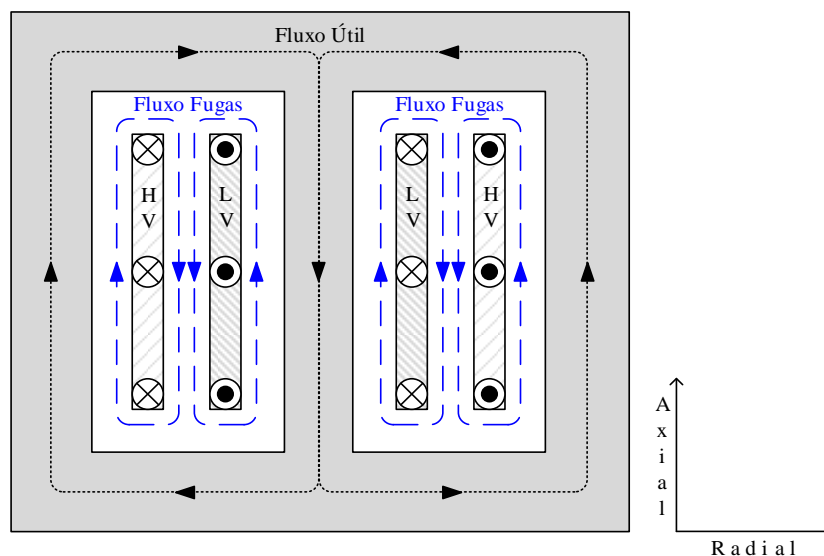


Figura 3.1 – Distribuição do fluxo em transformador e referencial das componentes do fluxo de fugas (adaptado de [11]).

Do mesmo modo que o fluxo originado pelo lado primário induz uma FMM no lado secundário, o fluxo de fugas pode também ser detetado num outro enrolamento, onde induz uma tensão. Este enrolamento adicional permite medir o fluxo de fugas através da tensão induzida aos seus terminais, sendo designado de bobina de teste (BT). O objetivo das bobinas de teste é assim analisar a distribuição do fluxo (através da tensão nelas induzida) e fornecer informação que, depois de devidamente analisada e tratada, permita aferir o estado de funcionamento da máquina [1].

### **3.1.1 Bobinas de teste**

O fluxo de fugas pode ser decomposto em duas componentes, a componente radial e a componente axial. A componente axial do fluxo de fugas fecha-se por percursos paralelos ao eixo dos enrolamentos enquanto a componente radial toma caminhos perpendiculares. A mesma bobina de teste dificilmente conseguirá medir em simultâneo as duas componentes do fluxo, pelo que o seu posicionamento e configuração são essenciais para a obtenção de resultados precisos. Assim analisou-se o comportamento de duas configurações de bobinas de teste com o intuito de medir as duas componentes do fluxo. As bobinas de teste de configuração horizontal permitem avaliar o fluxo axial de fugas que se fecha entre os enrolamentos enquanto as verticais permitem monitorizar o fluxo radial.

#### **3.1.1.1 Princípio**

A ocorrência de um defeito, mesmo que numa fase incipiente, pode provocar alterações significativas na distribuição do fluxo de fugas. A monitorização contínua do fluxo de fugas pode assim permitir identificar a ocorrência do defeito de forma rápida e fiável. A tensão induzida nas bobinas de teste está diretamente relacionada com o fluxo magnético pelo que a análise da sua variação, ao longo do tempo, permite diagnosticar o defeito. Para possibilitar a utilização de um método comparativo/diferencial serão utilizadas 4 bobinas de teste, 2 horizontais e 2 verticais. A utilização de quatro bobinas de teste permite efetuar a diferença dos seus valores e obter mais informação acerca do estado da máquina. Pode também permitir identificar, ainda que de modo grosseiro, a localização do defeito. De modo resumido, a aplicação do método baseia-se no valor da diferença entre as tensões induzidas nas bobinas de teste superior e inferior, horizontais e verticais, respetivamente. A este método deu-se o nome de método diferencial das tensões induzidas, ou MDTI, como será referenciado durante toda a dissertação.

### 3.1.1.2 Geometria e localização

A geometria e localização das bobinas de teste é em muito afetada pela configuração da própria máquina em estudo. Existem pequenos espaços, como os apresentados na figura 3.2, que podem ser aproveitados para a colocação das bobinas de teste.

### 3.1.1.3 Bobinas de teste horizontais

O objetivo destas bobinas de teste é captar o fluxo de fugas axial que se encontra entre os enrolamentos. A sua localização pode ajustar-se no espaço existente entre a extremidade vertical dos enrolamentos e o núcleo, figura 3.2. A sua sensibilidade será tanto maior quanto mais próximas se encontrarem dos enrolamentos, pois captam praticamente todo o fluxo de fugas axial. Quando se posicionam junto ao núcleo existem algumas linhas de fluxo que se fecham pelo espaço entre as bobinas de teste e os enrolamentos e não são mensuráveis. Apesar da sensibilidade ser menor quando se posicionam junto ao núcleo, esta é, à partida, a melhor localização pois o potencial elétrico do núcleo é nulo (encontra-se normalmente ligado à terra) o que permite reduzir o nível de isolamento destas bobinas de teste. Estes pressupostos serão validados no capítulo 4, ao analisar as várias localizações propostas. A diferença entre as tensões induzidas nas duas bobinas de teste horizontais (BTH) designa-se por:

$$\Delta v_H = v_{HT} - v_{HB} \quad (1)$$

onde  $v_{HT}$  e  $v_{HB}$  representam a tensão induzida nas bobinas de teste superior e inferior, respetivamente. A figura 3.3 ilustra a geometria proposta para as bobinas de teste horizontais.

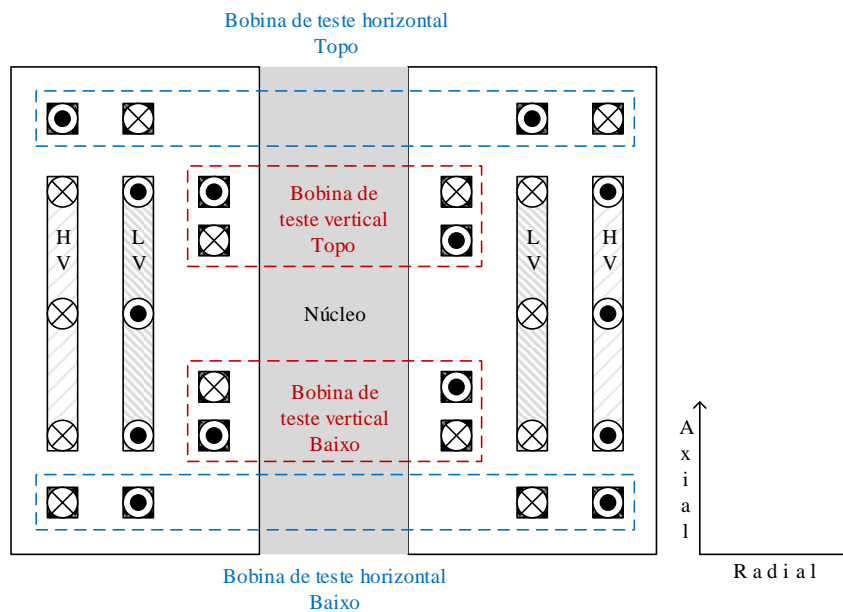


Figura 3.2 – Geometria e localização das bobinas de teste.

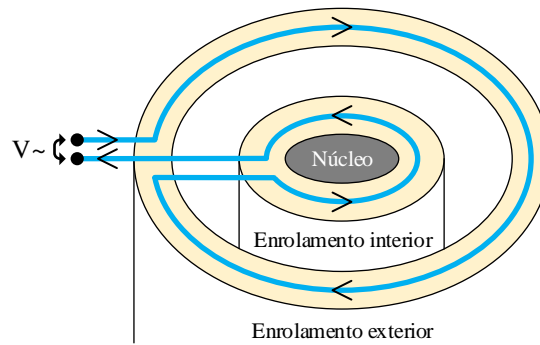


Figura 3.3 – Configuração das bobinas de teste horizontais.

### 3.1.1.4 Bobinas de teste verticais

O objetivo destas bobinas de teste é captar o fluxo de fugas radial que se fecha nas extremidades dos enrolamentos. As bobinas de teste verticais (BTV) possuem a sua geometria e localização mais limitadas pois encontram-se enroladas em torno do núcleo, pelo que as suas dimensões apenas podem variar ligeiramente em termos de diâmetro e altura. Tal como as anteriores, a sua sensibilidade será tanto maior quanto mais próximas se encontrarem dos enrolamentos. Contudo, a melhor localização esperada será o mais próximo possível do núcleo, de modo semelhante às anteriores. Estes pressupostos serão validados no capítulo 4, ao analisar as várias localizações em estudo. A diferença entre as tensões induzidas nas duas bobinas de teste verticais designa-se por:

$$\Delta v_V = v_{VT} - v_{VB} \quad (2)$$

onde  $v_{VT}$  e  $v_{VB}$  representam a tensão induzida nas bobinas de teste verticais superior e inferior, respetivamente. A figura 3.4 ilustra a geometria proposta para as bobinas de teste verticais.

## 3.2 Caracterização do fluxo de fugas

Quando a máquina opera nas suas condições de funcionamento nominais, a distribuição do fluxo é idêntica à figura 3.1. As linhas de fluxo fecham-se maioritariamente pelo circuito magnético e as perdas de fluxo são reduzidas. O fluxo de fugas fecha-se entre os dois enrolamentos, tomando um percurso paralelo ao eixo destes, durante praticamente toda a sua altura. Na prática o fluxo sofre um efeito de dispersão na extremidade dos enrolamentos, figura 3.5(a) [3], dando origem nesta zona a uma componente radial do fluxo de fugas. Este efeito é substancialmente aumentado quando os enrolamentos têm alturas diferentes (são assimétricos), figura 3.5(b), ou a distribuição da corrente não é uniforme ao longo da altura dos enrolamentos, figura 3.5(c). Este último caso refere-se a um transformador com enrolamentos em disco, mas constitui uma boa aproximação à distribuição do fluxo de fugas que se obtém quando ocorre um CC entre espiras, figura 3.6. Conclui-se então que o fluxo de fugas permite caracterizar o estado de funcionamento do transformador e a sua monitorização permite identificar alterações

nos enrolamentos, quer relativas a deformações mecânicas (assimetrias), quer relacionadas com a condição do seu isolamento elétrico (CC entre espiras).

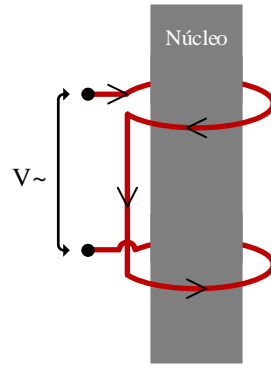


Figura 3.4 – Configuração das bobinas de teste verticais.

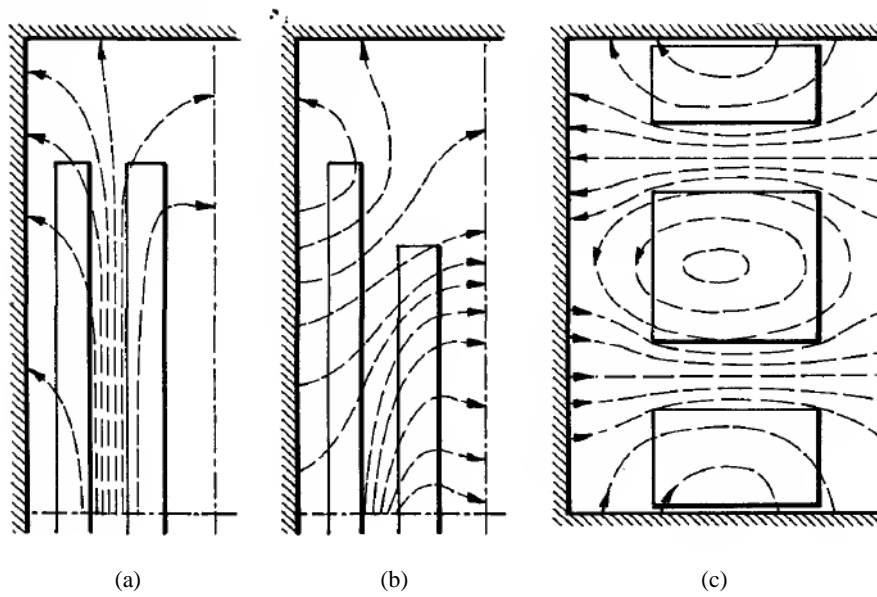


Figura 3.5 – Efeito de dispersão do fluxo: (a) enrolamentos simétricos; (b) enrolamentos com dimensões diferentes ou assimétricos; (c) presença de uma distribuição de corrente não uniforme [3].

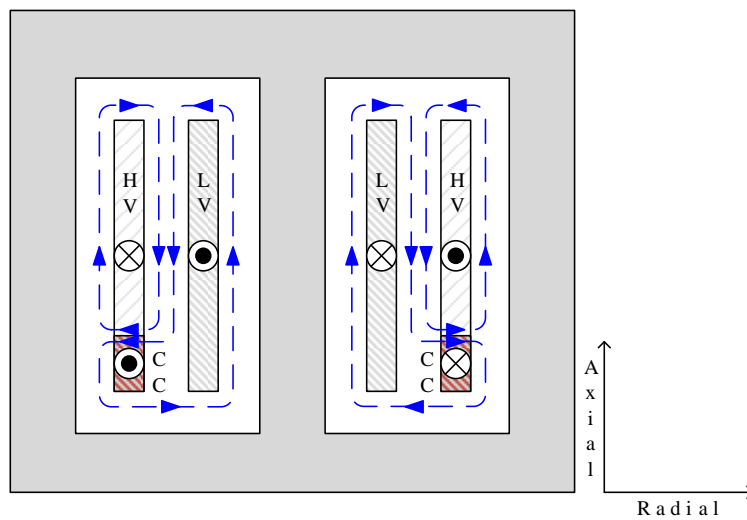


Figura 3.6 – Distribuição do fluxo de fugas para o caso de um CC no enrolamento exterior [1].

## Capítulo 4 – Modelo do transformador monofásico

O estudo realizado nesta dissertação requer um conhecimento profundo sobre o funcionamento do transformador nas situações de funcionamento normal e avaria. Para proceder à sua análise foi necessário desenvolver modelos computacionais de transformadores (monofásicos e trifásicos). Estes modelos permitem caracterizar o funcionamento da máquina e analisar os resultados para diferentes condições de funcionamento. Foi utilizado um protótipo laboratorial de modo a validar os dados obtidos nas simulações, cujos resultados são apresentados no capítulo 8.

Este capítulo tem como objetivo descrever o modelo computacional desenvolvido e apresentar os resultados relativos à condição de funcionamento normal do transformador.

Para efetuar a caracterização do fluxo de fugas nas condições de funcionamento normal e de avaria foi utilizado um software de modelação comercial com recurso a elementos finitos.

### 4.1 Análise pelo método de elementos finitos: FEM

As leis da física, em problemas de domínio do tempo, são normalmente expressas através de equações diferenciais parciais. Na maioria dos casos, devido à sua complexidade, estas equações não podem ser resolvidas analiticamente. De modo a contornar esta situação utilizam-se métodos de aproximação (discretização) que transformam as equações diferenciais parciais em modelos numéricos. A solução destes modelos é, em termos práticos, uma aproximação bastante real da solução, diminuindo o tempo de análise e permitindo a solução de problemas que, sem o recurso a métodos numéricos, seriam praticamente insolúveis. O recurso ao método de elementos finitos tem como objetivo efetuar a simulação do modelo numérico. De forma resumida, o software transforma os objetos em triângulos, efetua os cálculos em cada um deles, processa os dados e devolve a solução do problema de forma relativamente rápida e precisa [15].

### 4.2 Modelo monofásico

Para analisar o MDTI optou-se por iniciar o estudo através da modelação de um transformador monofásico. Utilizou-se a geometria de um transformador trifásico de 3 colunas, modelando apenas os enrolamentos de uma fase. As formas e dimensões dos enrolamentos permaneceram inalteradas, tendo-se ajustado apenas as dimensões do circuito magnético (núcleo) [16]-[18].

#### 4.2.1 Características

As características nominais do transformador encontram-se expressas na tabela 4.1. Por simplicidade do modelo os diversos materiais isolantes não se encontram representados [16].

Tabela 4.1 Características elétricas do transformador [16].

$V_P = \frac{132}{\sqrt{3}} \text{ kV}$	$V_S = 33 \text{ kV}$
$n_P = 980 \text{ espiras}$	$n_S = 424 \text{ espiras}$
$S = 31.5 \text{ MVA}$	$f = 50 \text{ Hz}$
Ligação trifásica original: Yd1	

Onde:

- $f$  representa a frequência do transformador (Hz);
- $n_P$  representa o número de espiras no enrolamento primário;
- $n_S$  representa o número de espiras no enrolamento secundário;
- $S$  representa a potência aparente do transformador (VA);
- $V_P$  representa o valor eficaz da tensão nominal do enrolamento primário (V);
- $V_S$  representa o valor eficaz da tensão nominal do enrolamento secundário (V).

A configuração do núcleo e geometria dos enrolamentos são apresentados na figura 4.1. Na figura 4.2 encontra-se o esquema elétrico do transformador nas condições de funcionamento nominais e sem qualquer defeito. A tabela 4.2 apresenta os restantes parâmetros nominais do modelo (correntes nominais, resistência de carga e fluxos).

Tabela 4.2 – Parâmetros nominais do transformador.

$I_{PT} = 137,77 \text{ A}$	$I_{SL} = 551,57 \text{ A}$	$I_{ST} = 318,45 \text{ A}$
$\hat{I}_{PT} = 194,85 \text{ A}$	$\hat{I}_{SL} = 780,03 \text{ A}$	$\hat{I}_{ST} = 450,35 \text{ A}$
$\lambda_{P \text{ máx}} = 343,07 \text{ Wb}$	$R_c = 103,71 \Omega$	$\lambda_{S \text{ máx}} = 148,55 \text{ Wb}$

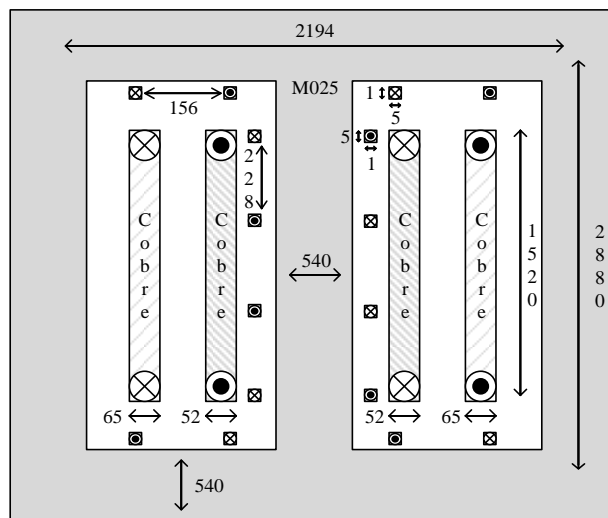


Figura 4.1 – Dimensões e geometria do núcleo, enrolamentos e bobinas de teste (em mm).

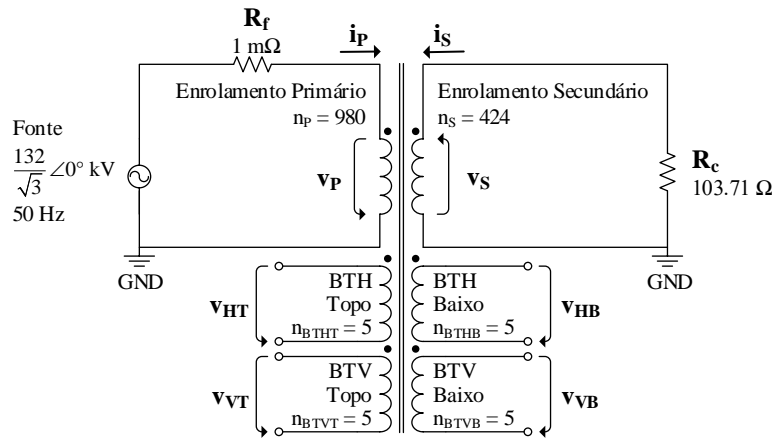


Figura 4.2 – Esquema do transformador monofásico em regime nominal.

Onde:

- $\hat{I}_{PT}$  representa o valor de pico teórico da corrente no enrolamento primário (A);
- $I_{PT}$  representa o valor eficaz teórico da corrente no enrolamento primário (A);
- $\hat{I}_{ST}$  representa o valor de pico teórico da corrente no enrolamento secundário (A);
- $I_{ST}$  representa o valor eficaz teórico da corrente no enrolamento secundário (A);
- $\hat{I}_{SL}$  representa o valor de pico teórico da corrente de linha no secundário (A);
- $I_{SL}$  representa o valor eficaz teórico da corrente de linha no secundário (A);
- $R_c$  representa a resistência de carga ( $\Omega$ );
- $\lambda_{p\text{ máx}}$  representa o valor máximo do fluxo encadeado no enrolamento primário (Wb);
- $\lambda_{s\text{ máx}}$  representa o valor máximo do fluxo encadeado no enrolamento secundário (Wb).

#### 4.2.2 Funcionamento em regime nominal – Ausência de defeito

De modo a caracterizar o funcionamento do modelo é conveniente apresentar os resultados obtidos para a condição de funcionamento em regime normal do transformador. Estes resultados permitem identificar e confirmar os dados apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2. Nas simulações apresentadas nos capítulos 4, 5, 6 e 7 (modelos monofásico e trifásico) cada uma das bobinas de teste possui 5 espiras. Abaixo, na figura 4.3, apresentam-se as ondas das tensões nominais, correntes nominais e fluxos (núcleo e bobinas de teste).

Tabela 4.3 – Valores de pico das tensões, correntes e fluxos para o regime nominal.

$\hat{V}_P$ (kV)	$\hat{V}_S$ (kV)	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{\Phi}_P$ (Wb)	$\hat{\Phi}_S$ (Wb)	$\hat{\Phi}_{BVT}$ (mWb)	$\hat{\Phi}_{BVB}$ (mWb)	$\hat{\Phi}_{BHT}$ (mWb)	$\hat{\Phi}_{BHB}$ (mWb)
107,57	46,04	191,93	443,59	0,36	0,34	9,35	9,35	5,86	5,86

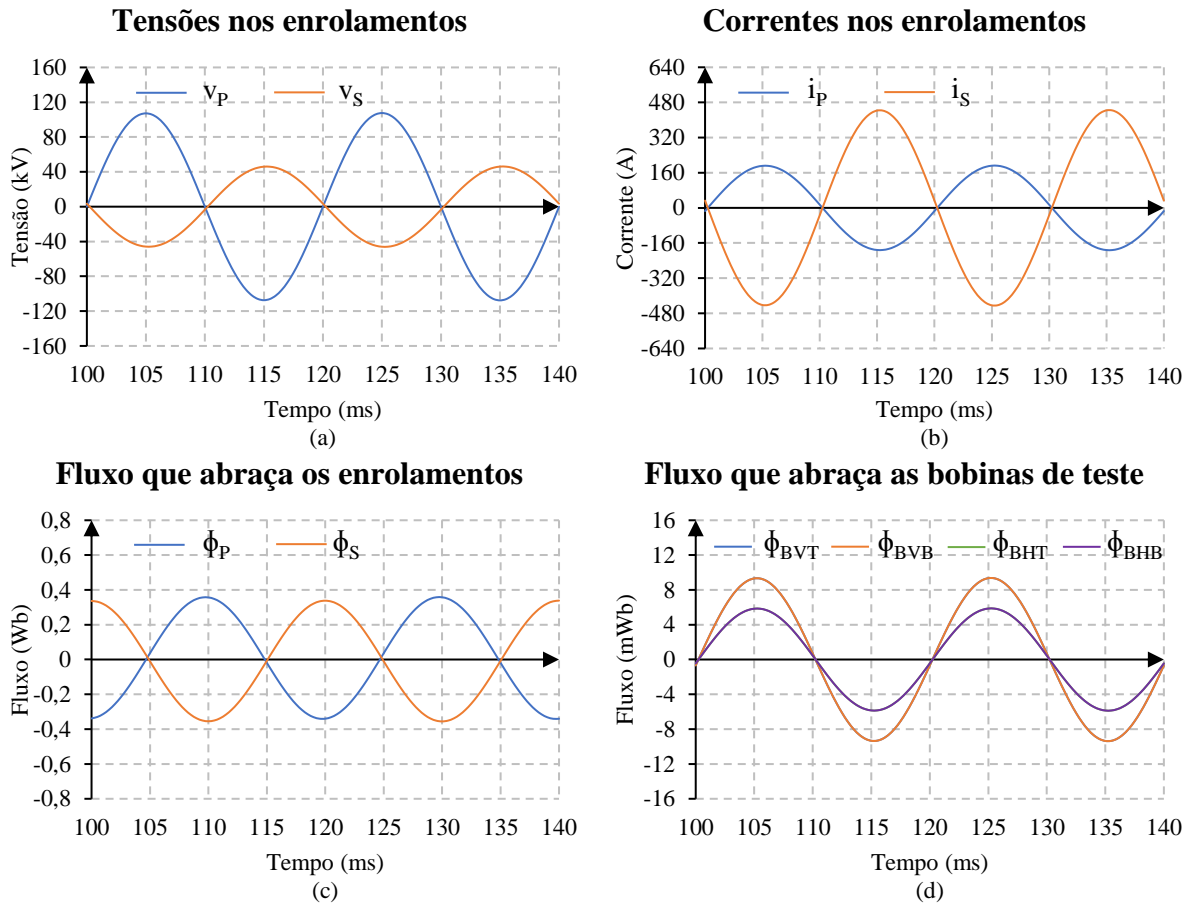


Figura 4.3 – Gráficos com as características nominais do transformador: (a) tensões nominais; (b) correntes nominais; (c) fluxo que abraça os enrolamentos; (d) fluxo que abraça as bobinas de teste.

Onde:

- $\hat{I}_P$  representa o valor de pico da corrente no enrolamento primário (A);
- $\hat{I}_S$  representa o valor de pico da corrente no enrolamento secundário (A);
- $\hat{\phi}_{BHB}$  representa o valor de pico do fluxo que abraça a BT horizontal inferior (mWb);
- $\hat{\phi}_{BHT}$  representa o valor de pico do fluxo que abraça a BT horizontal superior (mWb);
- $\hat{\phi}_{BVB}$  representa o valor de pico do fluxo que abraça a BT vertical inferior (mWb);
- $\hat{\phi}_{BVT}$  representa o valor de pico do fluxo que abraça a BT vertical superior (mWb);
- $\hat{\phi}_P$  representa o valor de pico do fluxo que abraça o enrolamento primário (Wb);
- $\hat{\phi}_S$  representa o valor de pico do fluxo que abraça o enrolamento secundário (Wb);
- $\hat{V}_P$  representa o valor de pico da tensão aplicada ao enrolamento primário (V);
- $\hat{V}_S$  representa o valor de pico da tensão induzida no enrolamento secundário (V).

Através dos dados fornecidos pelos gráficos presentes na figura 4.3, complementados pela tabela 4.3, conclui-se que o fluxo que atravessa as bobinas de teste é consideravelmente inferior ao que circula no circuito magnético, como seria de esperar. Considere-se um valor

médio para o fluxo que abraça os enrolamentos (0.35 Wb – na prática este fluxo será idêntico em ambos os enrolamentos). Se comparados os valores de pico dos fluxos, conclui-se que o fluxo que atravessa as bobinas de teste horizontais é cerca de 2% do fluxo útil ( $0,00586/0,35 = 0,0167 \approx 2\%$ ). No caso das bobinas de teste verticais esta percentagem é ligeiramente superior, alcançando cerca de 3% do fluxo útil ( $0,00935/0,35 = 0,0267 \approx 3\%$ ). A figura 4.4 apresenta os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste na situação de funcionamento nominal.

Analisando os gráficos vê-se que os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste verticais são cerca de 40% superiores em relação às horizontais. Todas as formas de onda se encontram em fase, pelo que após a aplicação do MDTI obtém-se um valor próximo de zero. Assim, idealmente, qualquer desvio em relação ao valor nulo pode ser indicador de um defeito, não sendo necessário outro sinal de referência para efetuar a comparação. Outro ponto interessante são as linhas de fluxo, figura 4.5. Aqui vê-se que a maior parte das linhas se fecham pelo circuito magnético e entre os enrolamentos. Esta é a configuração normal que servirá de termo comparativo para os restantes casos. Escolheu-se  $t = 125$  ms pois neste ponto a corrente primária é máxima, originando um valor máximo de fluxo, o que facilita a comparação entre várias condições de funcionamento.

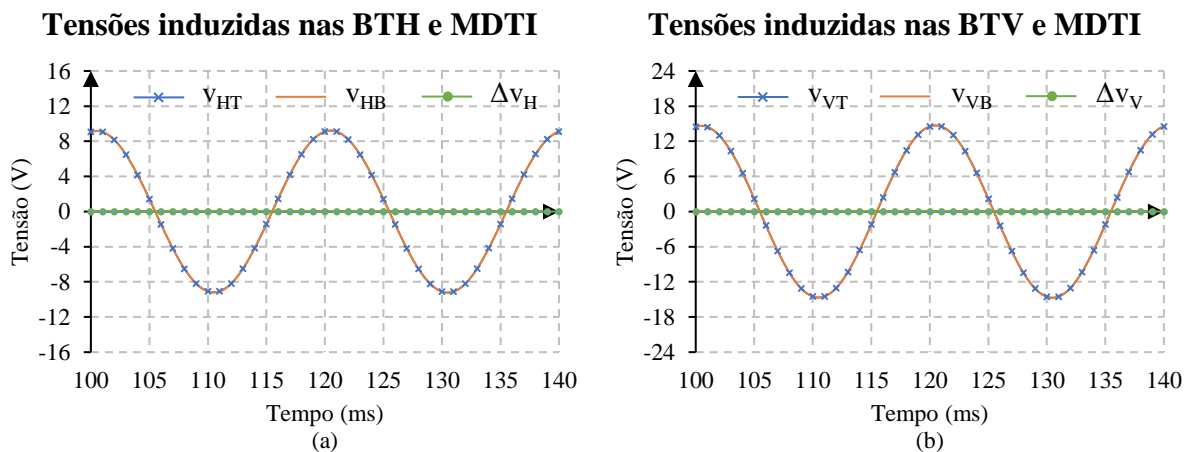


Figura 4.4 – Gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais (a) e verticais (b) e respetivas ondas do MDTI.

Tabela 4.4 – Valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste para o regime nominal.

$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$

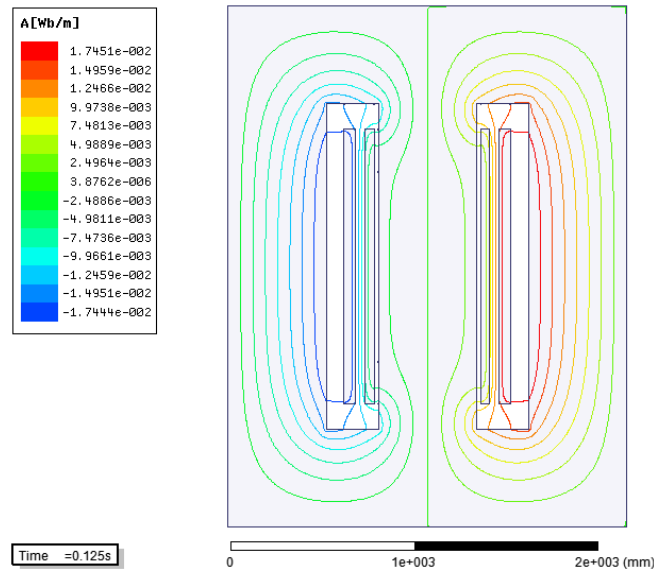


Figura 4.5 – Linhas de fluxo em regime de funcionamento nominal.

### 4.2.3 Análise estática

A análise estática do modelo tem como objetivo estudar a melhor localização/posição para a colocação das bobinas de teste. Nesta análise modelou-se o transformador na sua configuração original, sem bobinas de teste, como ilustrado na figura 4.6. Este estudo será conduzido para três condições de funcionamento distintas: funcionamento normal, com curto-circuito entre espiras e com deslocação dos enrolamentos.

#### 4.2.3.1 Normal

A condição de funcionamento normal é a primeira analisada pois serve de base e termo de comparação para os restantes casos. Esta configuração permite identificar os locais onde o fluxo de fugas é maior. Estes pontos são, numa abordagem inicial, os mais apropriados para a colocação das bobinas de teste. O facto de o fluxo de fugas ser superior nestes pontos permite que as bobinas de teste sejam mais sensíveis a flutuações e alterações provocadas por defeitos na máquina. Em acréscimo, nestes pontos é onde o fluxo induz uma tensão mais elevada nas bobinas de teste.

A análise do fluxo de fugas é repartida em duas componentes, a componente axial (predominantemente detetada pelas bobinas de teste horizontais) e a componente radial (detetada pelas bobinas de teste verticais). A distribuição das linhas de defeito axiais que se fecham através da linha x, apresentada na figura 4.6, é ilustrada na figura 4.7(a). As linhas de força possuem uma concentração mais elevada entre os enrolamentos, acompanhando a distribuição da FMM produzida pela ação combinada das correntes no primário e secundário. A distribuição das linhas de fluxo radiais, que se fecham através da linha y (figura 4.6) é apresentada na figura 4.7(b). Existem dois locais onde as linhas de fluxo apresentam uma maior

concentração, localizados entre o núcleo e os enrolamentos. Note-se que o gráfico apresenta o módulo do fluxo, motivo pelo qual os 2 picos apresentam valores positivos. As zonas onde as linhas de fluxo possuem maior concentração são, à partida, as mais adequadas para localizar as bobinas de teste.

#### 4.2.3.2 Curto-circuito

Um curto-circuito entre espiras no lado primário provoca a alteração do sentido da corrente na zona afetada, em relação ao sentido da corrente no próprio enrolamento. Este facto origina correntes de sentidos idênticos em ambos os enrolamentos (primário e secundário), o que em condições de funcionamento normal não se verifica. Estas correntes criam um fluxo magnético que, devido aos novos sentidos, aumenta o fluxo de fugas na zona do defeito. O CC em estudo situa-se na zona superior do enrolamento exterior (primário), como se ilustra na figura 4.8.

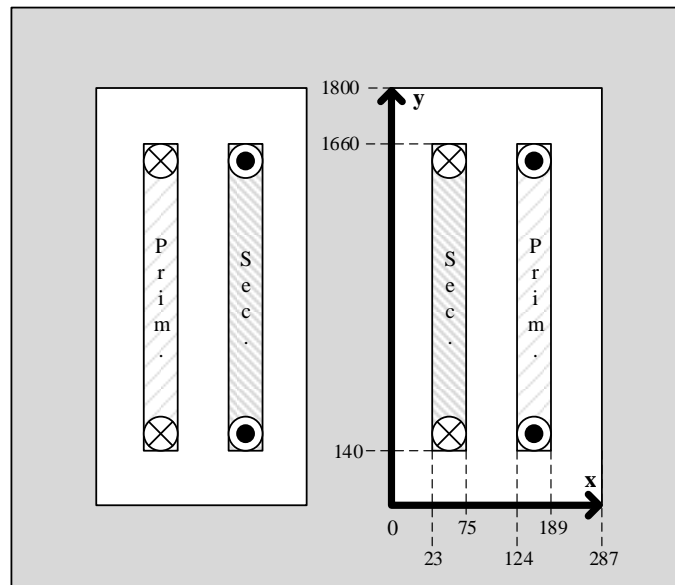


Figura 4.6 – Representação gráfica do modelo normal (dimensões em mm).

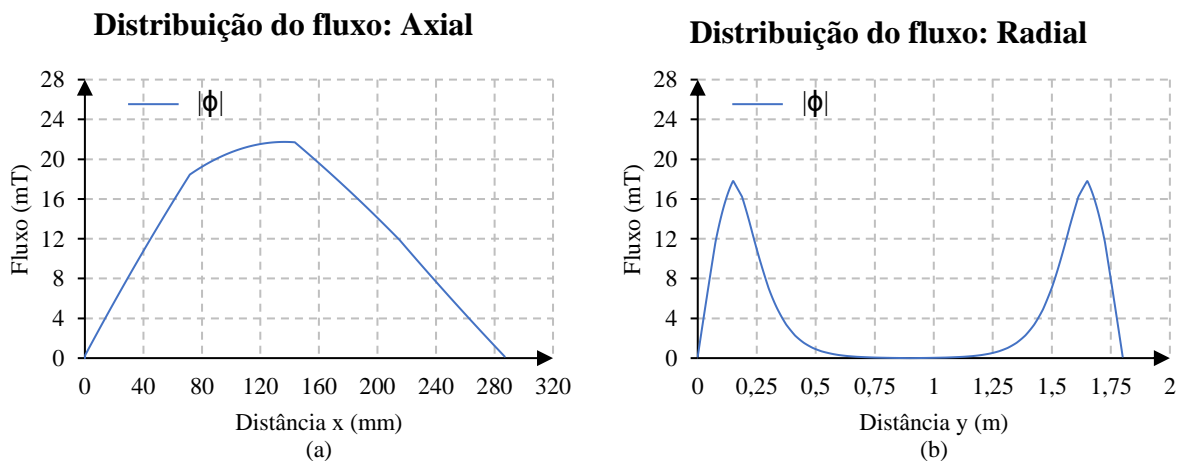


Figura 4.7 – Distribuição do fluxo ao longo das laterais do núcleo no modelo normal: (a) linha x que corresponde ao fluxo axial; (b) linha y que corresponde ao fluxo radial.

Ao comparar os gráficos da figura 4.9 com os gráficos de referência (figura 4.7) é notória a diferença na distribuição das linhas de fluxo e seus valores de pico. O fluxo radial, apresentado na figura 4.9(b), possui um valor de pico, na zona do defeito (segundo pico), cerca de 6 vezes superior ao valor em regime nominal. O máximo relativo, situado próximo da base dos enrolamentos, da figura 4.9(b), também sofreu alterações, sendo agora cerca de 2 vezes superior. Verifica-se ainda que a forma de onda se alterou passando a existir pequenas oscilações, à medida que se aproxima das extremidades do núcleo. O fluxo axial também sofreu alterações significativas, essencialmente quando se está mais próximo das paredes do núcleo. Nestas zonas os valores são bastante elevados, impossibilitando a análise da forma de onda, ficando esta desadequada em relação à escala, razão pela qual não é possível visualizar o máximo absoluto do gráfico da figura 4.9(a).

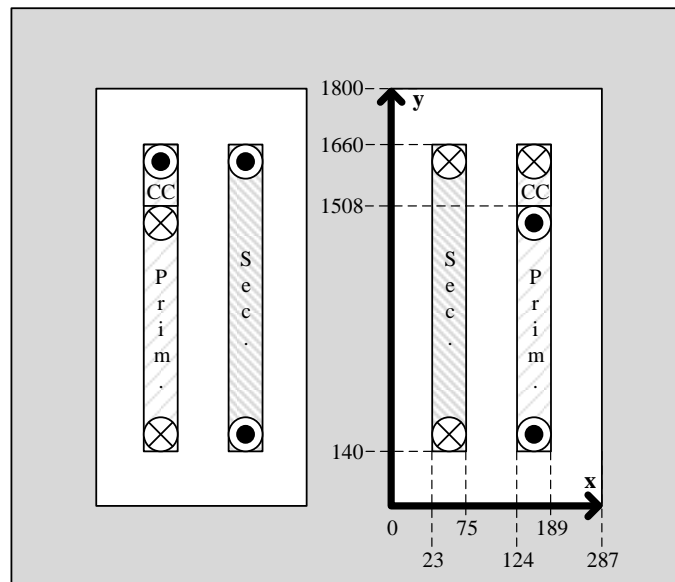


Figura 4.8 – Representação gráfica do modelo com curto-circuito (dimensões em mm).

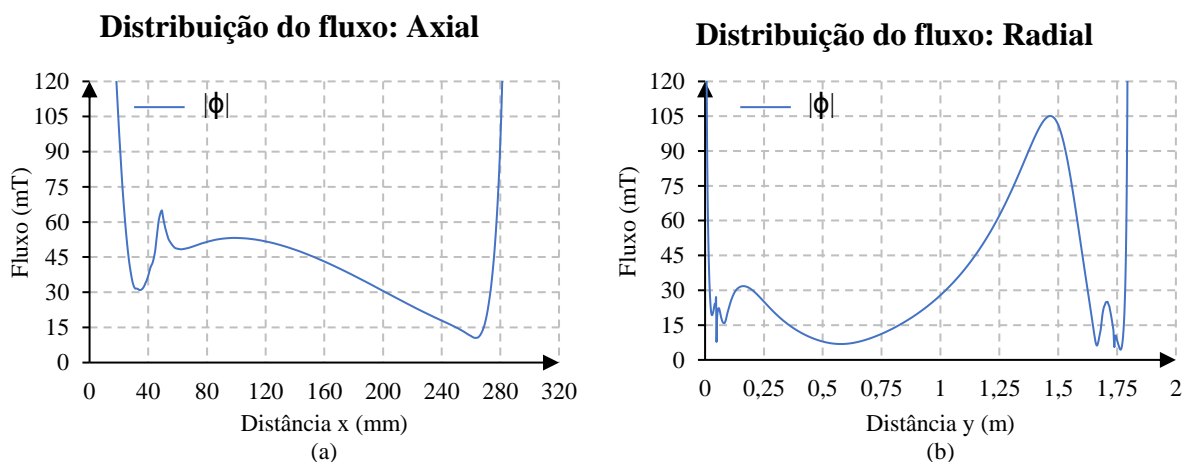


Figura 4.9 – Distribuição do fluxo ao longo das laterais do núcleo no modelo com curto-circuito: (a) linha x que corresponde ao fluxo axial; (b) linha y que corresponde ao fluxo radial.

Acerca do intervalo que realmente importa, salienta-se o facto de o pico visível (zona entre os enrolamentos) ser cerca de 3 vezes superior à situação de referência. No gráfico surge ainda uma oscilação da onda, entre os 40 mm e 60 mm, que no caso de referência não se verifica.

Em termos comparativos, ambas as situações apresentam alterações evidentes e claras em relação ao gráfico de referência. Contudo, o fluxo radial, neste tipo de defeito, permite, além de detetar a anomalia, fornecer informação sobre o local do defeito (zona de maior fluxo de fugas). No caso do fluxo axial, como existe a troca do sentido da corrente na zona afetada que provoca um aumento do fluxo de fugas entre os enrolamentos, não é possível identificar a zona do defeito. Em suma, a melhor localização para as bobinas de teste verticais para a deteção de curtos-circuitos entre espiras passa pela sua colocação próximo das extremidades dos enrolamentos (superior e inferior). No caso das bobinas de teste horizontais é colocando-as alinhadas verticalmente com os enrolamentos de modo a captar o maior número de linhas do fluxo de fugas que circula entre os enrolamentos.

#### **4.2.3.3 Deformação**

Existem diversos tipos de deformações e cada uma provoca alterações distintas e complexas, sendo bastante difícil prever as modificações na distribuição das linhas de fluxo que ocorrem. A deformação aqui estudada consiste no deslocamento ascendente do enrolamento exterior e, em simultâneo, o deslocamento descendente do enrolamento interior, como demonstra a figura 4.10. A figura 4.11 apresenta os resultados gráficos da distribuição do fluxo obtidos para esta deformação.

De modo idêntico ao caso anterior (curto-circuito) as diferenças dos gráficos da figura 4.11 em relação aos gráficos da figura 4.7 são bem evidentes. Os valores de pico, em ambos os casos (axial e radial), são cerca de 20 vezes superiores aos valores de referência. As formas de onda são completamente distintas das apresentadas na figura 4.7, o que revela o elevado grau de complexidade na previsão das ondas resultantes quando ocorre uma deformação/deslocamento dos enrolamentos. São, sem sombra de dúvidas, os defeitos analisados neste documento, mais complexos e difíceis de descrever e explicar. O fluxo de fugas radial é maior quando partes dos enrolamentos se encontram isoladas, isto é, quando parte de um enrolamento ‘não vê’ o outro enrolamento horizontalmente. Isto origina a que o fluxo gerado por um enrolamento não seja, em termos vetoriais, anulado pelo outro enrolamento. Quando os enrolamentos se tornam a encontrar horizontalmente, é quando, no gráfico da figura 4.11(b) o valor do módulo do fluxo é menor. No caso axial a análise é bem mais complexa pois onde o fluxo de fugas era máximo (entre os enrolamentos), agora já não o é.

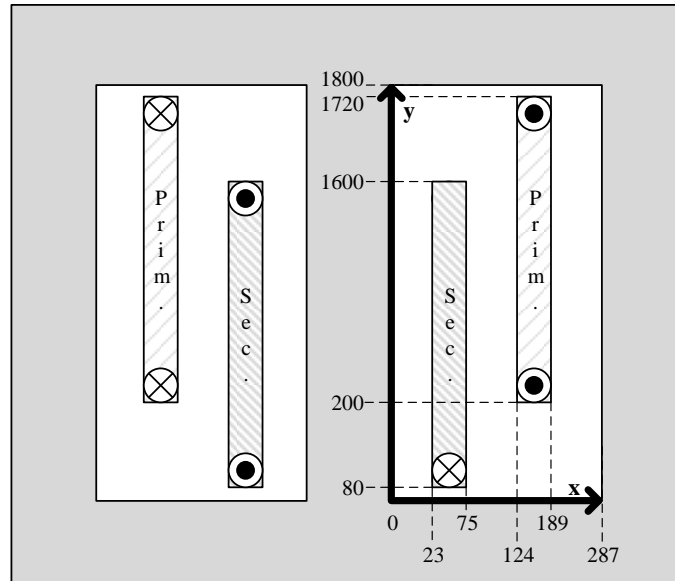


Figura 4.10 – Representação gráfica do modelo com deslocamento dos enrolamentos.

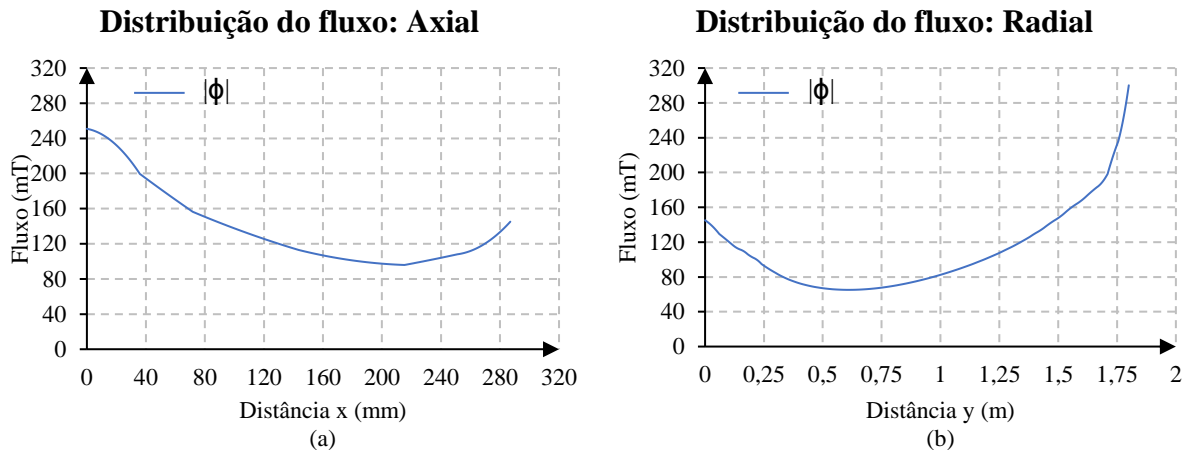


Figura 4.11 – Distribuição do fluxo ao longo das laterais do núcleo no modelo com deslocamento dos enrolamentos: (a) linha x que corresponde ao fluxo axial; (b) linha y que corresponde ao fluxo radial.

Esta deformação originou que o ponto máximo do fluxo de fugas axial se deslocasse para a esquerda, situando-se agora próximo do centro do núcleo e não entre os enrolamentos. O aumento do fluxo de dispersão nas extremidades dos enrolamentos, aliado aos restantes fenómenos que ocorrem simultaneamente com este defeito, originam a que o fluxo de fugas axial seja superior próximo do centro do transformador e vá reduzindo a sua intensidade à medida que se afasta do centro da máquina, como demonstra o gráfico da figura 4.11(a). Esta distribuição de fluxos é própria deste tipo de defeito, pois cada deformação origina uma distribuição de fluxos distinta. Neste campo podem ser imaginadas milhares de configurações possíveis, cada qual com as suas próprias características. O que importa reter desta análise é que existe uma alteração evidente das formas de onda da distribuição do fluxo obtidas em relação ao gráfico de referência que se encontra na figura 4.7. Assim, pode-se dizer que é

possível detetar uma deformação nos enrolamentos de um transformador recorrendo à análise do seu fluxo de fugas.

Acerca da melhor localização para efetuar essa análise (colocação das bobinas de teste) o melhor local é semelhante ao já apresentado para o caso do CC entre espiras (próximo dos enrolamentos). De notar que os gráficos da figura 4.11 não permitem detetar a localização do defeito, contrariamente aos gráficos da figura 4.9.

#### 4.2.4 Influência do regime de carga do transformador

O regime de carga do transformador deve ser cuidadosamente analisado pois pode afetar os resultados e originar falsos diagnósticos. Assim são analisadas as situações onde a máquina se encontra alimentada à sua tensão nominal e a fornecer energia a uma carga próxima da nominal, meia carga, vazio e sobrecarga. É considerada também a ocorrência de defeitos externos (curto-circuito na carga).

##### 4.2.4.1 Regime de funcionamento em vazio

A comutação do regime de carga do transformador, de plena carga para vazio, pode ocorrer pelo deslastre repentino de uma carga considerável ou pela atuação de uma proteção a jusante do transformador. O MDTI deve ser imune a estas perturbações e não deve confundir uma situação de alteração de carga com a ocorrência de um defeito interno. Na figura 4.12 apresenta-se o esquema elétrico do transformador para simulação de uma comutação do regime de carga das condições de funcionamento nominais para vazio. Os gráficos da figura 4.13 ilustram os resultados obtidos, quando ocorre um deslastre de carga aos 120ms.

Até este instante as tensões induzidas nas bobinas de teste apresentam valores próximos à situação de referência, após este ponto os valores são praticamente nulos. Da aplicação do método verifica-se que  $\Delta v_H$  e  $\Delta v_V$  possuem amplitudes próximas de zero, antes e depois da comutação do regime de carga, não se verificando nenhuma alteração significativa.

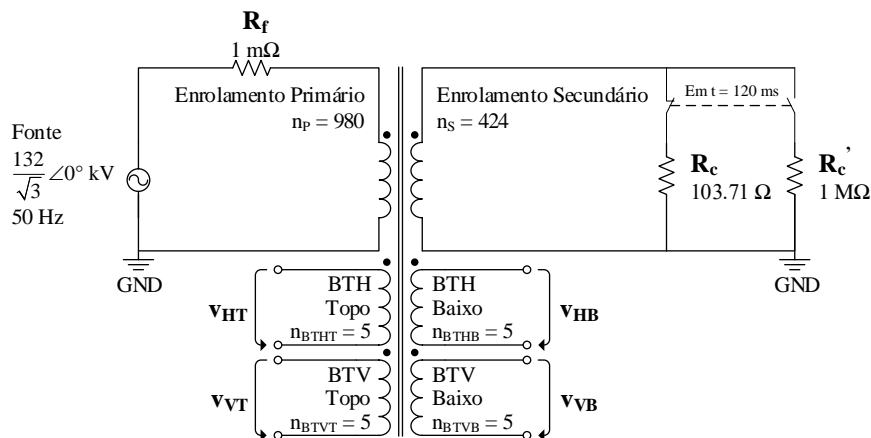


Figura 4.12 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para vazio.

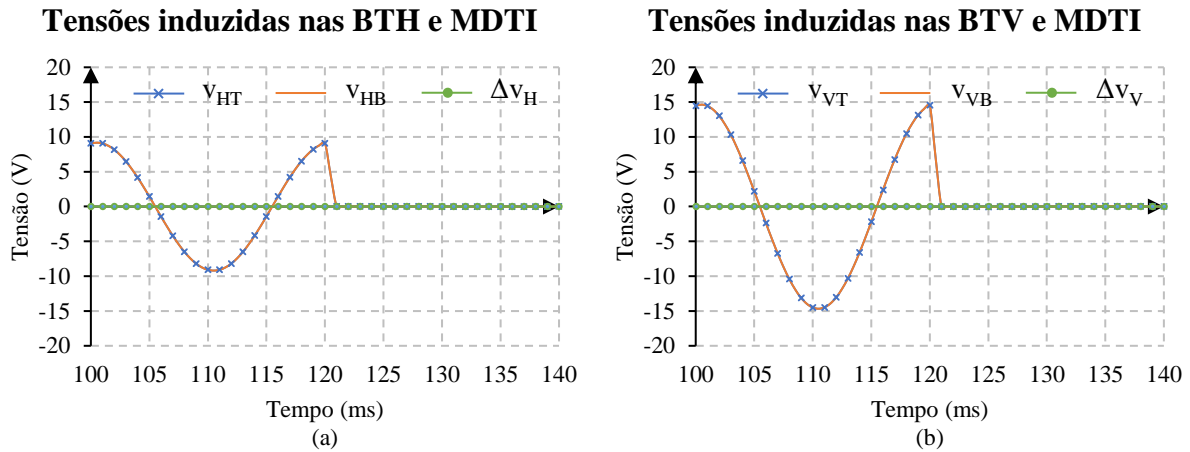


Figura 4.13 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso de uma comutação do regime de carga de nominal para a condição de vazio.

Deste modo o MDTI não é afetado de forma significativa quando ocorre uma comutação de carga do regime nominal para a condição de vazio.

#### 4.2.4.2 Regime de funcionamento com 50% da carga nominal

A comutação do regime de carga do transformador, de plena carga para meia carga é uma situação que pode ocorrer com alguma frequência no sistema de energia elétrica. O MDTI, como no caso anterior, deve ser imune a estas perturbações. Na figura 4.14 apresenta-se o esquema elétrico do transformador para simulação de uma comutação do regime de carga das condições de funcionamento nominais para meia carga. Os gráficos da figura 4.15 ilustram os resultados obtidos.

Quando 50% da carga é subitamente deslastrada as tensões induzidas nas bobinas de teste diminuem também para cerca de metade. No entanto a diferença entre as tensões induzidas não sofre alterações significativas, mantendo um valor reduzido. Assim, o MDTI é imune a esta variação de carga.

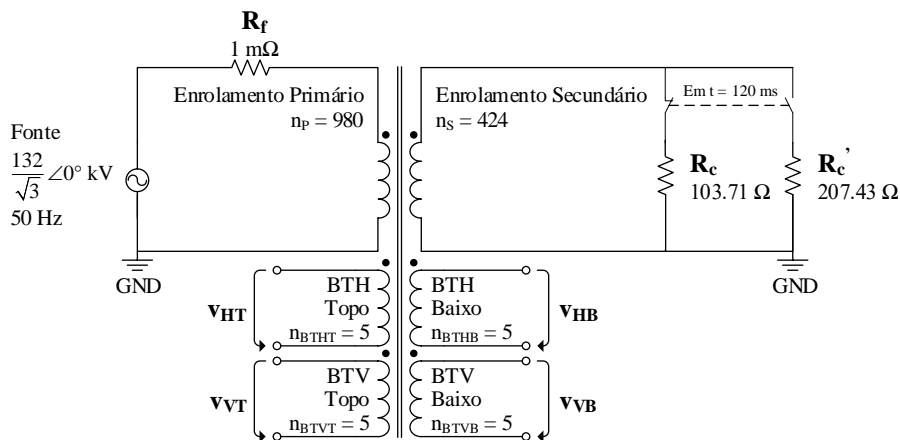


Figura 4.14 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para meia carga.

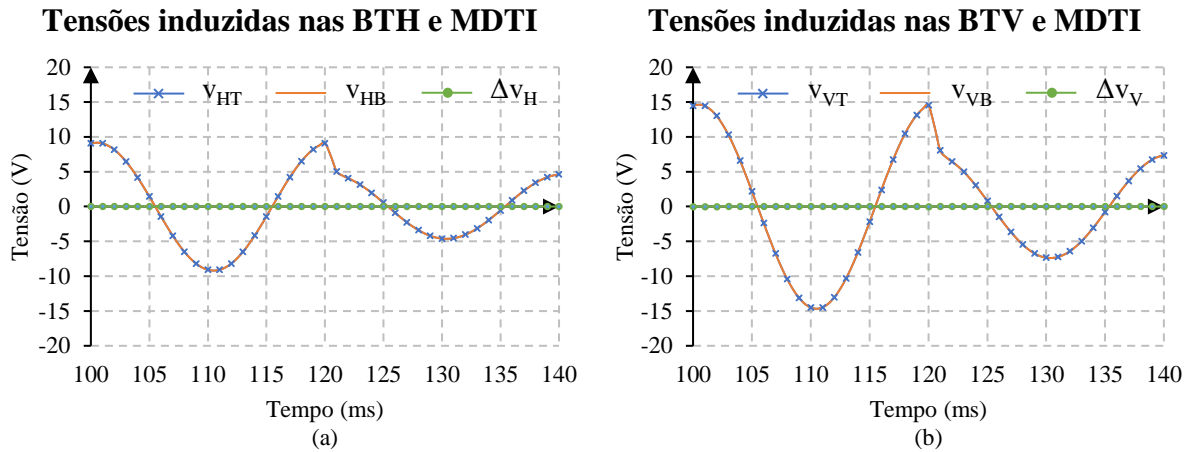


Figura 4.15 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso da comutação do regime de carga de nominal para meia carga.

#### 4.2.4.3 Regime de funcionamento em sobrecarga

Ao longo da vida do transformador podem ocorrer sobrecargas temporárias, resultantes da entrada em funcionamento de um conjunto de cargas com potência total superior ao valor nominal do transformador. O método de diagnóstico deve ser imune a estas perturbações. Na figura 4.16 apresenta-se o esquema elétrico do transformador para simulação de uma comutação do regime de carga das condições de funcionamento nominais para uma sobrecarga. Os gráficos da figura 4.17 ilustram os resultados obtidos.

As tensões induzidas nas bobinas de teste, até  $t = 120$  ms, apresentam valores semelhantes à referência, após este instante os valores praticamente duplicam. Apesar dos valores das tensões duplicarem, todas as formas de onda estão em fase. Os sinais de  $\Delta v_H$  e  $\Delta v_V$  não apresentam diferenças significativas após ocorrer a sobrecarga mantendo-se com uma amplitude reduzida. Pode então concluir-se que o MDTI não é influenciado por esta condição de carga do transformador.

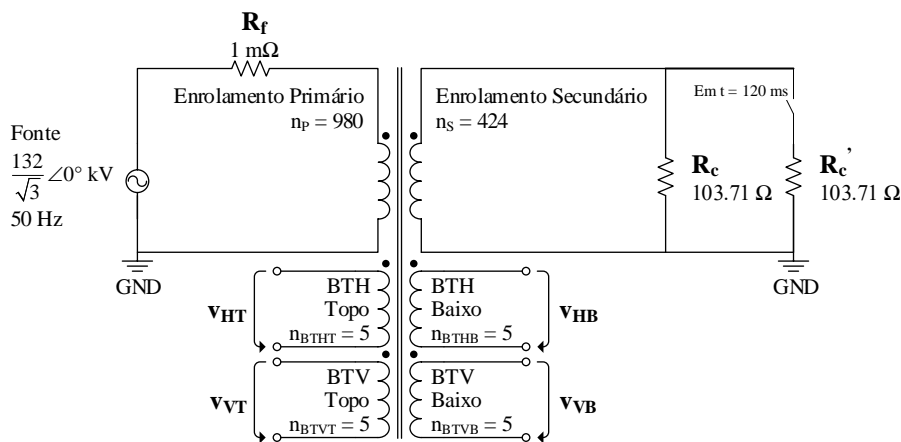


Figura 4.16 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para sobrecarga.

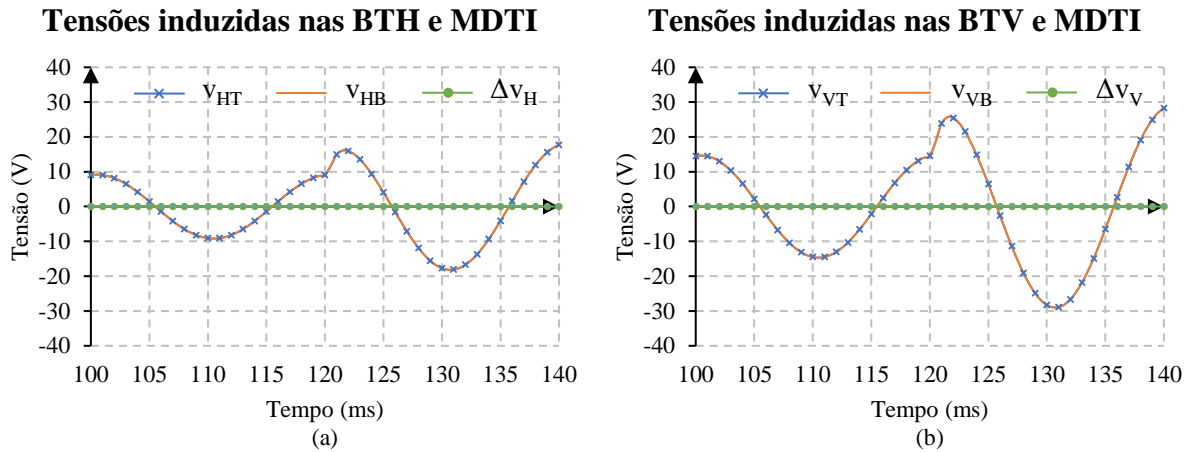


Figura 4.17 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso da comutação do regime de carga de nominal para sobrecarga.

#### 4.2.4.4 Regime de funcionamento com defeito externo

Quando ocorre um defeito externo o MDTI deve ser imune a estas perturbações e permitir que as proteções mais próximas do defeito atuem e isolem a anomalia. Na figura 4.18 apresenta-se o esquema elétrico do transformador para a simulação de uma comutação do regime de carga das condições de funcionamento nominais para a ocorrência de um defeito externo. Os gráficos da figura 4.19 ilustram os resultados obtidos. Para definir a intensidade da avaria limitou-se a corrente de defeito como sendo 5 vezes superior ao valor nominal.

As tensões induzidas nas bobinas de teste, até  $t = 120$  ms, apresentam amplitudes semelhantes à referência, após este instante os valores aumentam cerca de cinco vezes. Os sinais  $\Delta v_H$  e  $\Delta v_V$  não são afetados de forma significativa pela ocorrência do defeito externo.

Tendo em conta os dados fornecidos pelos ensaios da comutação de carga, em geral, verifica-se que o regime de carga do transformador não afeta o MDTI.

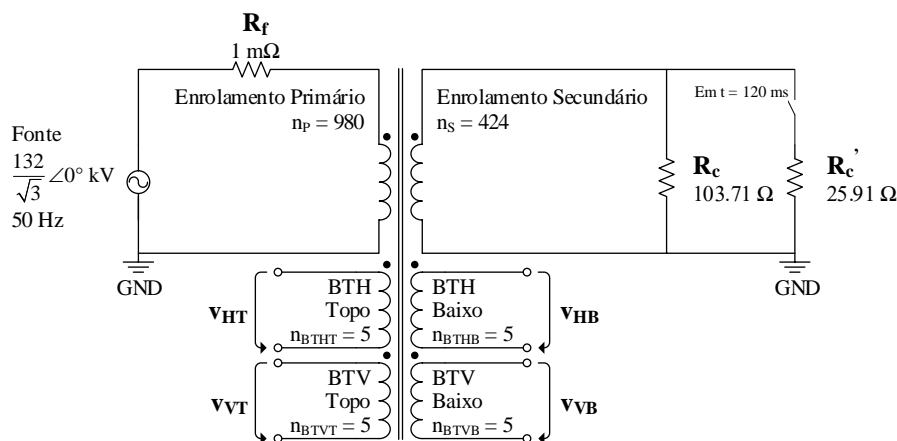


Figura 4.18 – Esquema do transformador monofásico com comutação do regime de carga de nominal para defeito externo.

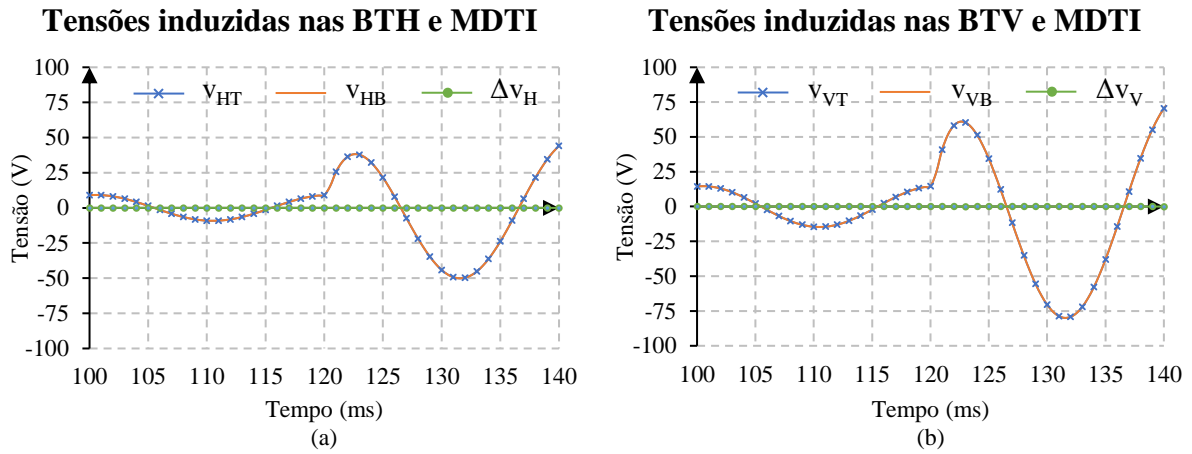


Figura 4.19 – Gráficos das tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) e MDTI para o caso da comutação do regime de carga de nominal para defeito externo.

## Capítulo 5 – Ocorrência de curtos-circuitos entre espiras

Neste capítulo é analisada a ocorrência de curtos-circuitos entre espiras nos enrolamentos do transformador e as correspondentes alterações provocadas nas tensões induzidas nas bobinas de teste. São consideradas diversas localizações das espiras afetadas nos enrolamentos primário e secundário. A influência da localização e dimensão das bobinas de teste é também analisada.

### 5.1 Curto-circuito entre espiras no enrolamento primário

No transformador em estudo o enrolamento primário é o de tensão mais elevada e o que possui maior diâmetro (enrolamento externo). Consideraram-se diversas localizações do defeito, ao longo da altura do enrolamento, conforme apresentado na figura 5.1 (zonas A, B, C, D e E).

A severidade do defeito (nº de espiras em curto-circuito) foi também considerada no estudo. As bobinas de teste, horizontais e verticais, são constituídas por cinco espiras. No caso das bobinas de teste verticais utilizou-se uma altura que corresponde a 15% da altura do enrolamento primário. A influência da dimensão e localização das bobinas de teste nas tensões induzidas foi também investigada.

#### 5.1.1 Curtos-circuitos entre espiras na zona A do enrolamento primário

O curto-circuito entre espiras situado na zona A do enrolamento primário simulou-se tendo por base o esquema elétrico apresentado na figura 5.2. Nesta configuração e de modo a simular diversos níveis do defeito a resistência de curto-circuito ( $R_{cc}$ ) foi-se ajustando mediante o número de espiras afetadas segundo os valores presentes na tabela 5.1.

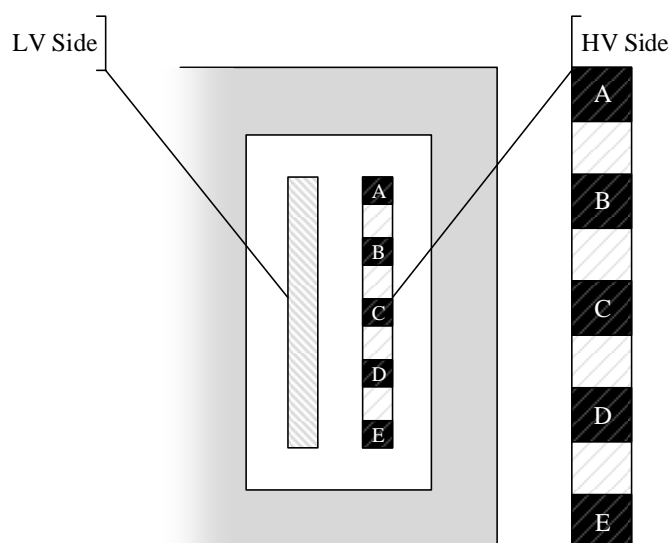


Figura 5.1 – Localização dos curtos-circuitos entre espiras no enrolamento primário.

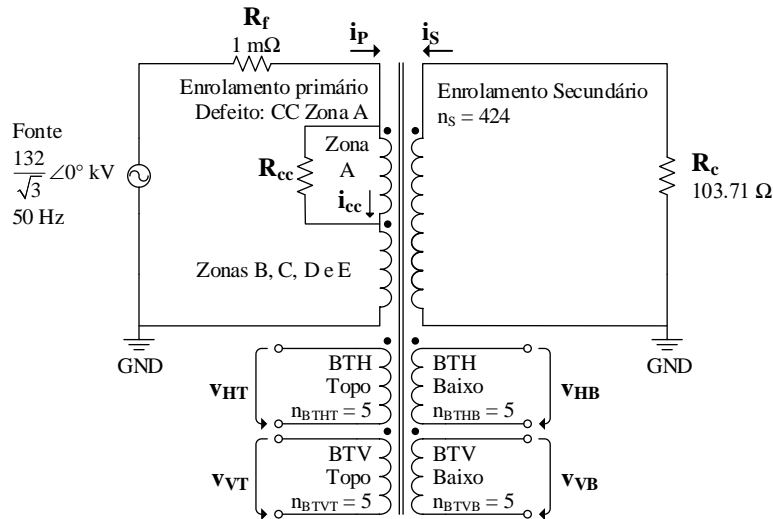


Figura 5.2 – Esquema elétrico utilizado na modelação do defeito na zona A do enrolamento primário.

Tabela 5.1 – Valores da resistência de defeito.

Defeito	$R_{cc}$ ( $\Omega$ )
<b>1% -&gt; 10 espiras</b>	1,84
<b>5% -&gt; 49 espiras</b>	8,05
<b>10% -&gt; 98 espiras</b>	13,25
<b>20% -&gt; 196 espiras</b>	13,50

O valor de  $R_{cc}$  foi calculado de modo a garantir uma corrente no defeito fosse dupla da corrente nominal do enrolamento ( $I_{cc} = 2I_n$ ). O restante esquema elétrico manteve-se inalterado. De notar que a resistência de defeito não varia linearmente com o aumento da zona afetada. Para as condições da simulação, verifica-se que a variação do valor utilizado para 10% e 20% é bastante reduzida, o mesmo não se verifica quando se comparam os valores de 1% e 5%, por exemplo. Deste modo conclui-se que à medida que a zona afetada pelo defeito se expande, a resistência necessária para obter a mesma corrente de defeito tende a aumentar, embora de forma mais suave. Em termos gráficos, a evolução do valor da resistência de defeito seria aproximada à função logarítmica. Para aprofundar o estudo desta situação, é conveniente apresentar e efetuar uma curta análise ao comportamento das várias correntes (corrente nos enrolamentos e corrente de defeito). Este breve estudo recorre aos gráficos da figura 5.3 para comparar as principais correntes do transformador em duas situações distintas de defeito: curto-circuito entre espiras de 1% e 20% no enrolamento primário. Nesta situação não são relevantes os valores de pico das ondas pois o objetivo é analisar o seu comportamento em função do defeito. No que diz respeito à corrente de curto-circuito, o seu valor de pico ajustou-se de modo a ser idêntico nas duas situações.

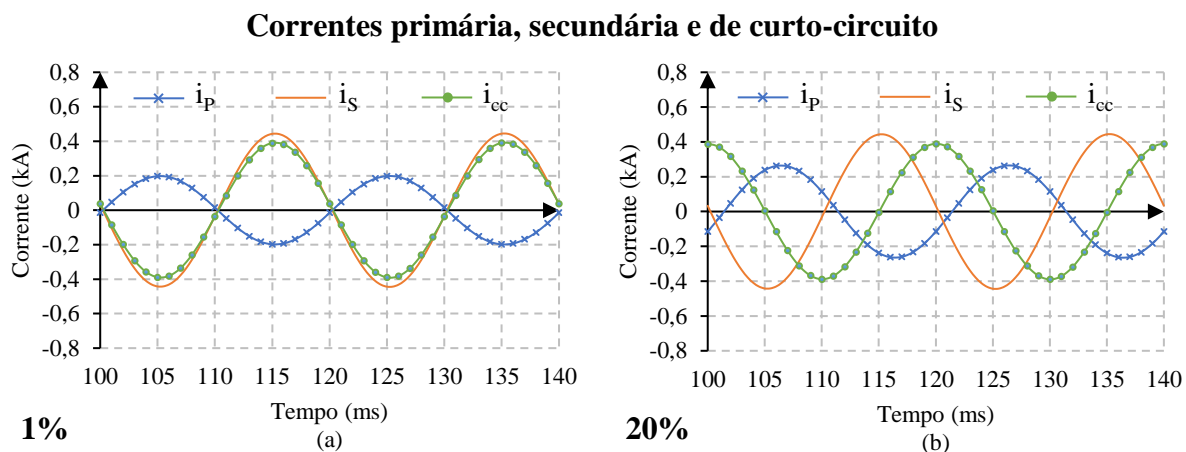


Figura 5.3 – Correntes primária, secundária e de curto-circuito: (a) CC em 1% na zona superior do enrolamento primário; (b) CC em 20% na zona superior do enrolamento primário.

Na condição de defeito com 1% de espiras em curto-circuito a corrente  $i_{cc}$  está em oposição de fase com a corrente  $i_p$ . Já para a condição de 20% de espiras em CC a corrente  $i_{cc}$  está atrasada  $90^\circ$  em relação à condição de 1%. O aumento do número de espiras em curto-circuito (de 1% para 20%) provoca um aumento na corrente de alimentação do transformador e introduz um ligeiro atraso na sua forma de onda. Não existem alterações significativas na corrente no enrolamento secundário. Assim se conclui que um defeito no primário origina um aumento da corrente de entrada da máquina e não altera significativamente o valor da corrente no seu enrolamento secundário. Em relação à corrente de defeito, verifica-se que o seu desfaseamento aumenta progressivamente com o aumento da severidade do defeito. A figura 5.4 apresenta os resultados obtidos no modelo computacional após a aplicação do MDTI, nas várias condições de defeito (CC de 1%, 5%, 10% e 20%). A tabela 5.2 apresenta os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste correspondentes aos casos da figura 5.4.

Através da análise dos gráficos presentes na figura 5.4 é possível verificar que ambas as bobinas de teste apresentam valores de tensão induzida facilmente mensuráveis, numa fase bastante incipiente do defeito (1%). Nas bobinas de teste horizontais as tensões induzidas apresentam um ligeiro desfaseamento, que aumenta com a severidade do defeito.

Tabela 5.2 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT e MDTI para um defeito no enrolamento primário: zona A.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
CC 1%	8,32	9,27	0,95	0,70	16,28	15,64
CC 5%	6,44	9,45	3,22	49,58	22,45	71,57
CC 10%	6,46	9,62	4,28	90,93	29,10	118,57
CC 20%	8,08	9,69	4,59	107,31	38,74	143,38

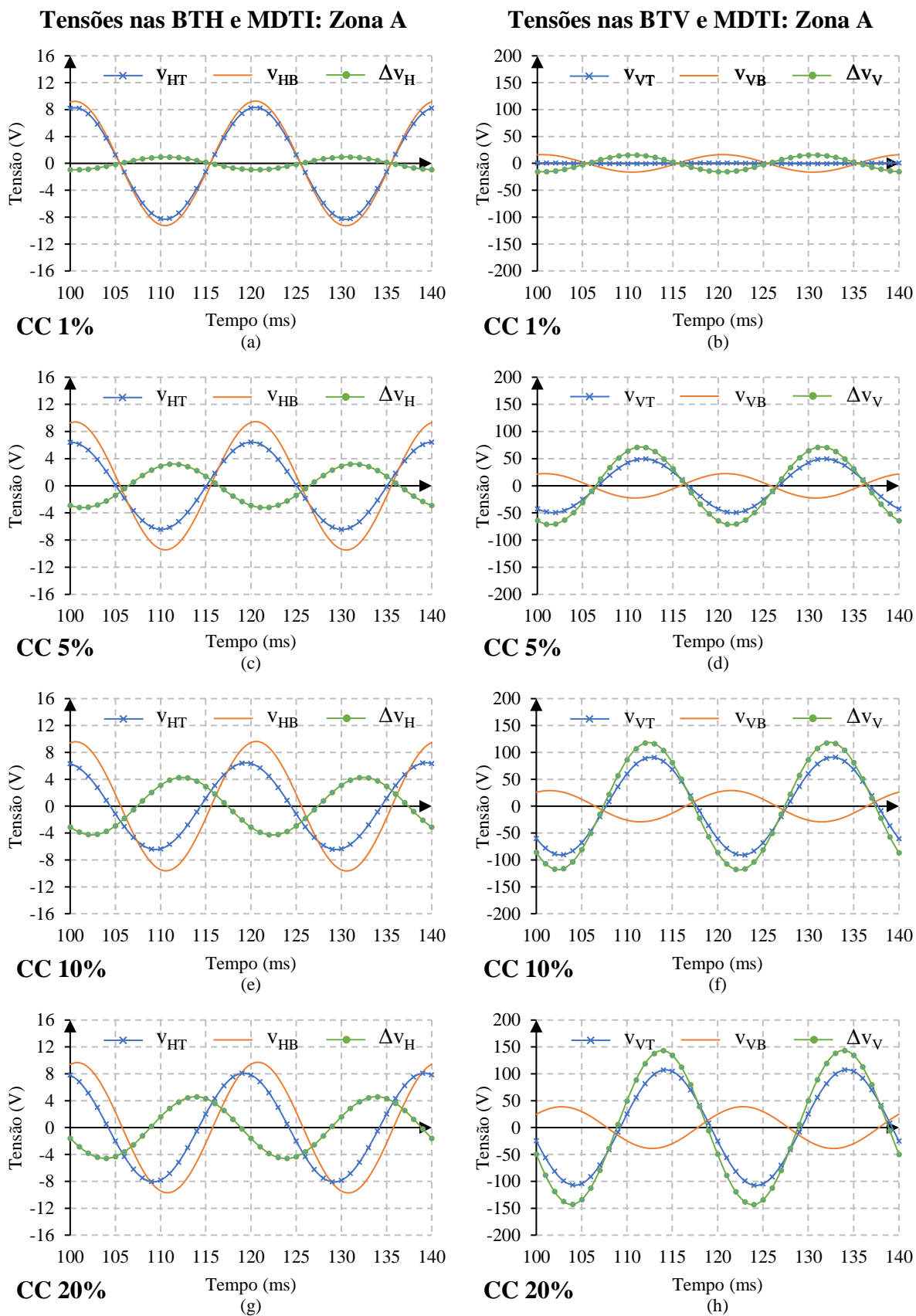


Figura 5.4 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona A.

Nas bobinas de teste verticais o desfasamento é bem mais evidente, aumentado também em função da severidade da anomalia. Quando o defeito ocorre na zona superior os resultados do MDTI apresentam valores mensuráveis, resultando numa rápida identificação da anomalia. Nem todas as bobinas de teste apresentam os mesmos valores de tensão induzida, sendo as verticais mais sensíveis quando comparadas com as bobinas de teste horizontais. As verticais, além dos valores de pico superiores, apresentam ainda um desfasamento superior. São estes dois aspetos que, aliados, permitem obter resultados do MDTI bastante promissores.

Importa ainda verificar como se processa a distribuição das linhas de fluxo e a sua variação em relação à situação de referência. Esta distribuição encontra-se então apresentada na figura 5.5, onde é possível visualizar a evolução e influência do defeito nas linhas de fluxo no ponto máximo da corrente.

A zona afetada origina linhas de fluxo que se fecham pelo defeito, criando duas zonas bem definidas quando se atinge 20% do enrolamento. O fluxo altera-se, pois, o sentido das correntes nas zonas afetadas é contrário ao do restante enrolamento, originando um fluxo contrário ao que ele próprio induz. Assim o fluxo gerado na zona do defeito soma-se ao fluxo provocado pelo enrolamento secundário, dando origem a duas zonas distintas.

### 5.1.2 Curtos-circuitos entre espiras na zona B do enrolamento primário

O curto-circuito entre espiras situado na zona B do enrolamento primário simulou-se tendo por base o esquema elétrico apresentado na figura 5.6. De modo análogo ao ensaio realizado na zona A, a resistência de defeito ( $R_{cc}$ ) foi ajustada de acordo com os valores presentes na tabela 5.3, de modo a garantir que  $I_{cc} = 2I_n$ . A figura 5.7 apresenta as tensões induzidas nas bobinas de teste obtidas no modelo computacional para as várias condições de defeito já mencionadas. A tabela 5.4 fornece os dados relativos aos valores de pico.

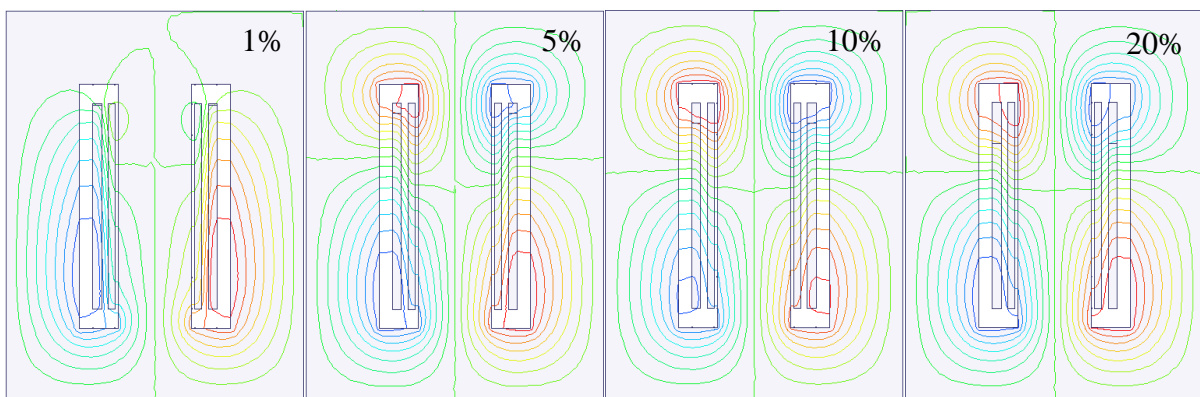


Figura 5.5 – Linhas de fluxo para um defeito na zona A do enrolamento primário, em  $t=125$  ms.

Com recurso aos dados dos gráficos da figura 5.7, complementados pela tabela 5.4 é possível verificar que ambas as bobinas de teste (verticais e horizontais) apresentam valores mensuráveis. Nestes casos o desfasamento entre as ondas obtidas pelas bobinas de teste superior e inferior (horizontais e verticais) é praticamente inexistente. Conclui-se também, pela análise dos valores de pico, que as bobinas de teste verticais apresentam um grau de sensibilidade superior às bobinas de teste horizontais, pois os seus valores são, nos casos analisados, sempre superiores. Quando o defeito se situa na zona B a sua deteção torna-se mais difícil e complexa.

Quando comparados os valores das tabelas 5.2 e 5.4 verifica-se uma clara diminuição nos dados presentes na tabela 5.4. A nível geométrico, este defeito é mais próximo de uma situação de simetria que o defeito na zona A. Pode-se então afirmar que, para situações com algum grau de simetria, o MDTI requer uma maior severidade do defeito até ser possível a sua identificação.

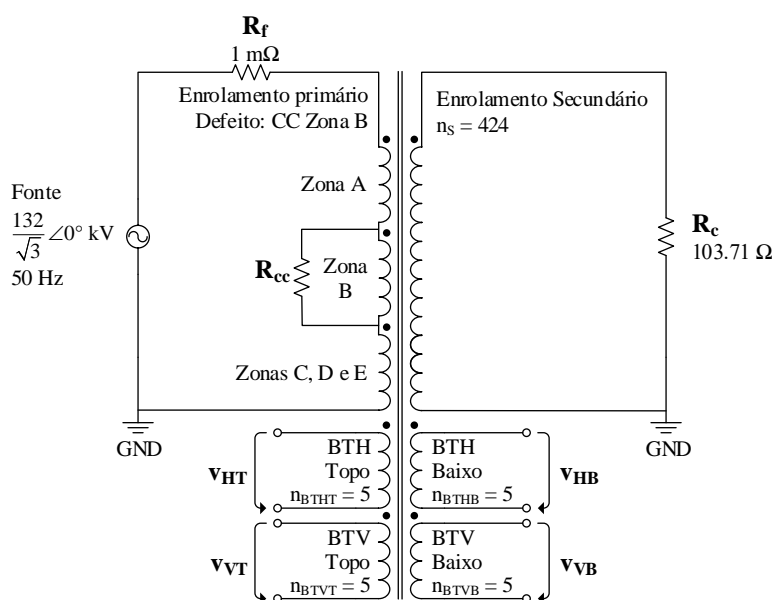


Figura 5.6 – Esquema elétrico utilizado na modelação do defeito na zona B do enrolamento primário.

Tabela 5.3 – Valores da resistência de defeito de modo a garantir  $I_{cc} = 2I_n$ .

Defeito	$R_{cc}$ ( $\Omega$ )
<b>1% -&gt; 10 espiras</b>	1,86
<b>5% -&gt; 49 espiras</b>	8,65
<b>10% -&gt; 98 espiras</b>	16,10
<b>20% -&gt; 196 espiras</b>	27,75

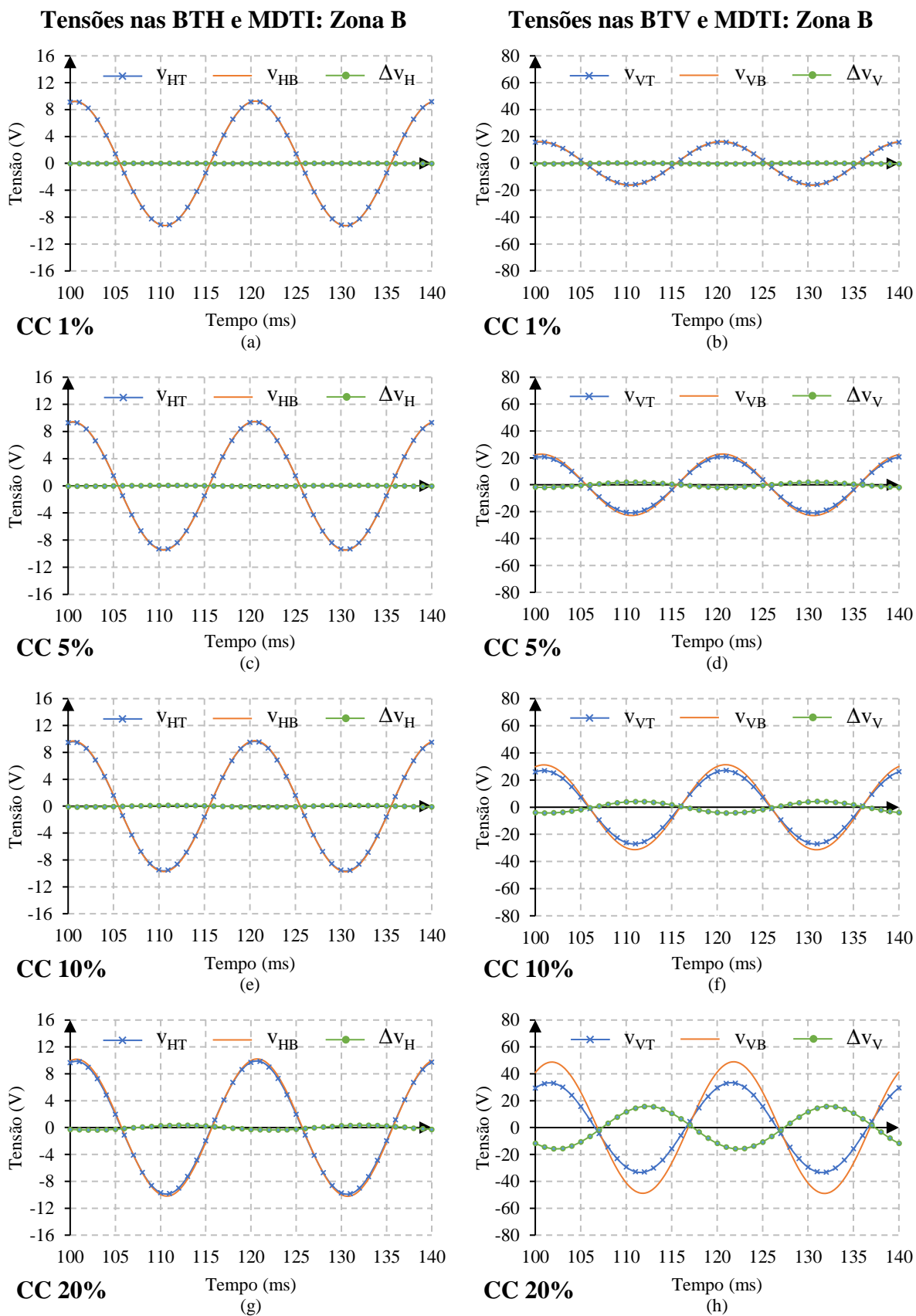


Figura 5.7 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona B.

Tabela 5.4 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT e MDTI para um defeito no enrolamento primário: zona B.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
CC 1%	9,26	9,26	$\approx 0$	15,96	16,29	0,33
CC 5%	9,41	9,48	0,06	20,95	22,85	1,90
CC 10%	9,63	9,74	0,11	27,08	31,31	4,24
CC 20%	9,89	10,19	0,35	33,40	48,87	15,86

A distribuição das linhas de fluxo, nesta situação, é bastante semelhante ao defeito na zona A, pelo que não será apresentada.

Os valores de pico das bobinas de teste verticais aumentam com a severidade do defeito. Este facto torna-as mais sensíveis e permite ter uma maior variação de resultados. No caso das horizontais tal não se verifica, permanecendo com valores aproximadamente constantes e bastante próximos, resultando numa análise inconclusiva. Deste modo conclui-se que, quando o defeito se situa na zona B, apenas as bobinas de teste verticais permitem detetar a anomalia.

### 5.1.3 Curtos-circuitos entre espiras na zona C do enrolamento primário

Analisados os efeitos de curtos-circuitos entre espiras na parte superior do enrolamento primário, é tempo agora de analisar a ocorrência de um defeito semelhante localizado exatamente no centro do enrolamento, zona C. Por se tratar de um defeito localizado numa posição próxima da zona B, o esquema elétrico e valores da resistência de defeito são semelhantes aos utilizados para a análise da zona B, figura 5.6 e tabela 5.3 respetivamente.

A figura 5.8 apresenta as tensões induzidas nas bobinas de teste obtidas no modelo computacional após a aplicação do MDTI nas diversas condições de defeito já mencionadas. A tabela 5.5 fornece os dados relativos aos valores de pico.

Com recurso aos gráficos da figura 5.8, complementados pela tabela 5.5, é possível verificar que ambas as bobinas de teste apresentam valores facilmente mensuráveis. Nestes casos, o desfasamento entre as ondas obtidas pelas bobinas de teste superior e inferior (horizontais e verticais) é quase nulo. Conclui-se também, pela análise dos valores de pico, que as bobinas de teste verticais apresentam um grau de sensibilidade superior às bobinas de teste horizontais, pois os seus valores são, nos casos analisados, sempre superiores. Existe também um aumento progressivo dos valores de pico em função da severidade do defeito, bem mais evidente nas bobinas de teste verticais que nas horizontais.

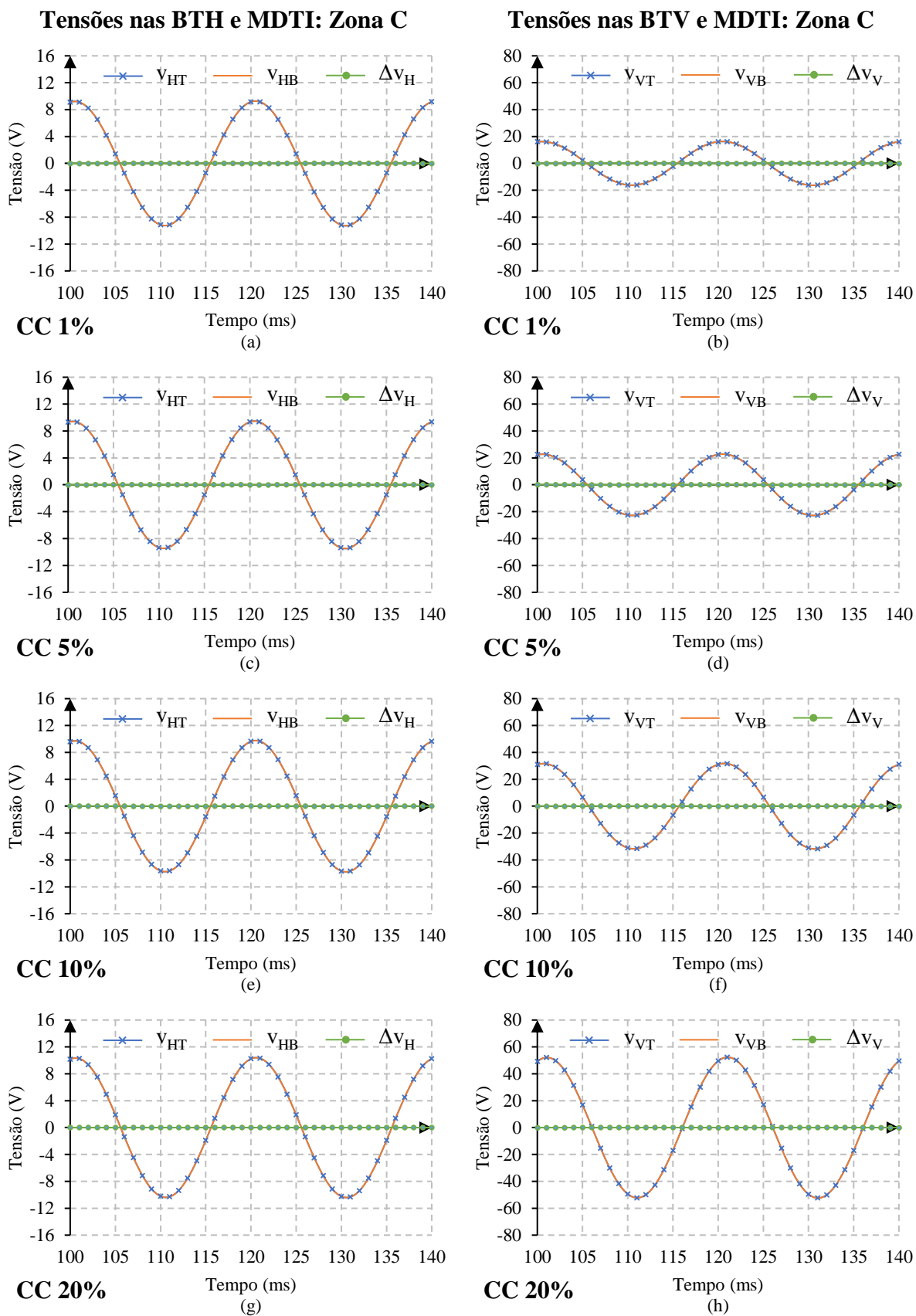


Figura 5.8 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona C.

Tabela 5.5 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT e MDTI para um defeito no enrolamento primário: zona C.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
CC 1%	9,27	9,27	$\approx 0$	16,28	16,29	0,01
CC 5%	9,48	9,48	$\approx 0$	22,89	22,77	0,12
CC 10%	9,76	9,76	$\approx 0$	31,72	31,73	0,01
CC 20%	10,40	10,40	$\approx 0$	52,32	52,33	0,01

Devido aos valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste superior e inferior serem praticamente idênticos e em simultâneo as ondas se encontrarem em fase, os valores resultantes do MDTI são bastante reduzidos. Através destes dados não é possível retirar qualquer conclusão sobre o estado de funcionamento da máquina. Conclui-se então que para defeitos localizados no centro do transformador, zona C, o MDTI não permite a sua identificação.

### 5.1.3.1 Bobina auxiliar

Dada a inviabilidade do MDTI para defeitos na zona C, testou-se a inclusão de uma terceira bobina de teste vertical, localizada no centro do transformador. Os gráficos da figura 5.9 ilustram os resultados obtidos. A tabela 5.6 apresenta os respetivos valores de pico.

Em relação às bobinas de teste horizontais e verticais, os resultados obtidos são idênticos à situação sem a inclusão da bobina central. Sobre a bobina de teste central, verifica-se que os seus valores de tensão induzida são bastante reduzidos, impedindo a retirada de conclusões.

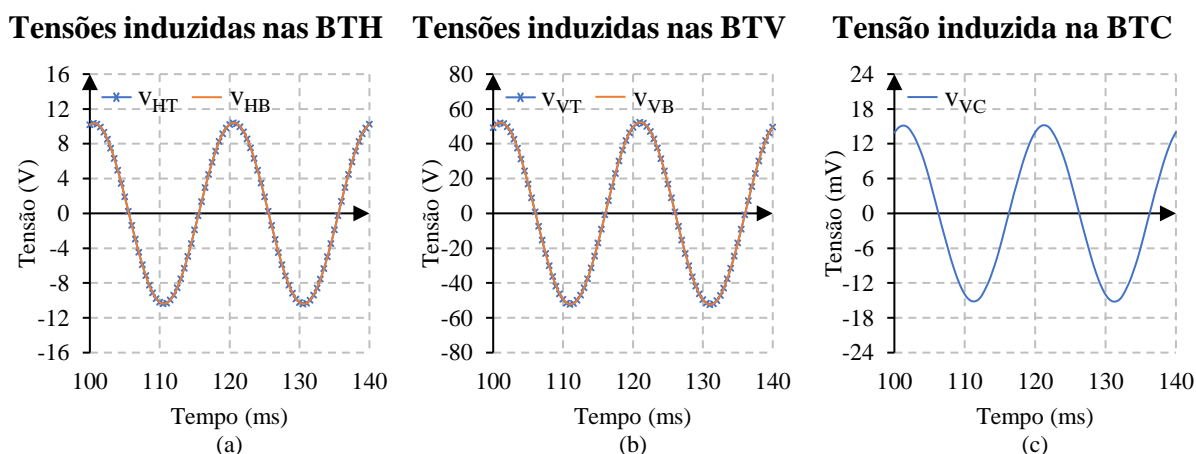


Figura 5.9 – Gráficos das tensões induzidas nas BT com inclusão de uma bobina de teste auxiliar no centro para um CC de 20% localizado na zona C.

Tabela 5.6 – Valores de pico das tensões induzidas nas BTH, BTV e bobina de teste auxiliar para o caso de um defeito no enrolamento primário: zona C.

$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\hat{v}_{VC}$ (mV)
10,40	10,40	52,32	52,32	15,16

Onde  $\hat{v}_{VC}$  representa o valor de pico da tensão induzida na bobina central (V).

A adição de uma terceira bobina de teste vertical localizada no centro do transformador não apresenta qualquer mais valia para o MDTI. A ocorrência de um defeito na zona C, com simetria perfeita, pode considerar-se uma situação de baixa probabilidade, pois é nas extremidades dos enrolamentos que habitualmente o isolamento se encontra mais deteriorado, em consequência dos esforços elétricos a que se encontra sujeito devido às ondas de choque provocadas por descargas atmosféricas e sobretensões de manobra [19] - [20]. Neste caso verifica-se uma simetria, em termos de linhas de fluxo que atravessam as bobinas de teste superior e inferior. Esta simetria faz com que os valores da tensão induzida nas bobinas de teste sejam idênticos.

A figura 5.10 ilustra a evolução e influência do defeito nas linhas de fluxo. Estas linhas permitem verificar a situação de simetria ao traçar uma linha horizontal no transformador, exatamente no centro, e concluir que a zona superior da máquina é um espelho da inferior. Apesar da identificação de defeitos na zona C não ser possível através do MDTI verifica-se que os valores de pico das tensões induzidas, no caso das bobinas de teste verticais, sofrem alterações significativas em função do aumento da severidade do defeito. Caso se defina um valor, dito de referência, que estabeleça um limite, a partir do qual se considere existir um problema, então o defeito pode ser detetado. De notar que os valores de pico obtidos nas bobinas de teste podem ser afetados pelas condições de funcionamento do transformador, como por exemplo, uma sobretensão. O defeito também poderá ser detetado com recurso a informação adicional, tal como a leitura da corrente de entrada da máquina, por exemplo. Outra alternativa será a colocação de um maior número de sensores.

#### **5.1.4 Curtos-circuitos entre espiras na zona D do enrolamento primário**

A situação onde o defeito ocorre na zona D origina um caso análogo ao curto-circuito entre espiras na zona B do enrolamento primário (secção 5.1.2), neste caso as tensões induzidas nas bobinas de teste superior e inferior encontram-se trocadas, devido à alteração na geometria da localização do defeito. Assim, os resultados de  $\Delta v_H$  e  $\Delta v_V$  são idênticos aos da figura 5.7. Posto isto, este caso não será avaliado por questões de simetria e repetição de resultados.

#### **5.1.5 Curtos-circuitos entre espiras na zona E do enrolamento primário**

À semelhança da secção anterior, este caso produz resultados análogos aos apresentados no caso onde se analisou um curto-circuito entre espiras na zona A do enrolamento primário. Atendendo a isso não serão também aqui apresentados.

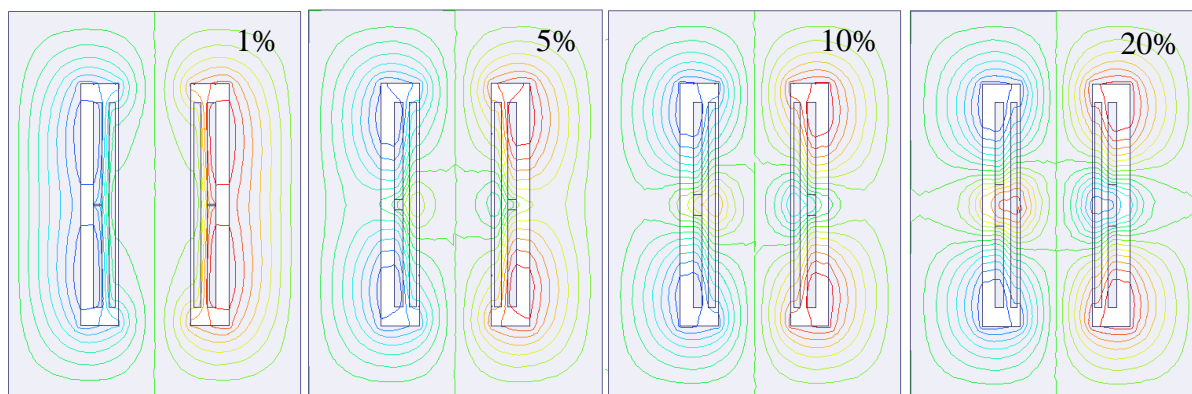


Figura 5.10 – Linhas de fluxo do CC na zona C (1%, 5%, 10% e 20% respectivamente) em  $t = 125$  ms no enrolamento primário.

### 5.1.6 Síntese: CC entre espiras no enrolamento primário

A nível geral, os resultados obtidos na deteção de curtos-circuitos no enrolamento primário vão de encontro aos princípios enunciados no capítulo 3. As bobinas de teste verticais apresentam, em todos os casos, resultados mais claros e evidentes quando comparadas com as horizontais, tornando-as as mais eficazes na deteção de avarias utilizando o MDTI.

### 5.2 Curto-circuito entre espiras no enrolamento secundário

No transformador em estudo o enrolamento secundário é o de tensão mais reduzida e o que possui menor diâmetro (enrolamento interno). De modo análogo ao enrolamento exterior, consideraram-se diversas localizações para o defeito como demonstra a figura 5.11 (zonas A, B, C, D e E). Apesar das várias localizações, por simplicidade e de modo a evitar repetição de resultados, apenas se irá analisar o caso onde o defeito se situa na zona E. As restantes zonas, como será comprovado pelos dados obtidos na zona E, têm um comportamento idêntico aos casos onde o defeito se situa no enrolamento primário. Apesar do comportamento idêntico, de notar que os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste, horizontais e verticais, apresentam uma amplitude mais reduzida.

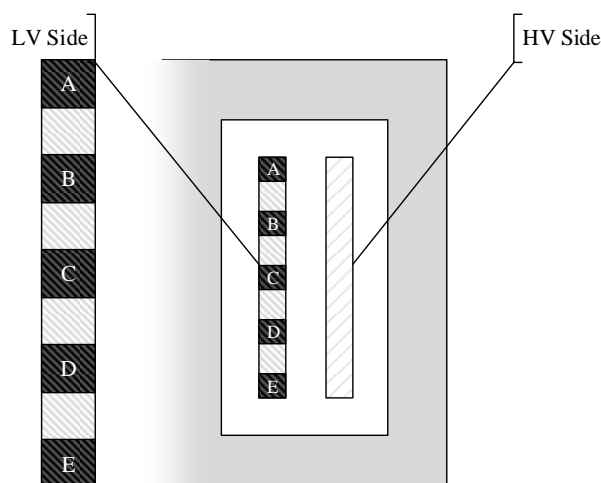


Figura 5.11 – Localização dos curtos-circuitos entre espiras no enrolamento secundário.

### 5.2.1 Curtos-circuitos entre espiras na zona E do enrolamento secundário

O curto-circuito entre espiras na zona E do enrolamento secundário simulou-se tendo por base o esquema elétrico apresentado na figura 5.12. Nesta configuração e de modo a simular diversos defeitos, a resistência de curto-circuito ( $R_{cc}$ ) foi-se ajustando tendo em conta o número de espiras afetadas e segundo os valores presentes na tabela 5.7. Este valor ( $R_{cc}$ ) obteve-se de modo a garantir uma corrente no defeito dupla da corrente nominal do enrolamento ( $I_{cc} = 2I_n$ ). O restante esquema elétrico manteve-se inalterado. A figura 5.13 apresenta os valores obtidos no modelo computacional após a aplicação do MDTI em diversas condições de defeito. A tabela 5.8 fornece os dados relativos aos valores de pico.

Através da análise dos gráficos da figura 5.13 verifica-se que as várias bobinas de teste apresentam valores mensuráveis e que as suas formas de onda se encontram em fase. Percebe-se também que as bobinas de teste verticais apresentam um grau de sensibilidade superior às bobinas de teste horizontais, tendo valores de pico superiores. Nesta situação, os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste são facilmente mensuráveis e o defeito pode ser identificado pelas bobinas de teste verticais numa fase inicial (a partir de 1%). Já as bobinas de teste horizontais conseguem identificar o defeito apenas quando este atinge 5% do enrolamento. Verifica-se ainda que o desfasamento das ondas das bobinas de teste superior e inferior aumenta com a severidade do defeito, o que resulta em valores de pico do MDTI superiores aos valores de pico das tensões induzidas nestas bobinas.

A nível geral, os resultados obtidos no enrolamento secundário vão de encontro aos princípios enunciados no capítulo 3. Tal como no lado primário, as BTV apresentam os melhores resultados, o que as torna mais eficazes na identificação de avarias utilizando o MDTI.

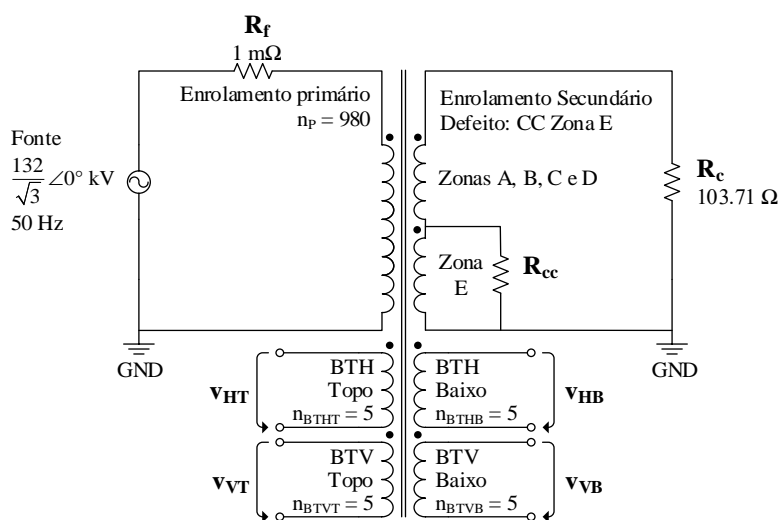


Figura 5.12 – Esquema elétrico utilizado na modelação do defeito na zona E do enrolamento secundário.

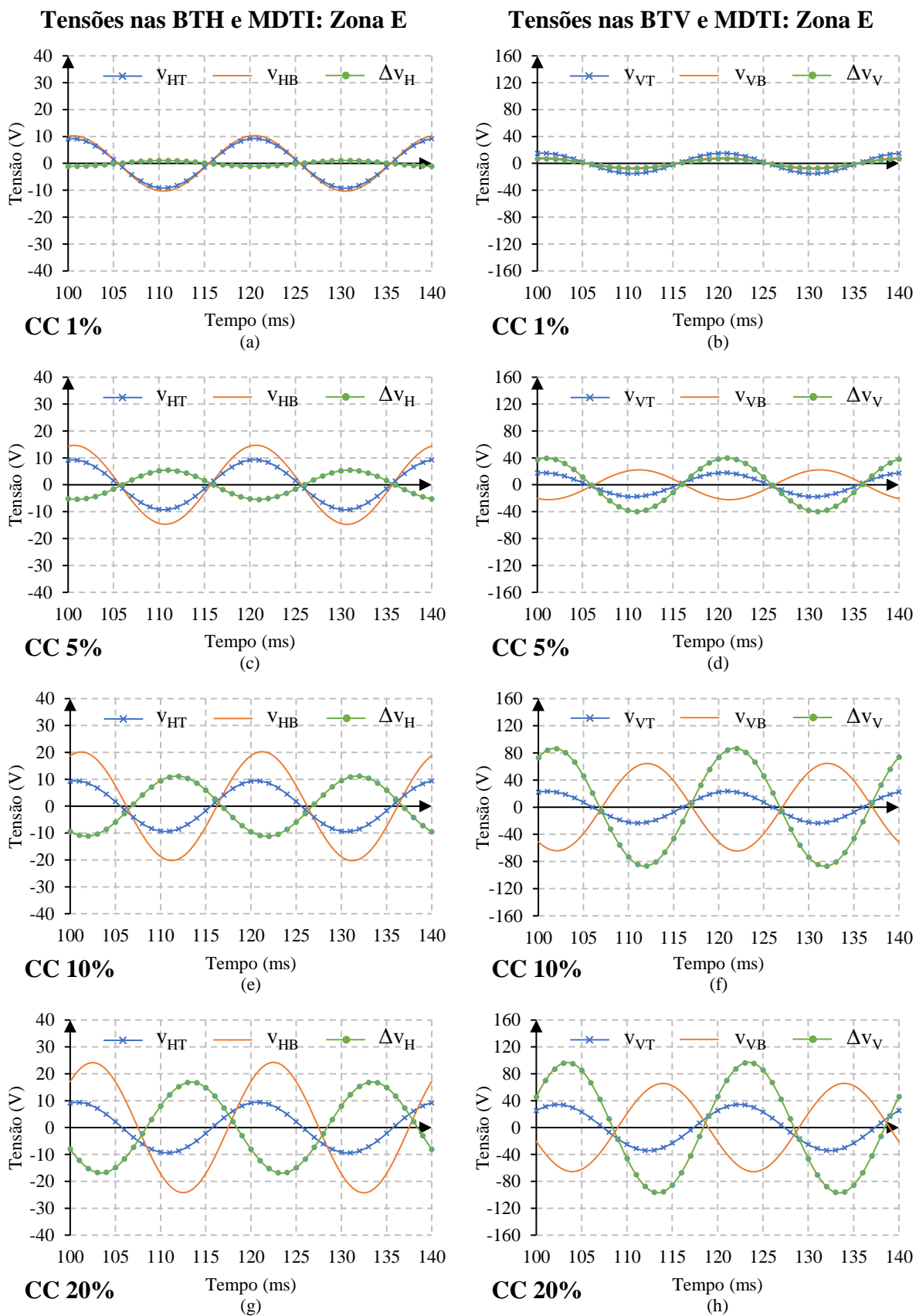


Figura 5.13 – Tensão induzida nas BT's e MDTI para várias condições do CC entre espiras, localizado na zona E.

Tabela 5.7 – Valores da resistência de defeito de modo a garantir  $I_{cc} = 2I_n$ .

Defeito	$R_{cc}$ ( $\Omega$ )
1% → 4 espiras	0,95
5% → 21 espiras	3,92
10% → 42 espiras	4,92
20% → 84 espiras	4,80

Tabela 5.8 – Dados da simulação de um CC na zona E do enrolamento secundário.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
CC 1%	9,22	10,31	1,08	15,15	8,32	6,82
CC 5%	9,30	14,69	5,45	17,83	22,14	39,80
CC 10%	9,43	20,20	11,18	23,41	64,54	86,75
CC 20%	9,39	24,24	16,95	34,26	65,78	97,11

### 5.3 Influência da dimensão e localização das bobinas de teste

A dimensão e localização das bobinas de teste pode influenciar as características das respectivas tensões induzidas. A conjugação destes fatores pode aumentar ou diminuir a sensibilidade do MDTI.

#### 5.3.1 Dimensão das bobinas de teste

Sobre as bobinas de teste horizontais poucas alterações são possíveis, pois o seu objetivo é abraçar os enrolamentos e medir o fluxo de fugas que circula entre eles. No caso das bobinas de teste verticais pode-se alterar a sua altura com o intuito de captar uma maior ou menor quantidade de linhas de fluxo. Tomou-se o exemplo do CC com 20% de espiras afetadas na zona A do enrolamento primário. Para verificar a influência da dimensão das bobinas de teste verticais foram realizadas simulações com altura de 5% e 30% em relação à altura do enrolamento primário (nos resultados de referência foi considerada a altura de 15%). Na figura 5.14(a) apresentam-se os resultados obtidos para uma altura de 5%. Verifica-se que a dimensão mais reduzida das bobinas de teste provoca uma diminuição do valor da tensão induzida, comparativamente com o caso da figura 5.4(h). Assim, caso a bobina de teste apresente uma dimensão muito reduzida, a sua tensão induzida poderá ser afetada por ruído eletromagnético. Os resultados para a altura de 30% são apresentados na figura 5.14(b). Neste caso as tensões induzidas têm agora uma maior amplitude, comparativamente com o caso da figura 5.4(h), tal como seria de esperar. O tratamento destes sinais com maior amplitude pode colocar problemas ao nível do isolamento das bobinas de teste. Adicionalmente, as perturbações provocadas por

pequenos defeitos podem não ser detetadas. Assim, terá que existir um compromisso na escolha da dimensão das bobinas de teste. A tabela 5.9 apresenta os valores de pico dos gráficos das figuras 5.14 e 5.4(h).

### 5.3.2 Localização das bobinas de teste verticais

Consideraram-se três localizações possíveis para as bobinas de teste verticais: junto ao núcleo, entre os enrolamentos e no exterior dos enrolamentos, figura 5.15(a), 5.15(b) e 5.15(c), respectivamente. Para comparar as três localizações das bobinas de teste tomou-se o exemplo de um CC entre espiras, localizado na zona E do enrolamento primário, envolvendo 20% de espiras. Os resultados são apresentados na figura 5.16. A tabela 5.10 apresenta os valores de pico dos gráficos da figura 5.16.

Verifica-se que praticamente todas as tensões induzidas nas bobinas de teste e  $\Delta v_V$  possuem uma amplitude ligeiramente superior quando estas se localizam junto ao núcleo, tornando o MDTI mais sensível. Esta localização requer menor nível de isolamento nas bobinas de teste, pois o núcleo encontra-se normalmente ligado à terra.

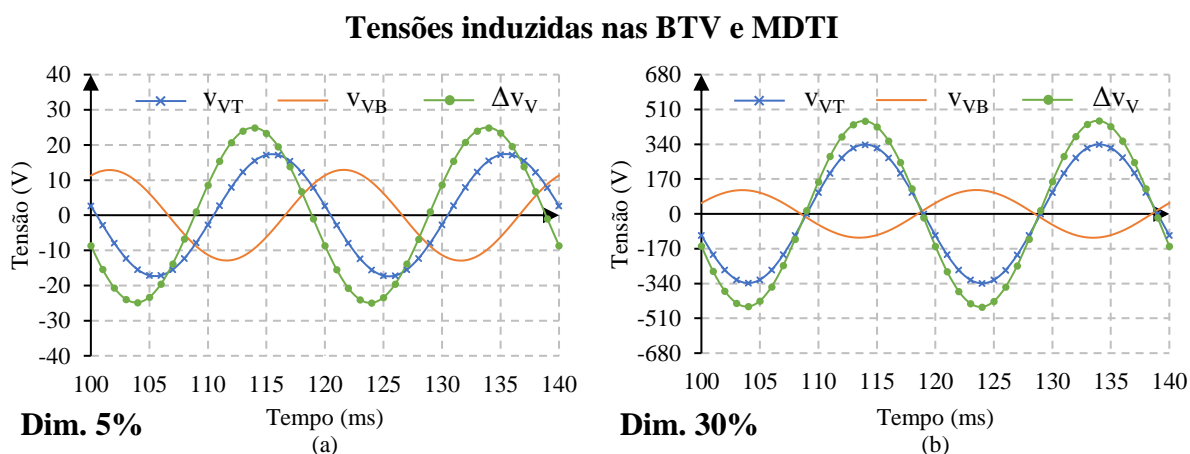


Figura 5.14 – Influência da dimensão das BTV: (a) 5% em relação ao enrolamento primário; (b) 30% em relação ao enrolamento primário.

Tabela 5.9 – Valores de pico das tensões induzidas nas BTV na análise da influência da sua dimensão.

Dimensão	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta \hat{v}_V$ (V)
5%	17,40	12,90	24,93
Referência (15%)	107,31	38,74	143,38
30%	339,33	116,38	454,35

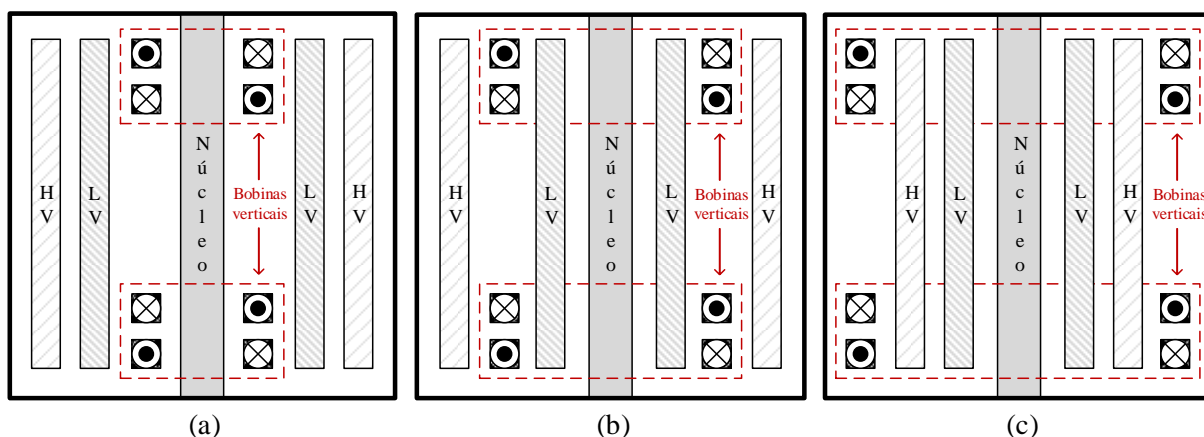


Figura 5.15 – Localização das BTV: (a) junto ao núcleo; (b) entre os enrolamentos; (c) exterior aos enrolamentos.

### Tensões induzidas nas BTV e MDTI

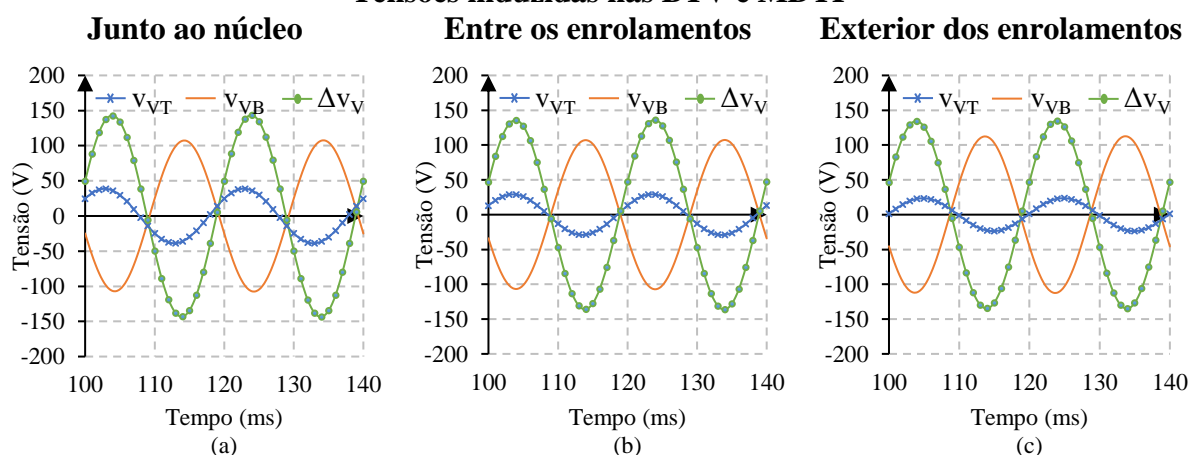


Figura 5.16 – Tensão induzida nas BTV e MDTI: (a) junto ao núcleo; (b) entre os enrolamentos; (c) no exterior dos enrolamentos.

Tabela 5.10 – Valores de pico da tensão induzida nas BTV na análise da sua localização.

Localização	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
<b>Fig. 5.15(a)</b>	38,74	107,30	143,24
<b>Fig. 5.15(b)</b>	29,17	107,25	135,99
<b>Fig. 5.15(c)</b>	23,62	112,43	134,75
<b>Fig. 5.17</b>	29,34	36,11	51,67

Conseqüentemente, optou-se por colocar as bobinas de teste junto ao núcleo, conforme referenciado na figura 5.15(a). Outro fator também analisado refere-se à localização vertical das bobinas de teste. Na figura 5.15 as bobinas de teste encontram-se alinhadas verticalmente com as extremidades (superior e inferior) dos enrolamentos. No caso de uma localização desalinhada, figura 5.17, as tensões induzidas  $v_{VT}$ ,  $v_{VB}$  e  $\Delta v_V$ , apresentam uma amplitude menor, figura 5.18 e tabela 5.10. Esta localização não é vantajosa para o MDTI pelo que não será considerada.

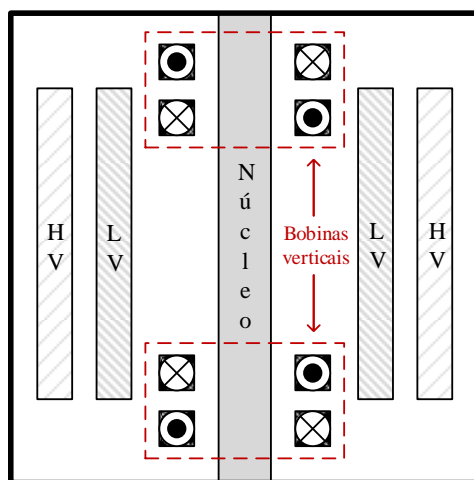


Figura 5.17 – BTV com localização desalinhada.

### Tensão induzida nas BTV e MDTI: BTV desalinhadas com os enrolamentos

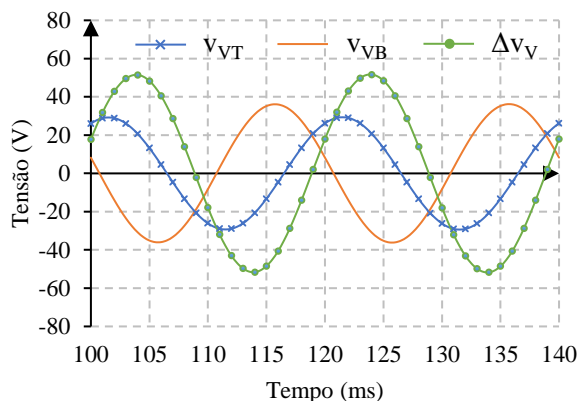


Figura 5.18 – Tensão induzida nas BTV e MDTI: Localização vertical desalinhada.

### 5.3.3 Localização das bobinas de teste horizontais

As bobinas de teste horizontais podem ser colocadas num número reduzido de posições. A sua localização apenas pode variar entre as extremidades da janela do núcleo e os limites dos enrolamentos. Se estas forem colocadas mais próximas dos enrolamentos, figura 5.19(c), o fluxo de fugas por elas captado será máximo, induzindo uma maior tensão aos seus terminais. Quando maior a distância em relação aos enrolamentos, figura 5.19(a) e 5.19(b) menor será o número de linhas de fluxo de fugas abraçadas, originando um decréscimo na tensão induzida aos seus terminais. Apesar deste decréscimo, a melhor localização das bobinas de teste horizontais é junto ao núcleo, figura 5.19(a), pois os níveis de isolamento requeridos são baixos (núcleo geralmente ligado à terra) e não são necessárias alterações significativas a nível de projeto da máquina. A figura 5.20 ilustra os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais nas várias localizações e a tabela 5.11 apresenta os respetivos valores de pico.

Tendo em conta os valores dos gráficos, a melhor localização é o local mais próximo dos enrolamentos, onde os valores de pico são cerca de 66% superiores em relação à localização mais próxima do núcleo. Apesar destes resultados, a construção de bobinas de teste próximas

dos enrolamentos pode revelar-se bastante complexa devido aos esforços eletrodinâmicos que estas teriam de suportar e ao nível de isolamento requerido. Alterações à geometria do transformador também poderiam ser necessárias. Para confirmar os dados anteriores, verifica-se que o MDTI é mais eficiente quando as bobinas de teste horizontais se encontram mais próximas dos enrolamentos. Esta localização permite captar um maior número de linhas de fluxo de fugas e induzir uma maior tensão nas bobinas de teste horizontais. De modo geral, a melhor localização é um compromisso a nível de características elétricas e aspetos construtivos, tendo-se optado, neste trabalho, por dar prioridade aos aspetos construtivos.

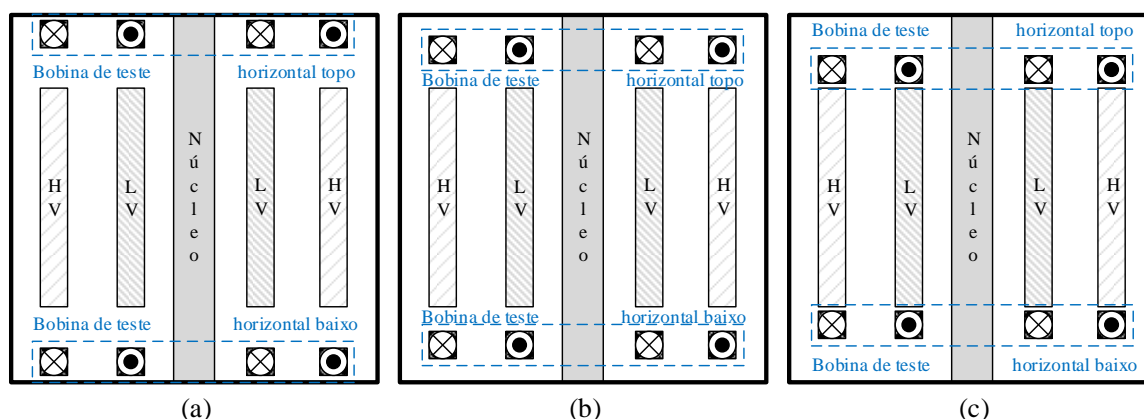


Figura 5.19 – Diversas localizações para as BTH: (a) junto ao núcleo; (b) posição intermédia entre o núcleo e os enrolamentos; (c) junto aos enrolamentos.

### Tensões induzidas nas BTH e MDTI

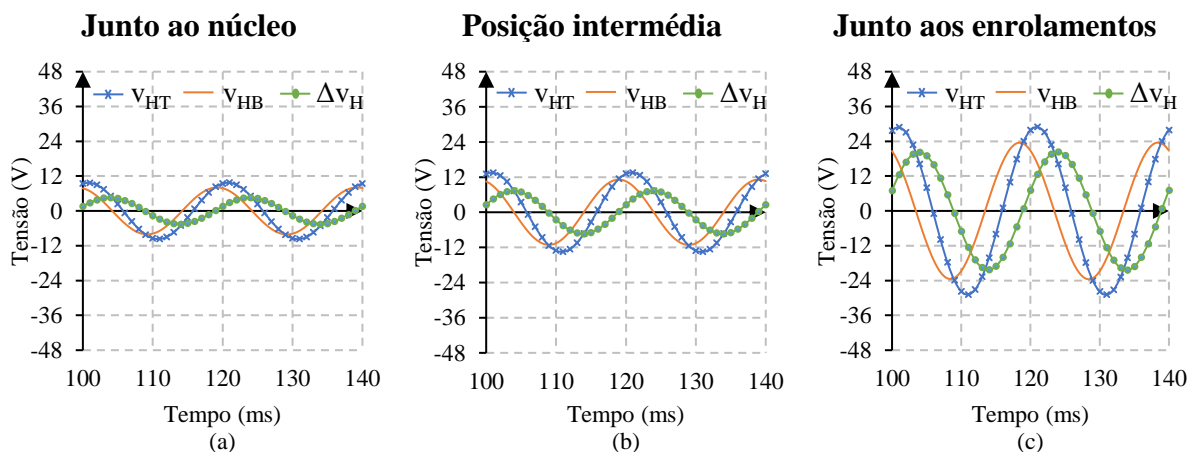


Figura 5.20 – Gráficos de  $v_{HT}$ ,  $v_{HB}$  e  $\Delta v_H$  para diferentes localizações das bobinas de teste horizontais: (a) junto ao núcleo; (b) posição intermédia; (c) junto aos enrolamentos.

Tabela 5.11 – Valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais na análise da sua localização.

Localização	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta \hat{v}_H$ (V)
Fig. 5.20(a)	9,69	8,09	4,59
Fig. 5.20(b)	13,52	11,16	7,36
Fig. 5.20(c)	28,89	23,56	20,34

## Capítulo 6 – Deformações nos enrolamentos

As deformações nos enrolamentos dos transformadores são, a par com os curtos-circuitos, uma das principais razões para a retirada de serviço da máquina. O deslocamento dos enrolamentos afeta a distribuição do fluxo e pode originar curtos-circuitos. As deformações são avarias de maior complexidade quando comparadas com os curtos-circuitos, pois cada deformação origina uma distribuição de fluxo (fluxo útil e de fugas) distinta e um comportamento da máquina bastante difícil de prever. O deslocamento dos enrolamentos pode alterar substancialmente o modo de funcionamento da máquina e pode apressar o fim da sua vida útil. Estas modificações podem ocorrer por diversas razões, como por exemplo a existência de pequenos defeitos associados que alteram a geometria do transformador ou esforços eletromecânicos. Os esforços podem ter a sua origem numa sobretensão temporária, sobrecargas e defeitos externos. Devido às inúmeras deformações que podem ocorrer, optou-se por modelar apenas as abaixo listadas:

- Alongamento vertical do enrolamento externo;
- Alongamento vertical do enrolamento interno;
- Contração vertical do enrolamento externo;
- Contração vertical do enrolamento interno;
- Deformação radial: alteração do diâmetro dos enrolamentos;
- Deslocamento ascendente do enrolamento externo;
- Deslocamento ascendente do enrolamento interno.

Neste capítulo também se irá analisar a influência da localização dos enrolamentos em relação ao núcleo, sem a presença de avarias. Esta localização altera a distribuição do fluxo útil e de fugas e o MDTI, de modo a ser viável, deverá contemplar esta situação.

### 6.1 Deslocamento ascendente do enrolamento externo

O defeito analisado nesta secção pretende estudar a eficácia do MDTI quando se verifica um deslocamento ascendente do enrolamento primário (externo). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.1. A figura 6.2 apresenta os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.1 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.2.

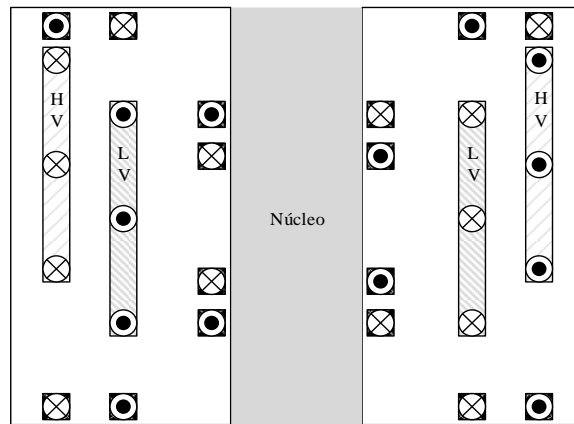


Figura 6.1 – Geometria utilizada no estudo de um deslocamento ascendente do enrolamento externo.

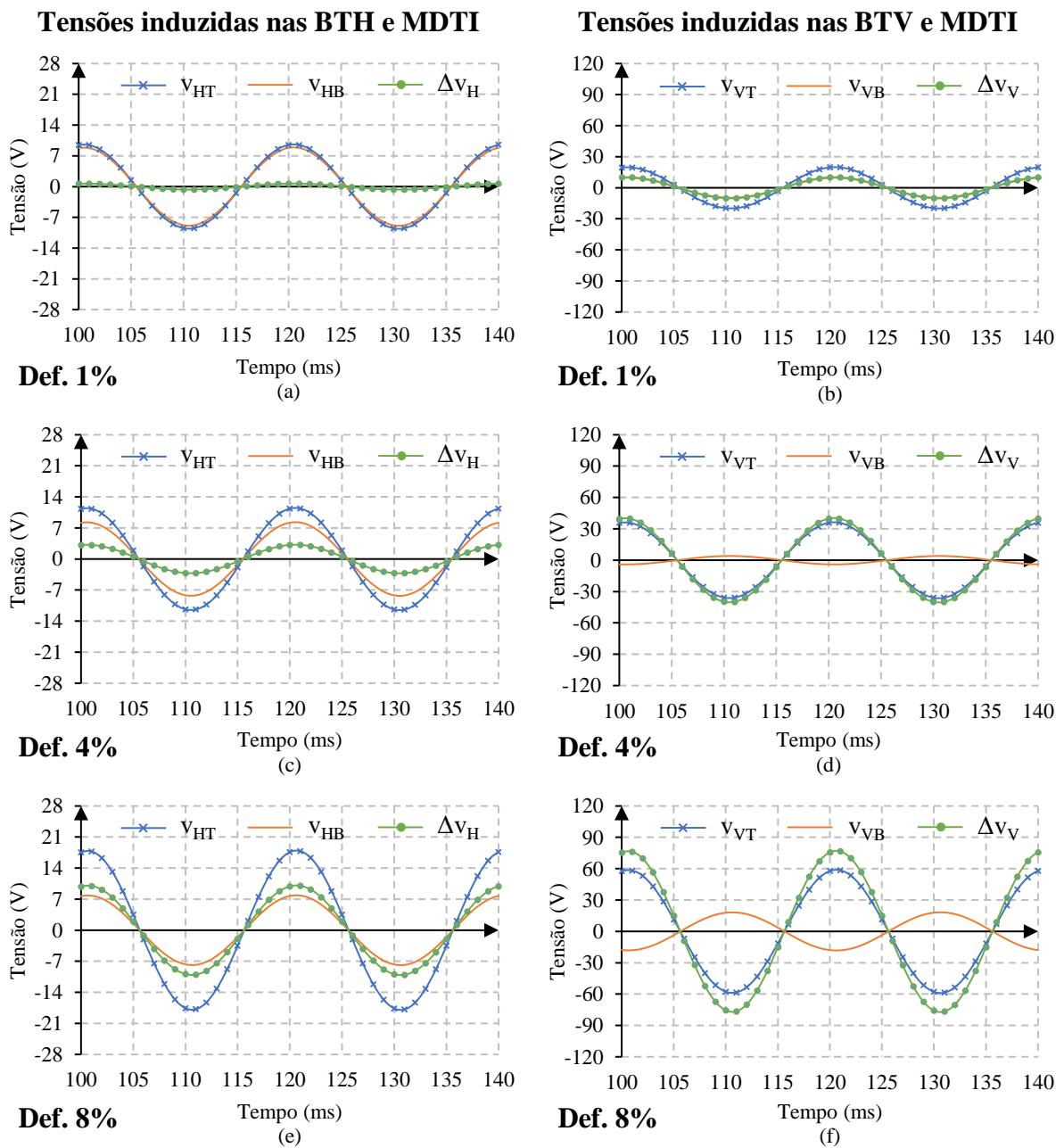


Figura 6.2 – Tensões induzidas nas BT's no caso de um deslocamento ascendente do enrolamento externo.

Tabela 6.1 – Valores de pico das tensões induzidas: deslocamento ascendente do enrolamento externo.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 1%	9,60	8,91	0,69	19,91	9,67	10,24
Def. 4%	11,51	8,30	3,21	36,31	4,04	40,34
Def. 8%	17,94	7,86	10,08	58,86	18,23	77,07

Os resultados acima apresentados mostram que as bobinas de teste verticais apresentam dados mais promissores que as bobinas de teste horizontais. Nas três situações os valores de pico das tensões induzidas das bobinas de teste verticais são superiores, originando um valor de MDTI também superior. Com este método o defeito pode ser detetado numa fase bastante inicial (1%). O valor de pico do MDTI nas bobinas de teste verticais com 1% de defeito é aproximadamente igual ao valor de pico do MDTI nas bobinas de teste horizontais quando o defeito atinge os 8% do enrolamento. Estes dados permitem concluir que as bobinas de teste horizontais, nesta situação, não apresentam qualquer mais valia para a identificação de defeitos com recurso ao MDTI.

## 6.2 Deslocamento ascendente do enrolamento interno

Nesta secção pretende-se analisar o comportamento do MDTI quando se verifica um deslocamento ascendente do enrolamento secundário (interno). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.3. A figura 6.4 apresenta os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.2 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.4.

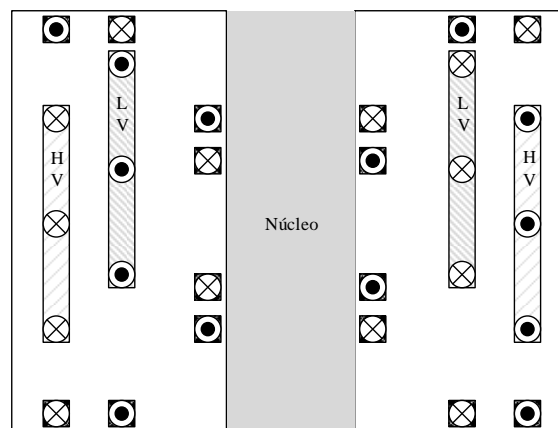


Figura 6.3 – Geometria utilizada no estudo de um deslocamento ascendente do enrolamento interno.

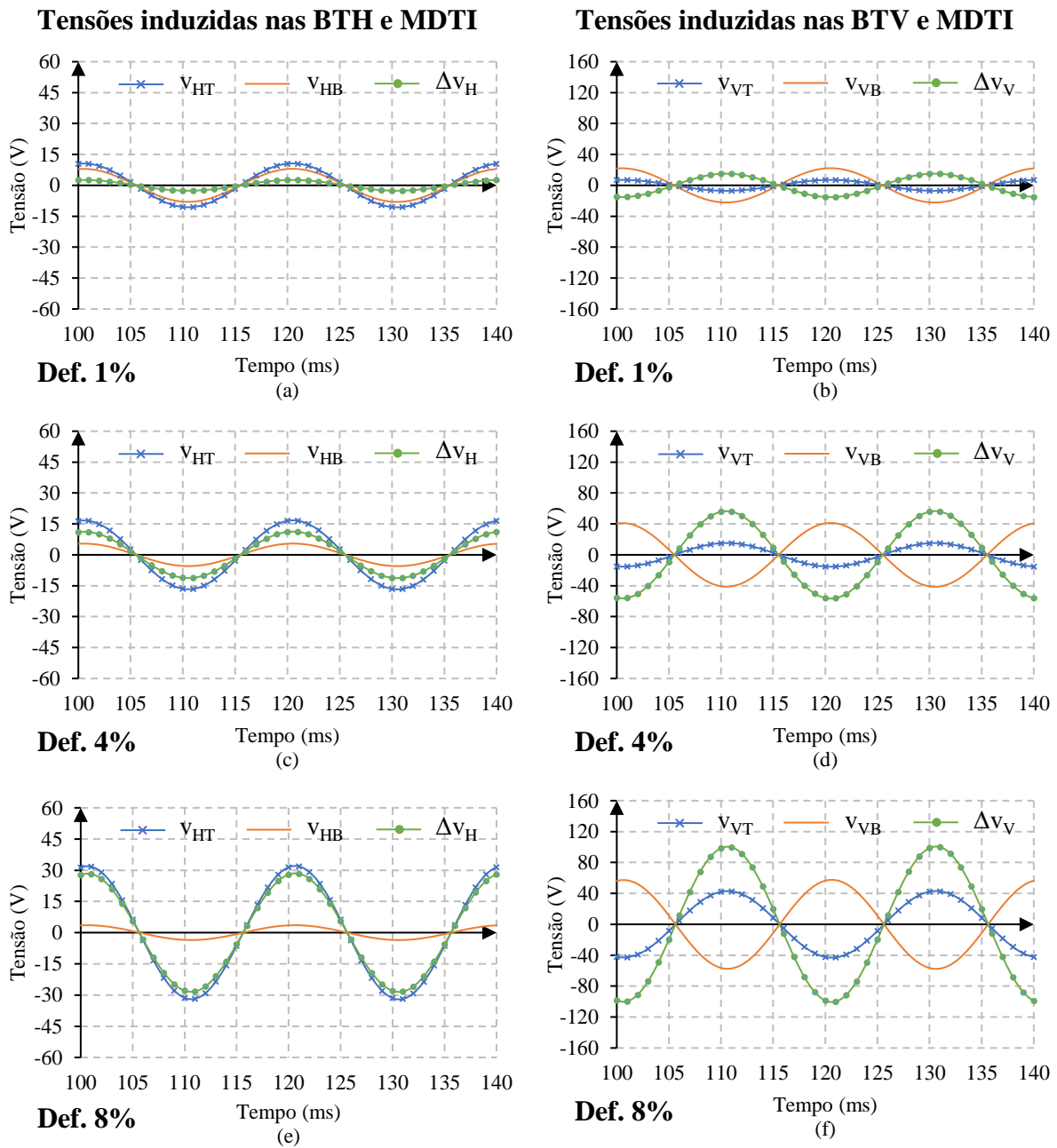


Figura 6.4 – Tensões induzidas nas BT's para um deslocamento ascendente do enrolamento interno.

Tabela 6.2 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: deslocamento ascendente do enrolamento interno.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def 1%	10,63	8,02	2,61	7,04	22,18	15,16
Def 4%	16,74	5,47	11,27	15,33	41,27	56,63
Def 8%	32,03	3,56	28,47	43,06	57,51	100,63

Nos três casos analisados, a aplicação do MDTI permite identificar o defeito. Esta avaria provoca maiores níveis de tensão induzida nas bobinas de teste (horizontais e verticais) quando comparada com uma avaria semelhante no enrolamento primário.

Apesar de todas as bobinas de teste permitirem detetar o defeito, as bobinas de teste verticais apresentam valores de pico superiores, resultando um maior valor de  $\Delta v_V$ . Verifica-se ainda que, a partir de um determinado valor de assimetria vertical entre os enrolamentos, as tensões induzidas nas bobinas de teste verticais encontram-se em oposição de fase, resultando num aumento do valor de  $\Delta v_V$ . Deste modo, as bobinas de teste verticais são a melhor opção para identificar este defeito. As bobinas de teste horizontais, nesta situação, não constituem uma mais valia para o MDTI.

### **6.3 Alongamento vertical do enrolamento externo**

O alongamento vertical de um enrolamento pode ocorrer, no limite, de duas formas distintas, de modo simétrico e assimétrico em relação ao núcleo. A secção 6.3.1 pretende analisar a aplicação do MDTI quando o defeito ocorre de modo assimétrico e a secção 6.3.2 estuda o seu comportamento quando o defeito ocorre de modo simétrico. Ao fazer uma pequena analogia com o capítulo 5, onde se analisou a capacidade do MDTI para lidar com curtos-circuitos, verificou-se que em situações de simetria o MDTI resultava nulo, não permitindo detetar o defeito. O caso simétrico de um alongamento vertical de um enrolamento espera-se que seja idêntico ao apresentado na secção 5.1.3 (CC na zona central do enrolamento primário), enquanto no caso assimétrico espera-se que os dados permitam retirar conclusões sobre o verdadeiro estado da máquina.

#### **6.3.1 Alongamento assimétrico**

O defeito analisado nesta secção pretende estudar o comportamento do MDTI quando ocorre um alongamento vertical assimétrico do enrolamento primário (externo). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.5. A figura 6.6 ilustra os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.3 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.6.

Os resultados das bobinas de teste verticais revelaram-se mais evidentes no que toca à identificação do defeito, além de permitirem sinalizar o defeito numa fase mais precoce. Outro aspeto importante é o facto de este defeito não provocar desfasamento nas tensões induzidas nas bobinas de teste (horizontais e verticais) superior e inferior.

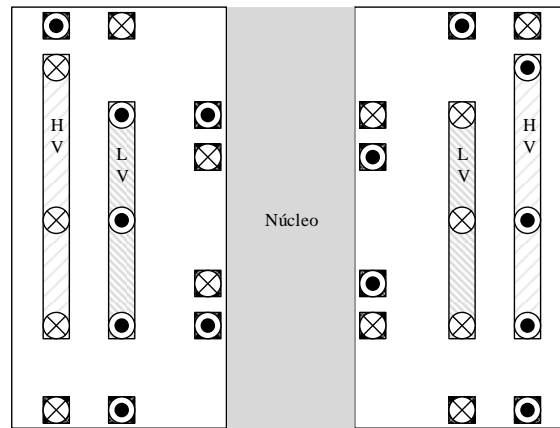


Figura 6.5 – Geometria utilizada no estudo de um alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.

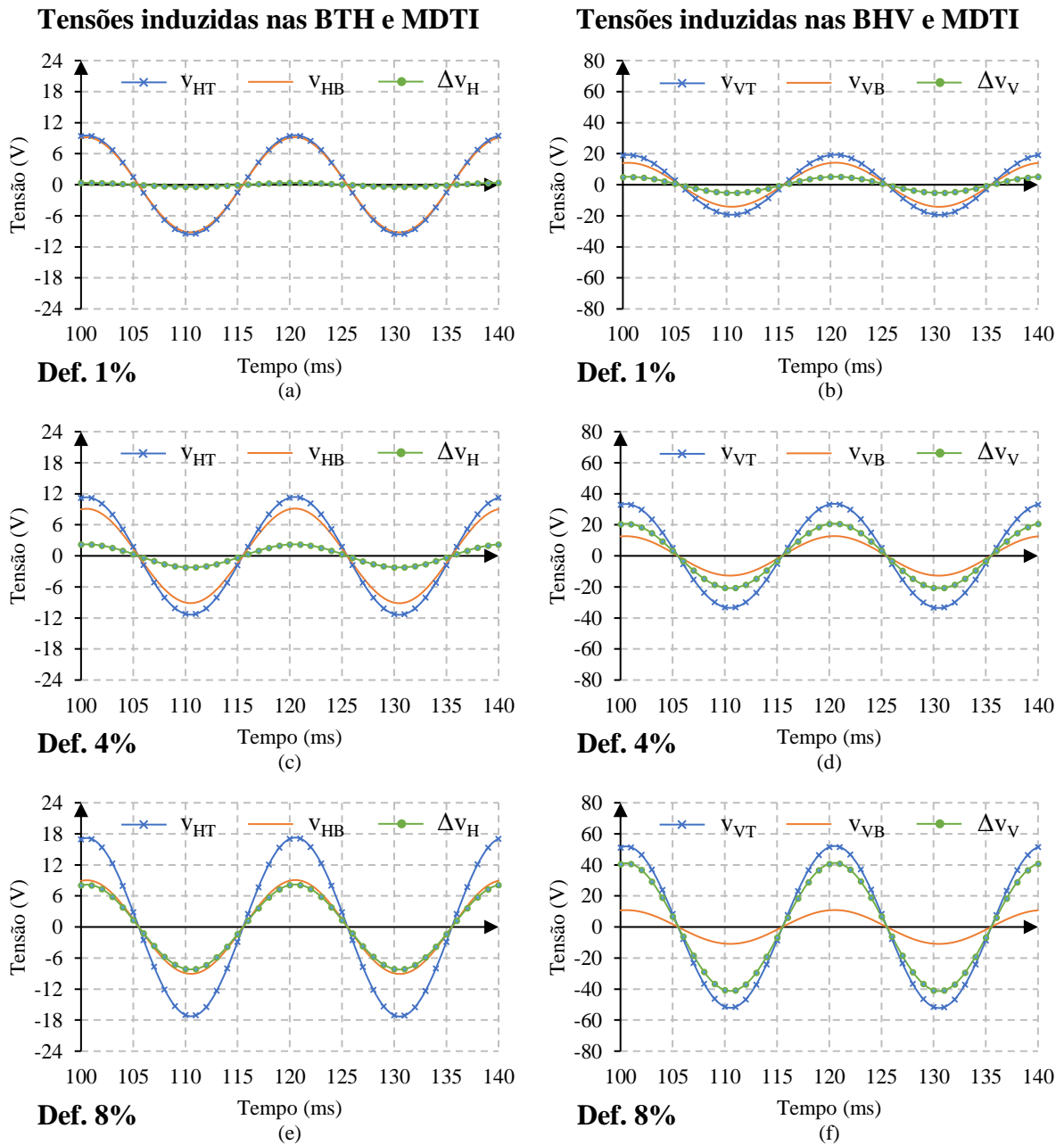


Figura 6.6 – Tensões induzidas nas BT's para um alongamento assimétrico vertical do enrolamento externo.

Tabela 6.3 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 1%	9,58	9,19	0,38	19,35	14,20	5,16
Def. 4%	11,38	9,14	2,23	33,56	12,73	20,83
Def. 8%	17,28	9,07	8,21	52,16	10,90	41,27

Por este motivo, o resultado da aplicação do MDTI origina valores inferiores aos valores de pico nas bobinas de teste. Outro aspeto interessante é o facto de a tensão induzida nas bobinas de teste inferiores, as mais distantes do defeito, não se alterar de modo significativo. De modo geral pode-se afirmar que as bobinas de teste verticais permitem identificar este defeito numa fase inicial. As bobinas de teste horizontais requerem uma parte considerável do enrolamento afetada para que os valores das tensões induzidas nas bobinas de teste permitam retirar conclusões, não sendo a melhor opção.

### 6.3.2 Alongamento simétrico

O defeito analisado nesta secção tem como objetivo estudar o comportamento do MDTI quando ocorre um alongamento vertical simétrico do enrolamento primário (externo). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.7. A figura 6.8 ilustra os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.4 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.8.

Através de uma análise do defeito anterior conclui-se que o MDTI, por si só, não permite detetar esta anomalia. Os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste aumentam com a severidade do defeito. Apesar deste aumento a alteração das tensões induzidas nas bobinas de teste é semelhante nas bobinas de teste superiores e inferiores, motivada pela simetria existente. Estes fatores originam valores do MDTI nulos. O defeito poderá ser identificado com recurso a informação adicional proporcionada por outros sensores ou com recurso a leituras de equipamentos adicionais. Em suma, defeitos com elevado grau de simetria, como este caso, não podem ser identificados com recurso ao MDTI.

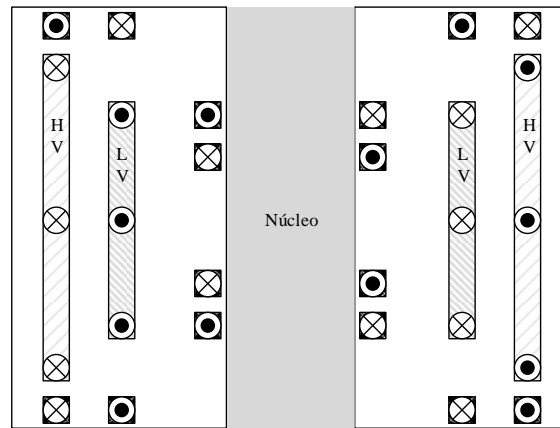


Figura 6.7 – Geometria utilizada no estudo de um alongamento vertical simétrico do enrolamento externo.

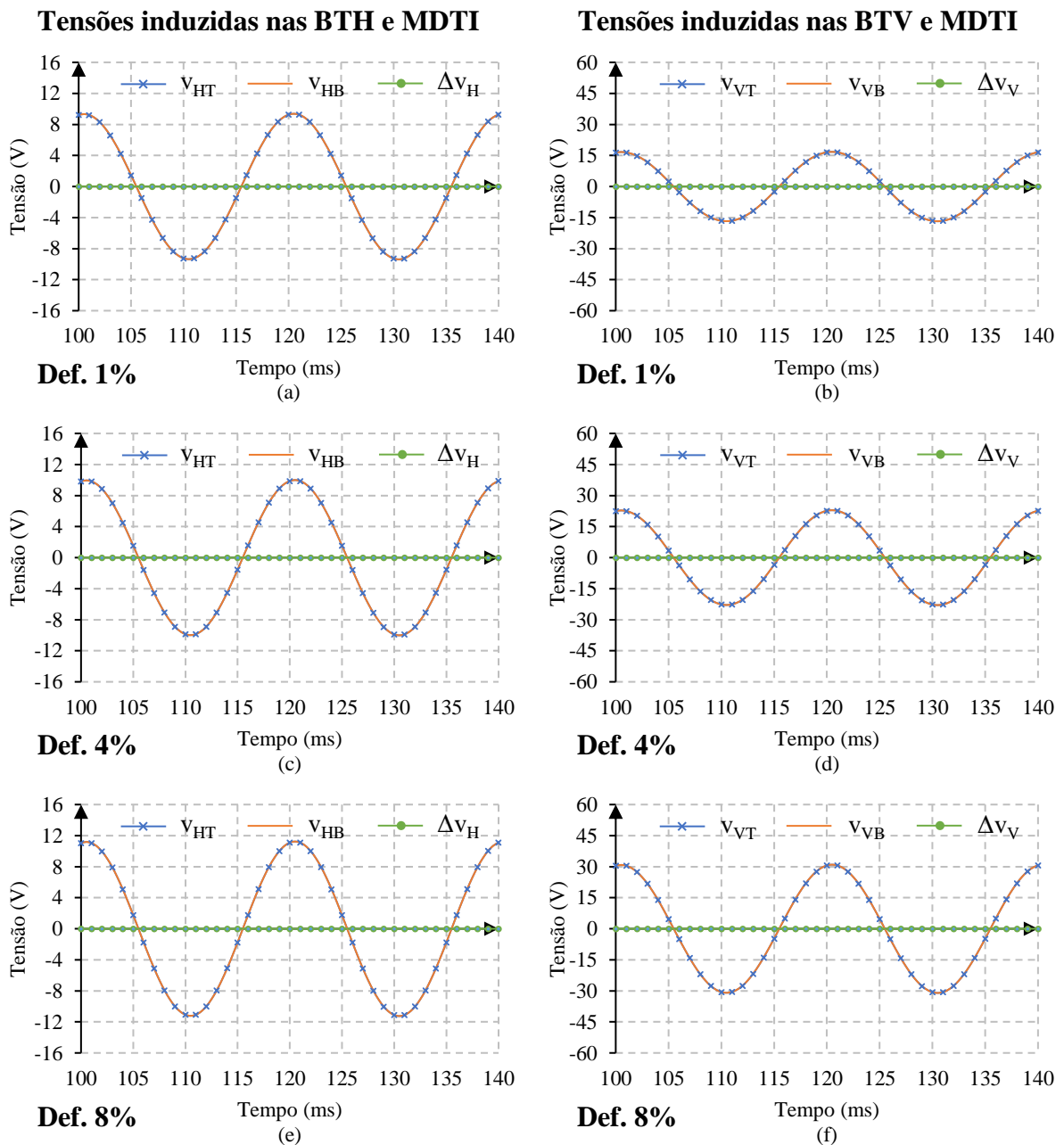


Figura 6.8 – Tensões induzidas nas BT's para um alongamento simétrico vertical do enrolamento externo.

Tabela 6.4 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alongamento vertical simétrico do enrolamento externo.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 1%	9,37	9,37	$\approx 0$	16,75	16,75	$\approx 0$
Def. 4%	10,00	10,00	$\approx 0$	22,91	22,91	$\approx 0$
Def. 8%	11,23	11,23	$\approx 0$	30,97	30,97	$\approx 0$

### 6.4 Alongamento vertical do enrolamento interno

A avaria analisada nesta secção estuda o comportamento do MDTI quando ocorre um alongamento vertical assimétrico do enrolamento secundário (interno). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.9. A figura 6.10 apresenta os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.5 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.10.

As conclusões a retirar nesta situação são semelhantes à secção 6.3.1 (alongamento assimétrico do enrolamento externo), pelo que não se entrará novamente em detalhe. Importa apenas referir que os valores de pico presentes na tabela 6.5 são superiores aos apresentados na tabela 6.3, o que indica que defeitos com estas características e com origem no enrolamento secundário provocam uma maior influência no funcionamento do transformador.

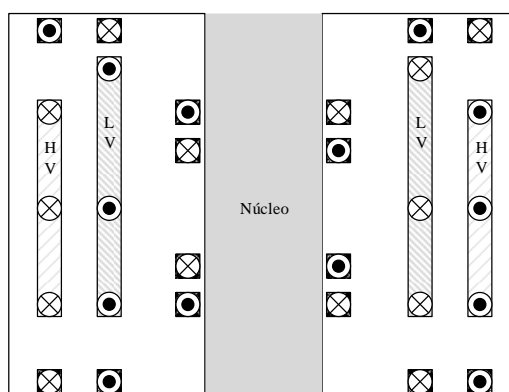


Figura 6.9 – Geometria utilizada no estudo de um alongamento vertical assimétrico do enrolamento interno.

Tabela 6.5 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alongamento vertical do enrolamento interno.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 1%	10,54	9,14	1,41	7,47	15,06	7,59
Def. 4%	16,18	8,92	7,26	12,79	16,09	28,90
Def. 8%	29,98	8,64	21,35	36,36	17,36	53,75

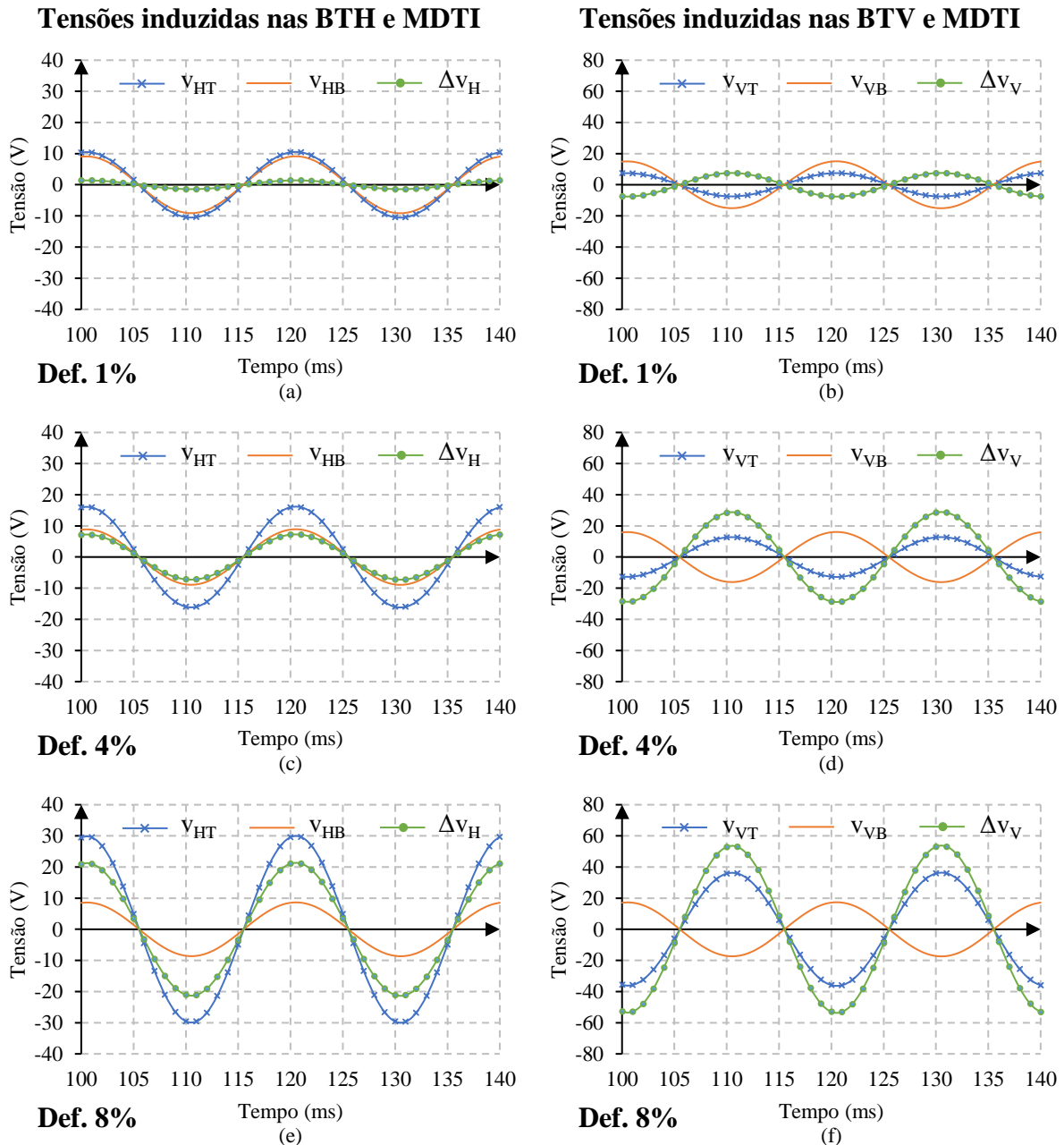


Figura 6.10 – Tensões induzidas nas BT's para um alongamento vertical do enrolamento interno.

### 6.5 Contração vertical do enrolamento externo

A anomalia estudada nesta secção verifica o comportamento do MDTI quando ocorre uma contração vertical assimétrica do enrolamento primário (externo). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.11. A figura 6.12 ilustra os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.6 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.12.

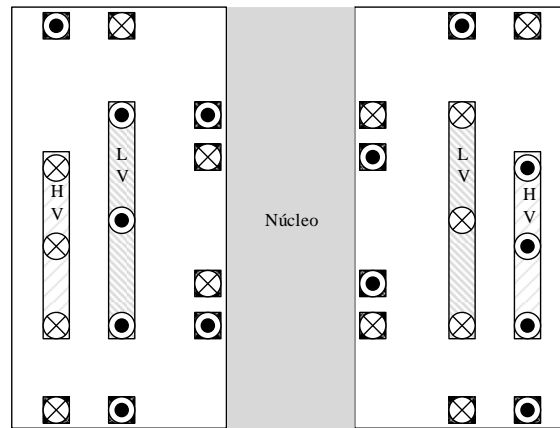


Figura 6.11 – Geometria utilizada no estudo de uma contração vertical assimétrica do enrolamento externo.

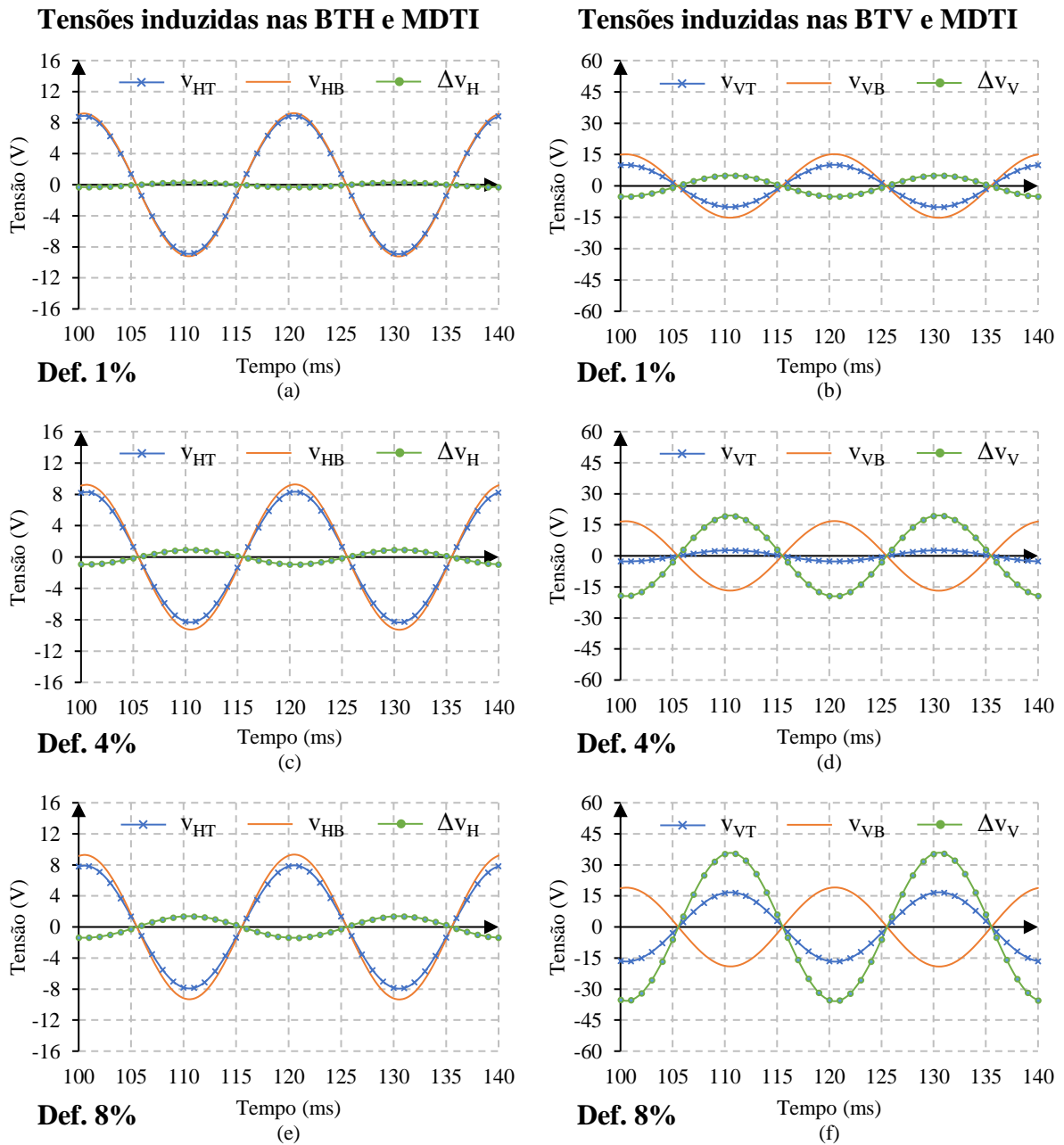


Figura 6.12 – Tensões induzidas nas BT's para uma contração vertical do enrolamento externo.

Tabela 6.6 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: contração vertical do enrolamento externo.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 1%	8,92	9,23	0,31	10,13	15,21	5,09
Def. 4%	8,34	9,27	0,93	2,70	16,82	19,53
Def. 8%	7,94	9,33	1,39	16,77	19,09	35,88

Ao realizar uma análise aos três casos anteriores verifica-se que a utilização de bobinas de teste horizontais não apresenta uma maior valia para o MDTI. Os seus valores são baixos em comparação com os resultados adquiridos por parte das bobinas de teste verticais. As bobinas de teste verticais permitem detetar o defeito numa fase incipiente (1%), tornando-as a melhor escolha para a identificação de avarias com recurso ao MDTI.

### 6.6 Contração vertical do enrolamento interno

Nesta secção pretende-se analisar o comportamento do MDTI quando ocorre uma contração vertical assimétrica do enrolamento secundário (interno). A geometria que caracteriza esta deformação encontra-se na figura 6.13. A figura 6.14 ilustra os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando as seguintes condições do defeito: deslocamento de 1%, 4% e 8% da altura do enrolamento em relação à posição normal simétrica. Na tabela 6.7 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.14.

Os resultados obtidos, embora com valores de pico ligeiramente superiores, são idênticos aos da secção 6.5 (contração vertical do enrolamento externo). A utilização de bobinas de teste verticais revela-se a mais eficaz, sendo a melhor opção. Com as bobinas de teste verticais o defeito pode ser detetado com maior grau de certeza e quando este se encontra ainda numa fase bastante inicial (1%).

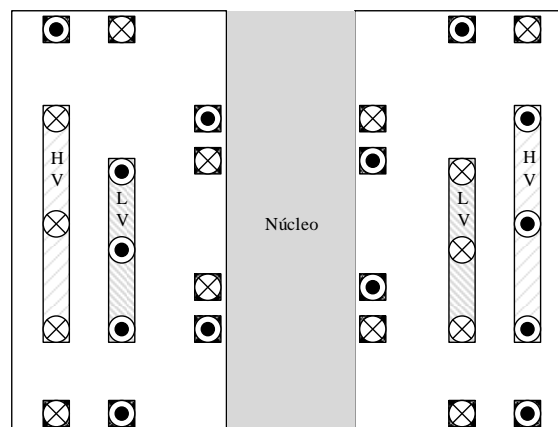
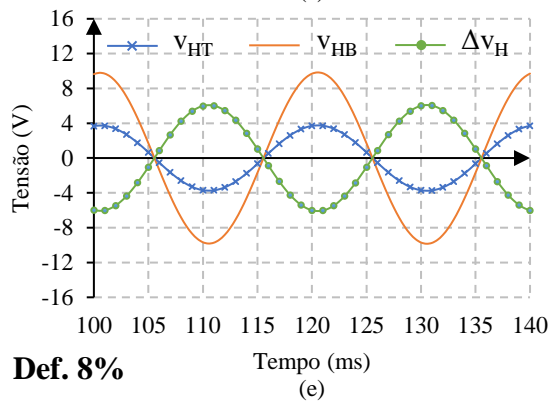
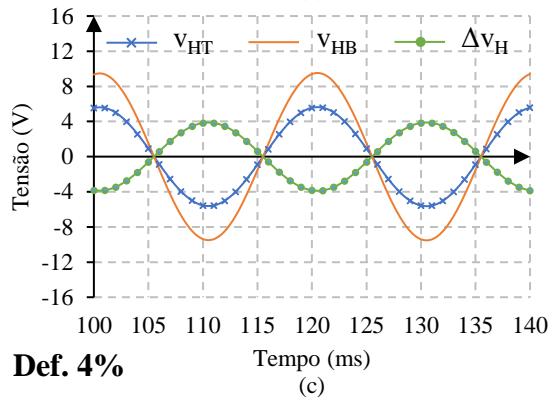
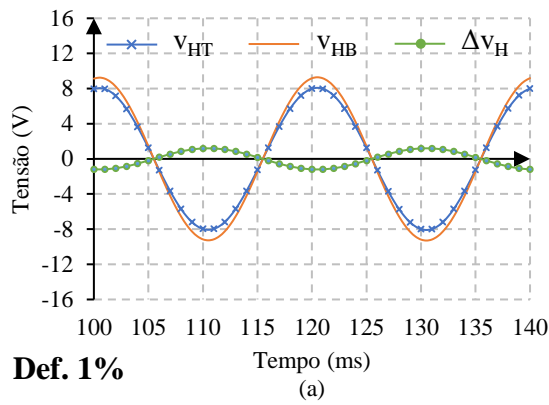


Figura 6.13 – Geometria utilizada no estudo de uma contração vertical assimétrica do enrolamento interno.

**Tensões induzidas nas BTH e MDTI**



**Tensões induzidas nas BTV e MDTI**

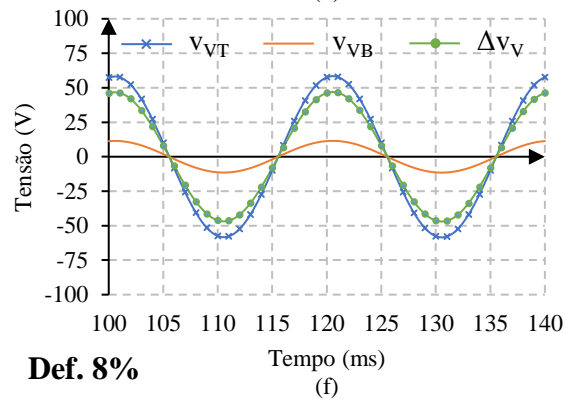
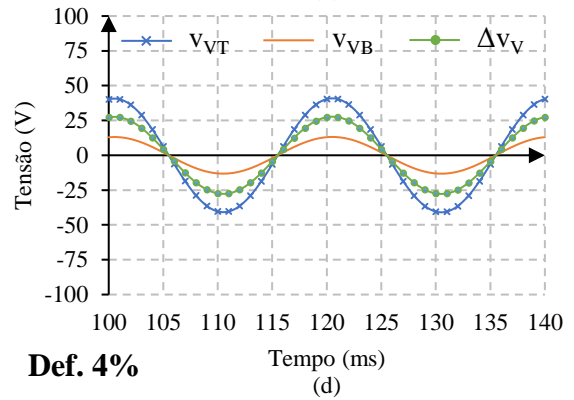
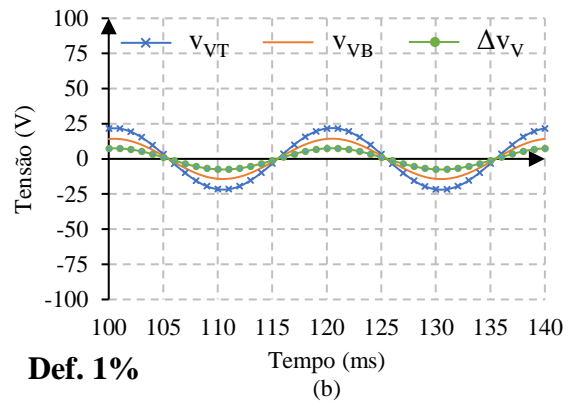


Figura 6.14 – Tensões induzidas nas BT's para uma contração vertical do enrolamento interno.

Tabela 6.7 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: contração vertical do enrolamento interno.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 1%	8,08	9,29	1,20	21,88	14,33	7,55
Def. 4%	5,63	9,52	3,89	40,90	13,17	27,73
Def. 8%	3,75	9,84	6,09	58,42	11,50	46,92

### 6.7 Deformação radial: alteração do diâmetro dos enrolamentos

A avaria estudada nesta secção verifica o comportamento do MDTI quando ocorre uma deformação radial nos enrolamentos. Neste caso específico simula-se o aumento do diâmetro do enrolamento interno, o que se traduz na redução do espaço entre os enrolamentos. A geometria que descreve esta deformação encontra-se na figura 6.15. A figura 6.16 ilustra os gráficos das tensões induzidas nas bobinas de teste horizontais e verticais e respetivos resultados do MDTI. Estes dados foram obtidos simulando diversas condições do defeito, onde se diminui o espaço entre os enrolamentos de 10%, 30% e 50% em relação à condição normal. Na tabela 6.8 apresentam-se os valores de pico dos gráficos da figura 6.16.

Tendo em conta os valores presentes na tabela 6.8 verifica-se que não é possível detetar o defeito com recurso ao MDTI, pois os valores são praticamente nulos. De notar que as alterações geométricas aqui simuladas são bastante reduzidas (na ordem dos milímetros). Apesar do MDTI resultar nulo verificam-se alterações nos valores de pico das bobinas de teste, podendo-se utilizar um método alternativo ou complementar o diagnóstico com leituras de outros equipamentos.

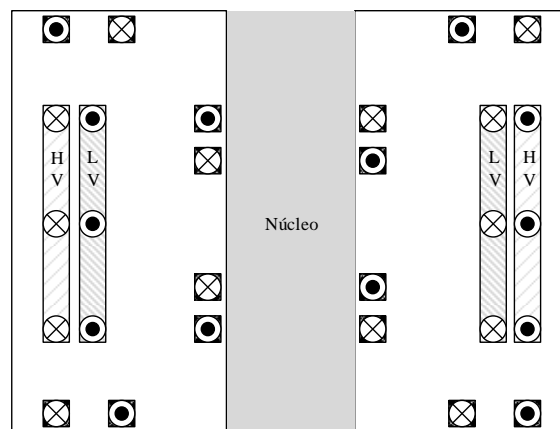


Figura 6.15 – Geometria utilizada no estudo de uma deformação radial: alteração do diâmetro dos enrolamentos.

Tabela 6.8 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: alteração do diâmetro dos enrolamentos.

Condição	$\hat{v}_{HT}$ (V)	$\hat{v}_{HB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_H$ (V)	$\hat{v}_{VT}$ (V)	$\hat{v}_{VB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_V$ (V)
Referência	9,21	9,21	$\approx 0$	14,70	14,70	$\approx 0$
Def. 10%	8,93	8,93	$\approx 0$	13,81	13,81	$\approx 0$
Def. 30%	8,29	8,29	$\approx 0$	12,10	12,10	$\approx 0$
Def. 50%	7,58	7,58	$\approx 0$	10,47	10,47	$\approx 0$

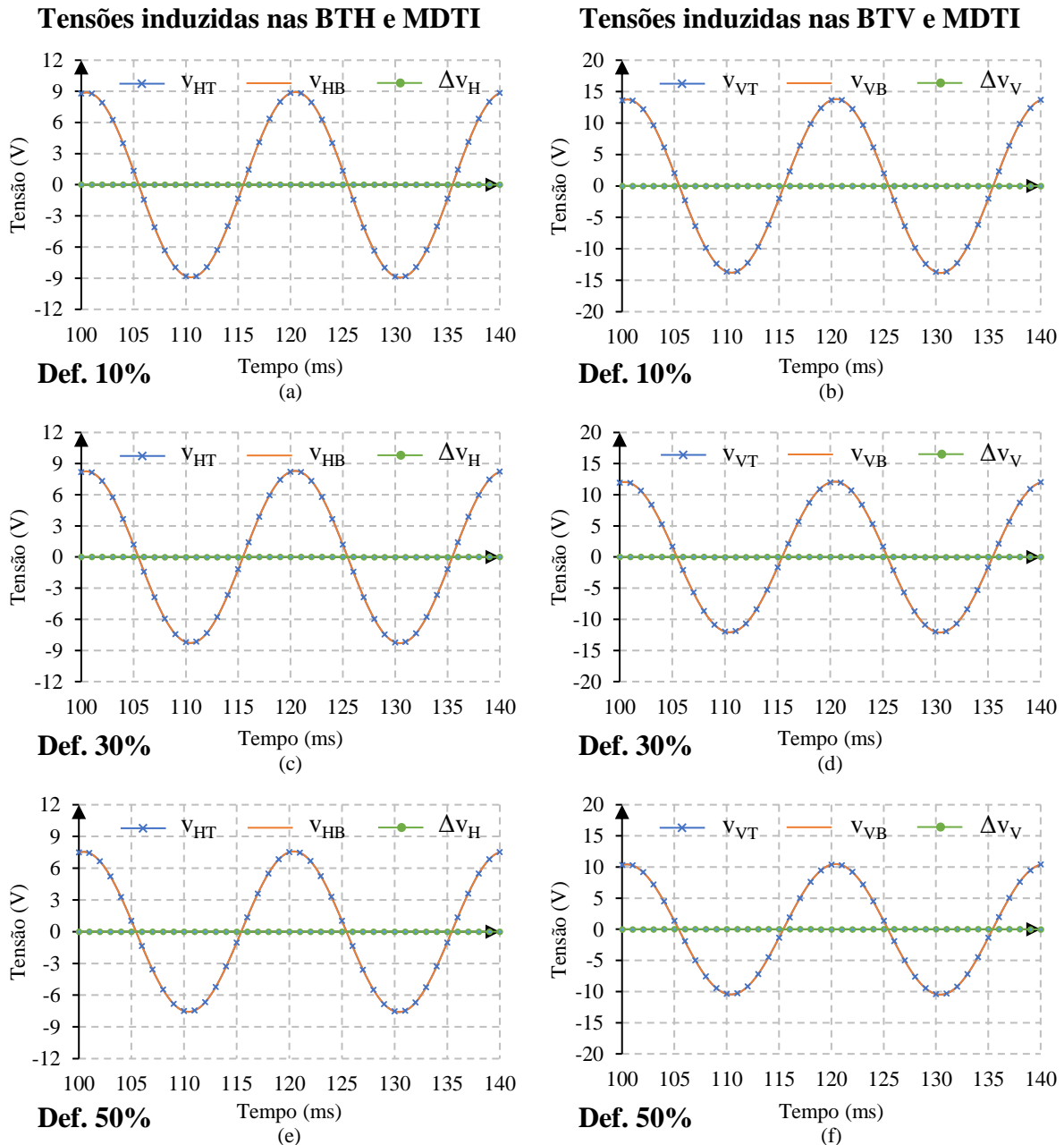


Figura 6.16 – Tensões induzidas nas BT's para uma alteração do diâmetro dos enrolamentos.

### 6.8 Influência da posição dos enrolamentos no transformador

Os enrolamentos dos transformadores podem não se encontram localizados simetricamente em relação núcleo. Considere-se por exemplo a situação onde os enrolamentos se encontram mais próximos da base. Esta localização assimétrica provoca uma alteração à distribuição do fluxo, principalmente do fluxo de fugas, pois a distância entre os enrolamentos e o núcleo é, na extremidade de topo, superior. Com o aumento desta distância existe um maior volume de ar onde as linhas de fluxo se podem fechar/dispersar. Em contrapartida, na parte inferior dos enrolamentos a distância é encurtada, originando uma redução do fluxo de fugas nessa zona, pois as linhas de fluxo tenderão a fechar-se essencialmente no núcleo

ferromagnético. Todos estes aspetos combinados podem tornar o MDTI inviável neste tipo de máquina, pelo que a análise deste caso é de grande importância. A geometria utilizada para a simulação desta situação encontra-se na figura 6.17. Os gráficos da figura 6.18 ilustram os resultados obtidos, complementados pelos seus valores de pico na tabela 6.9. De notar que este caso não contempla qualquer defeito, apenas a localização dos enrolamentos é alterada.

Pela análise do gráfico da figura 6.18(a) verifica-se que existe uma diferença considerável entre as ondas das tensões nas bobinas de teste horizontais. Este ensaio realizou-se sem qualquer defeito pelo que esta discrepância pode originar um falso diagnóstico. Daqui se conclui, sem mais demoras, que as bobinas de teste horizontais não devem ser utilizadas para diagnosticar defeitos em transformadores com enrolamentos assimétricos.

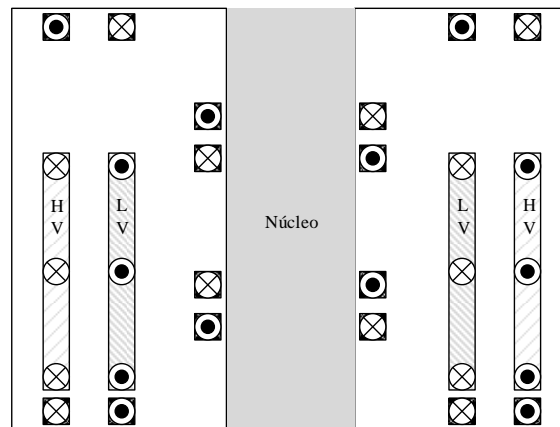


Figura 6.17 – Geometria utilizada no estudo da influência da posição dos enrolamentos no transformador.

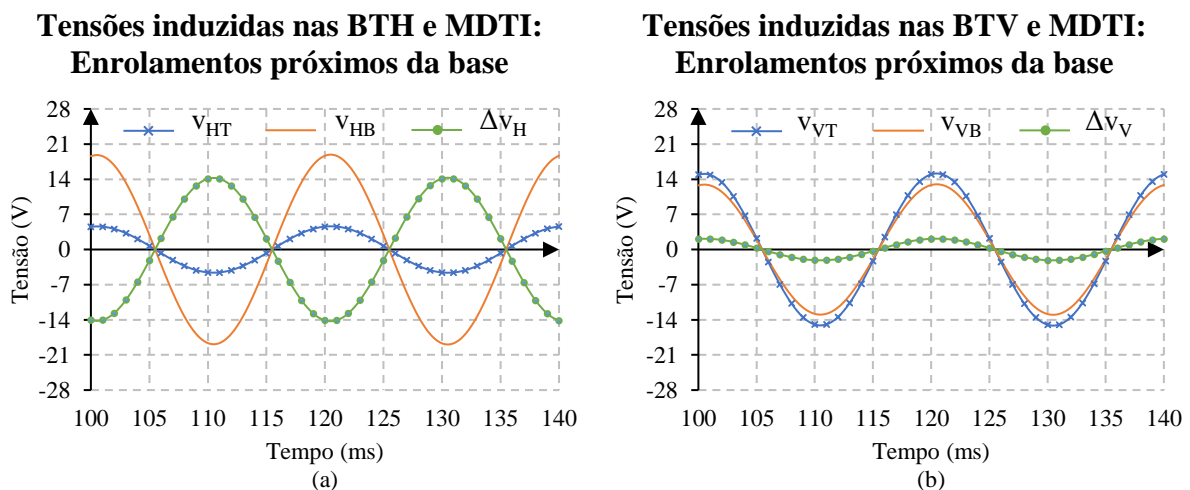


Figura 6.18 – Tensões induzidas nas BTH (a) e BTV (b) com os enrolamentos assimétricos mais próximos da base.

Tabela 6.9 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's: influência da posição dos enrolamentos.

Enrolamentos próximos da base	$\hat{v}_{HT}$	$\hat{v}_{HB}$	$\Delta\hat{v}_H$	$\hat{v}_{VT}$	$\hat{v}_{VB}$	$\Delta\hat{v}_V$
	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)
	4,62	18,90	14,29	15,14	12,99	2,15

No gráfico da figura 6.18(b) existe uma ligeira diferença entre as ondas das tensões das bobinas de teste verticais. Com recurso à tabela 6.9 verifica-se que a diferença é de apenas 2,15 V, que constitui um valor inferior a grande parte dos ensaios conduzidos até este ponto. Este desvio pode ser ultrapassado definindo um valor de referência a partir do qual se considere que existe um defeito. Esse valor será configurável e eventualmente distinto de transformador para transformador. Conclui-se então que a utilização de bobinas de teste verticais e o MDTI são viáveis em transformadores com enrolamentos assimétricos, mediante a definição de uma margem de segurança.

## **6.9 Síntese**

Em termos gerais conclui-se que o melhor equipamento de teste são as bobinas de teste verticais. Além de apresentarem constantemente valores de pico superiores, permitem detetar defeitos numa fase mais precoce que as bobinas de teste horizontais. Podem ainda ser utilizadas em máquinas com enrolamentos assimétricos, mediante a definição de uma margem de segurança. Verifica-se também que defeitos com algum tipo de simetria são de difícil deteção pois provocam alterações semelhantes nas bobinas de teste superior e inferior.

## Capítulo 7 – Modelo do transformador trifásico

Para o caso trifásico optou-se por modelar um transformador de 31.5 MVA, alimentado à tensão nominal (132 kV) numa configuração YNyn0 e fornecendo energia a uma carga próxima da nominal. Devido aos resultados obtidos no modelo monofásico optou-se por colocar apenas bobinas de teste verticais neste modelo. As suas características e parâmetros nominais são idênticos aos descritos e utilizados no modelo monofásico. As dimensões e geometria do transformador apresentam-se na figura 7.1.

### 7.1 Funcionamento em regime nominal

O funcionamento do transformador trifásico, efetuando uma análise por fase, é semelhante ao funcionamento de um transformador monofásico. De modo a evitar a repetição de resultados não serão apresentados os gráficos das tensões e correntes nominais bem como não se realizará a análise comparativa dos fluxos que abraçam os enrolamentos e as bobinas de teste (estudo apresentado no capítulo 4). Este modelo surge apenas para analisar o desempenho do MDTI no caso de um transformador trifásico. O MDTI em transformadores trifásicos requer um par de bobinas de teste por fase, bobinas de teste na fase A (BTFA), bobinas de teste na fase B (BTFB) e bobinas de teste na fase C (BTFC), por forma a permitir a monitorização das três fases individualmente. Esta monitorização irá fornecer informação suficiente para, após o tratamento dos dados, indicar qual a fase que se encontra com defeito. O esquema elétrico utilizado na situação de referência encontra-se expresso na figura 7.2. Os resultados obtidos das tensões induzidas nas bobinas de teste e do MDTI apresentam-se nos gráficos da figura 7.3. A informação presente nestes gráficos é complementada pelos valores de pico correspondentes apresentados na tabela 7.1.

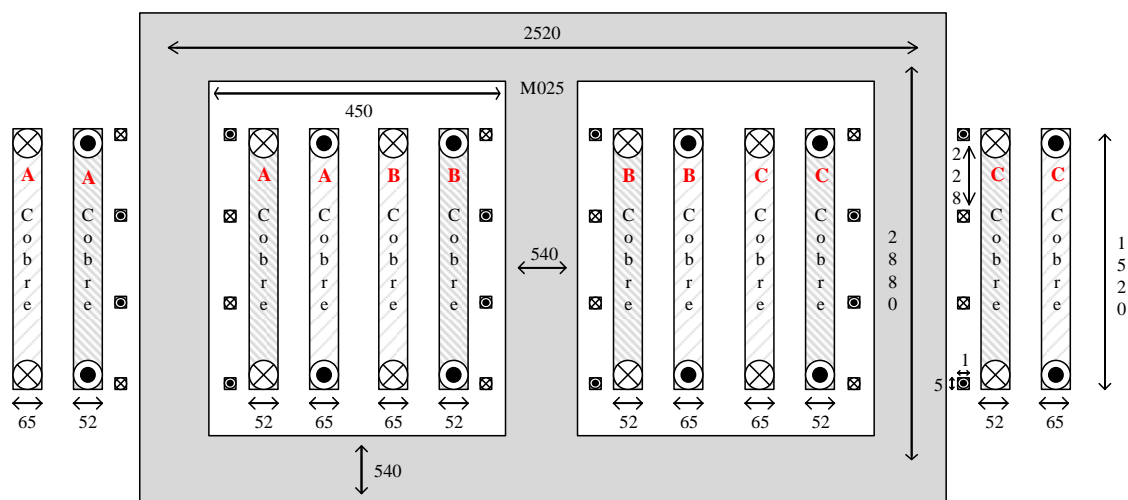


Figura 7.1 – Dimensões e geometria utilizadas na modelação do transformador trifásico (em mm).

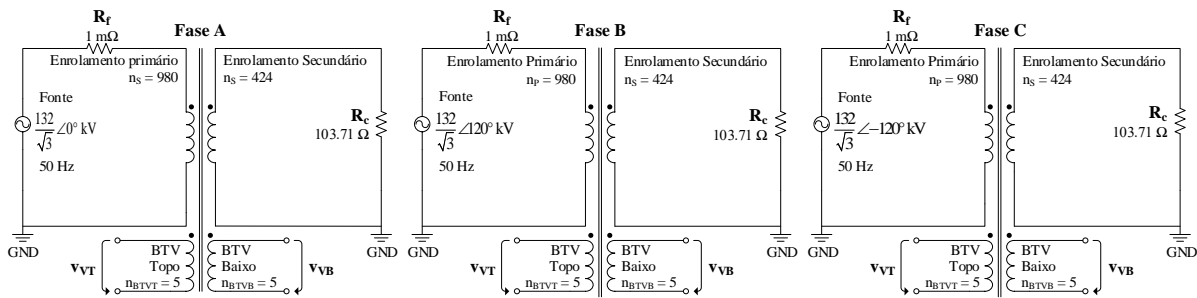


Figura 7.2 – Esquema elétrico do transformador trifásico em regime nominal.

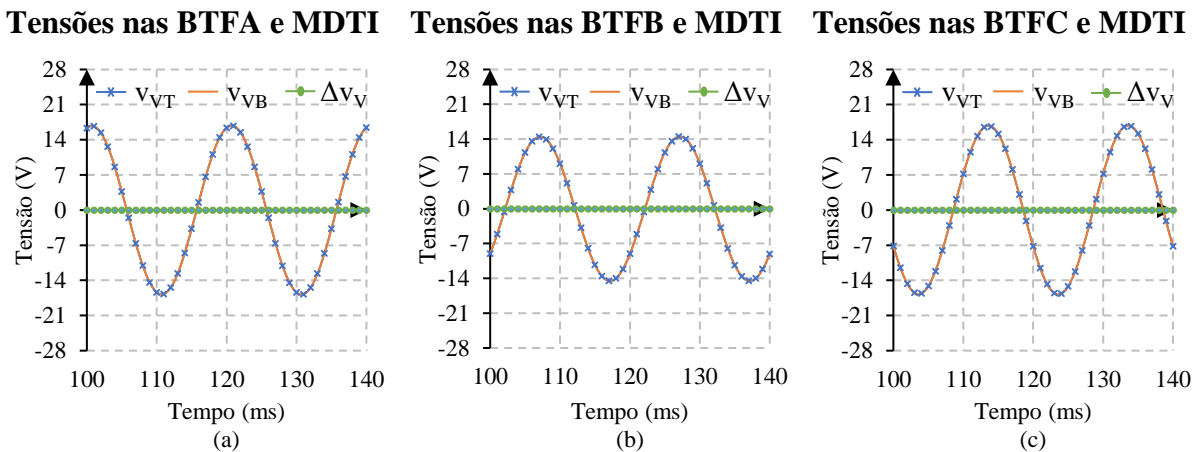


Figura 7.3 – Tensões induzidas de referência nas bobinas de teste: (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Tabela 7.1 – Valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste do modelo trifásico de referência.

$\hat{v}_{AT}$ (V)	$\hat{v}_{AB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_A$ (V)	$\hat{v}_{BT}$ (V)	$\hat{v}_{BB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_B$ (V)	$\hat{v}_{CT}$ (V)	$\hat{v}_{CB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_C$ (V)
16,78	16,78	$\approx 0$	14,49	14,49	$\approx 0$	16,82	16,84	$\approx 0$

Onde:

- $\hat{v}_{AB}$  representa o valor de pico da tensão induzida na BTFA inferior (V);
- $\hat{v}_{AT}$  representa o valor de pico da tensão induzida na BTFA superior (V);
- $\hat{v}_{BB}$  representa o valor de pico da tensão induzida na BTFB inferior (V);
- $\hat{v}_{BT}$  representa o valor de pico da tensão induzida na BTFB superior (V);
- $\hat{v}_{CB}$  representa o valor de pico da tensão induzida na BTFC inferior (V);
- $\hat{v}_{CT}$  representa o valor de pico da tensão induzida na BTFC superior (V);
- $\Delta\hat{v}_A$  representa o valor de pico resultante da aplicação do MDTI na fase A (V);
- $\Delta\hat{v}_B$  representa o valor de pico resultante da aplicação do MDTI na fase B (V);
- $\Delta\hat{v}_C$  representa o valor de pico resultante da aplicação do MDTI na fase C (V).

O valor de pico da tensão induzida nas bobinas de teste na fase B é ligeiramente inferior em relação às restantes fases, esta diminuição deve-se sobretudo à distribuição das linhas de fluxo na coluna central. A fase B encontra-se no centro do transformador e do circuito

magnético, onde existe um menor fluxo de fugas, originando um menor valor de tensão induzida. Nas colunas laterais (fases A e C) existe um maior fluxo de fugas pois o fluxo terá maior tendência a fechar-se pelo ar e não pelo circuito magnético, originando valores de pico da tensão induzida nas bobinas de teste um pouco superiores. Em relação aos valores obtidos no MDTI verifica-se que são próximos de zero nas três fases. Estes dados evitam assim efetuar uma comparação com valores padrão pois a referência do MDTI é nula.

Os defeitos analisados no modelo trifásico baseiam-se nas conclusões retiradas no modelo monofásico, o que se traduz numa análise mais breve e sucinta e com um menor número de casos estudados. O primeiro cenário é a ocorrência de um curto-circuito entre espiras na zona E do enrolamento primário da fase A (a designação das zonas do enrolamento primário é semelhante à utilizada no modelo monofásico - figura 5.1). De seguida apresenta-se o caso de um defeito localizado na zona E do enrolamento primário da fase B. Após a análise dos curtos-circuitos são estudadas duas deformações nos enrolamentos: alongamento vertical do enrolamento primário nas fases A e B.

## 7.2 Curto-circuito no enrolamento primário: Fase A – Zona E

Na análise do modelo trifásico o enrolamento primário é o de tensão mais elevada e o de maior diâmetro (enrolamento externo). A influência da severidade do defeito (nº de espiras em curto-circuito) foi também considerada no estudo. As bobinas de teste verticais são constituídas por cinco espiras e a sua altura corresponde a cerca de 15% da altura dos enrolamentos.

O curto-circuito entre espiras, situado na zona E do enrolamento primário da fase A, simulou-se tendo por base o esquema elétrico apresentado na figura 7.4. Nesta configuração e de modo a simular diversos níveis do defeito a resistência de curto-circuito ( $R_{cc}$ ) foi-se ajustando mediante o número de espiras afetadas segundo os valores presentes na tabela 7.2. Os resultados obtidos das tensões induzidas nas bobinas de teste e do MDTI nos diversos cenários apresentam-se nos gráficos da figura 7.5. A informação presente nestes gráficos é complementada pelos valores de pico correspondentes apresentados na tabela 7.3.

Tabela 7.2 – Tabela com os valores da resistência de defeito ( $R_{cc}$ ).

Defeito	$R_{cc}$ ( $\Omega$ )
1% → 10 espiras	1,84
5% → 49 espiras	8,50
10% → 98 espiras	15,80

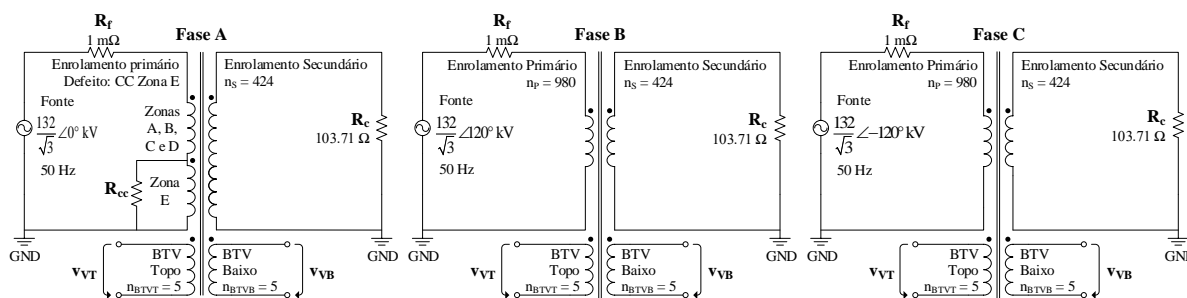


Figura 7.4 – Esquema utilizado na modelação do transformador trifásico para um CC na zona E da fase A.

Tabela 7.3 – Valores de pico das tensões induzidas no modelo trifásico: CC no enrolamento primário da fase A – zona E.

Condição	$\hat{v}_{AT}$ (V)	$\hat{v}_{AB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_A$ (V)	$\hat{v}_{BT}$ (V)	$\hat{v}_{BB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_B$ (V)	$\hat{v}_{CT}$ (V)	$\hat{v}_{CB}$ (V)	$\Delta\hat{v}_C$ (V)
Referência	16,78	16,78	$\approx 0$	14,49	14,49	$\approx 0$	16,82	16,84	$\approx 0$
CC 1%	16,78	8,55	8,33	14,77	13,00	4,17	16,78	16,75	0,07
CC 5%	16,78	20,18	36,91	15,83	17,35	19,61	16,59	16,36	0,34
CC 10%	16,80	41,28	57,56	16,92	29,42	35,31	16,42	15,91	0,64

Constata-se que quando o defeito afeta 1% do enrolamento, o valor de pico da tensão induzida da bobina de teste superior da fase A é maior que o valor de pico da bobina de teste inferior dessa mesma fase. Quando a avaria atinge os 5% do enrolamento existe uma inversão, e a bobina de teste inferior da fase A passa a possuir valores de pico superiores. Existe também uma alteração significativa em termos de desfasamento das tensões induzidas nas bobinas de teste da fase A para as condições de defeito de 1% e 5%. De notar que o defeito em estudo se encontra mais próximo da bobina de teste inferior. Quando o defeito se encontra numa fase inicial, as alterações a nível de distribuição de fluxo por ele provocadas provocam a redução do fluxo que atravessa a bobina de teste mais próxima, neste caso a bobina de teste inferior. A progressão da avaria origina a inversão da tensão induzida na bobina de teste inferior e provoca o aumento do seu valor de pico (maior fluxo a atravessar a bobina). Na fase B este desfasamento também se faz sentir pois a bobina de teste inferior presente nesta fase é influenciada pelo fluxo de fugas com origem nas fases A e B. Na fase C não se verificam alterações significativas das ondas das tensões induzidas nas bobinas de teste em relação à situação de referência.

Ao aplicar o MDTI verifica-se que um defeito na fase A é detetado pelas bobinas de teste dessa mesma fase e pelas bobinas de teste da fase B. Deste modo pode-se concluir que um defeito numa fase pode influenciar os valores da tensão induzida nas bobinas de teste das fases adjacentes. Outro aspeto fundamental é a sensibilidade dos aparelhos de teste que permitem a identificação do defeito quando este se encontra numa fase bastante inicial (a partir de 1%).

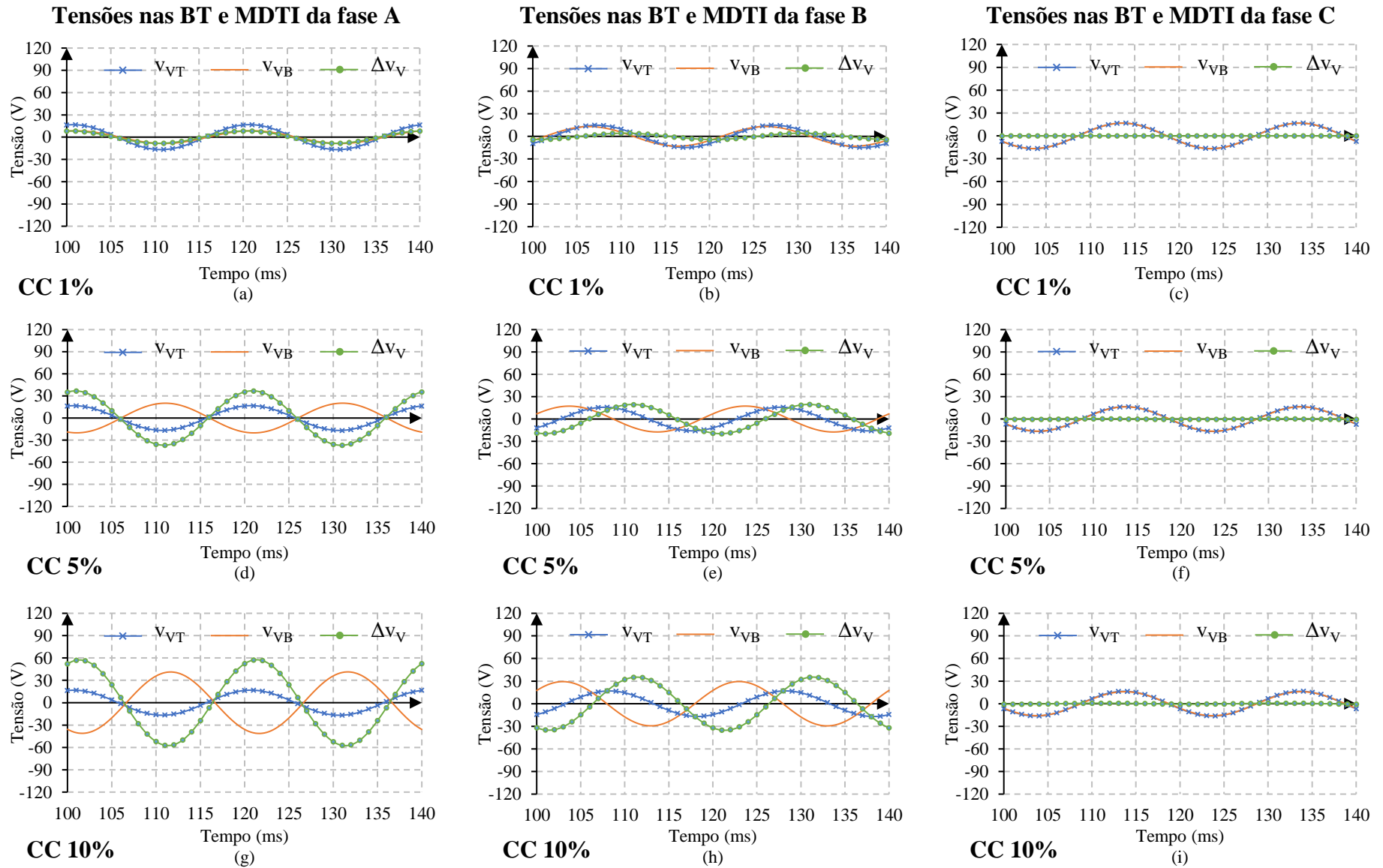


Figura 7.5 – Resultados obtidos para um CC no enrolamento primário da fase A.

### 7.3 Curto-circuito no enrolamento primário: Fase B – Zona E

O curto-circuito entre espiras situado na zona E do enrolamento primário da fase B simulou-se tendo por base o esquema elétrico apresentado na figura 7.6. Nesta configuração e de modo a simular diversos defeitos a resistência de curto-circuito ( $R_{cc}$ ) foi-se ajustando mediante o número de espiras afetadas segundo os valores presentes na tabela 7.2 (semelhante à secção 7.2). Os resultados obtidos das tensões induzidas nas bobinas de teste e do MDTI nos diversos cenários apresentam-se nos gráficos da figura 7.7. A informação presente nestes gráficos é complementada pelos valores de pico correspondentes expressos na tabela 7.4.

Da análise dos resultados da figura 7.7 e tabela 7.4 pode-se concluir que o MDTI permite detetar espiras em curto-circuito na fase B, à semelhança do caso anteriormente apresentado para a fase A. A diferença mais significativa entre estes dois casos deve-se à localização do defeito na posição central, simétrica em termos do circuito magnético, pelo que as tensões induzidas nas bobinas de teste nas fases A e C são também afetadas. O MDTI permite sinalizar o defeito numa fase bastante inicial (a partir de 1%) podendo ser utilizado na identificação de avarias com estas características e neste tipo de máquinas. Permite ainda identificar a severidade da avaria, pois a amplitude das tensões induzidas aumenta com a progressão do defeito. A fase em defeito é também detetada pois a fase afetada apresenta maiores valores de  $\Delta v_V$ .

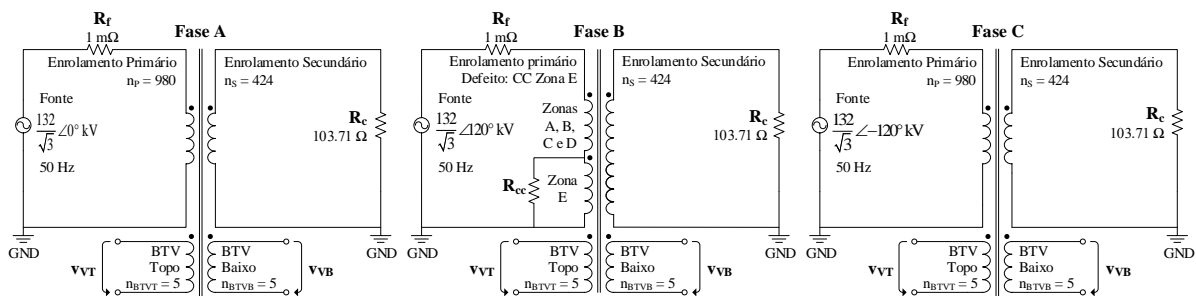


Figura 7.6 – Esquema utilizado na modelação do transformador trifásico para um CC na zona E da fase B.

Tabela 7.4 – Valores de pico das tensões induzidas no modelo trifásico: CC no enrolamento primário da fase B – zona E.

Condição	$\hat{V}_{AT}$ (V)	$\hat{V}_{AB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_A$ (V)	$\hat{V}_{BT}$ (V)	$\hat{V}_{BB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_B$ (V)	$\hat{V}_{CT}$ (V)	$\hat{V}_{CB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_C$ (V)
Referência	16,78	16,78	$\approx 0$	14,49	14,49	$\approx 0$	16,82	16,84	$\approx 0$
CC 1%	17,06	15,60	4,15	15,36	3,99	11,37	17,06	15,57	4,15
CC 5%	18,66	14,90	19,19	18,76	32,33	50,68	17,81	20,05	19,19
CC 10%	21,44	19,20	33,63	22,72	59,98	81,74	18,20	31,35	33,62

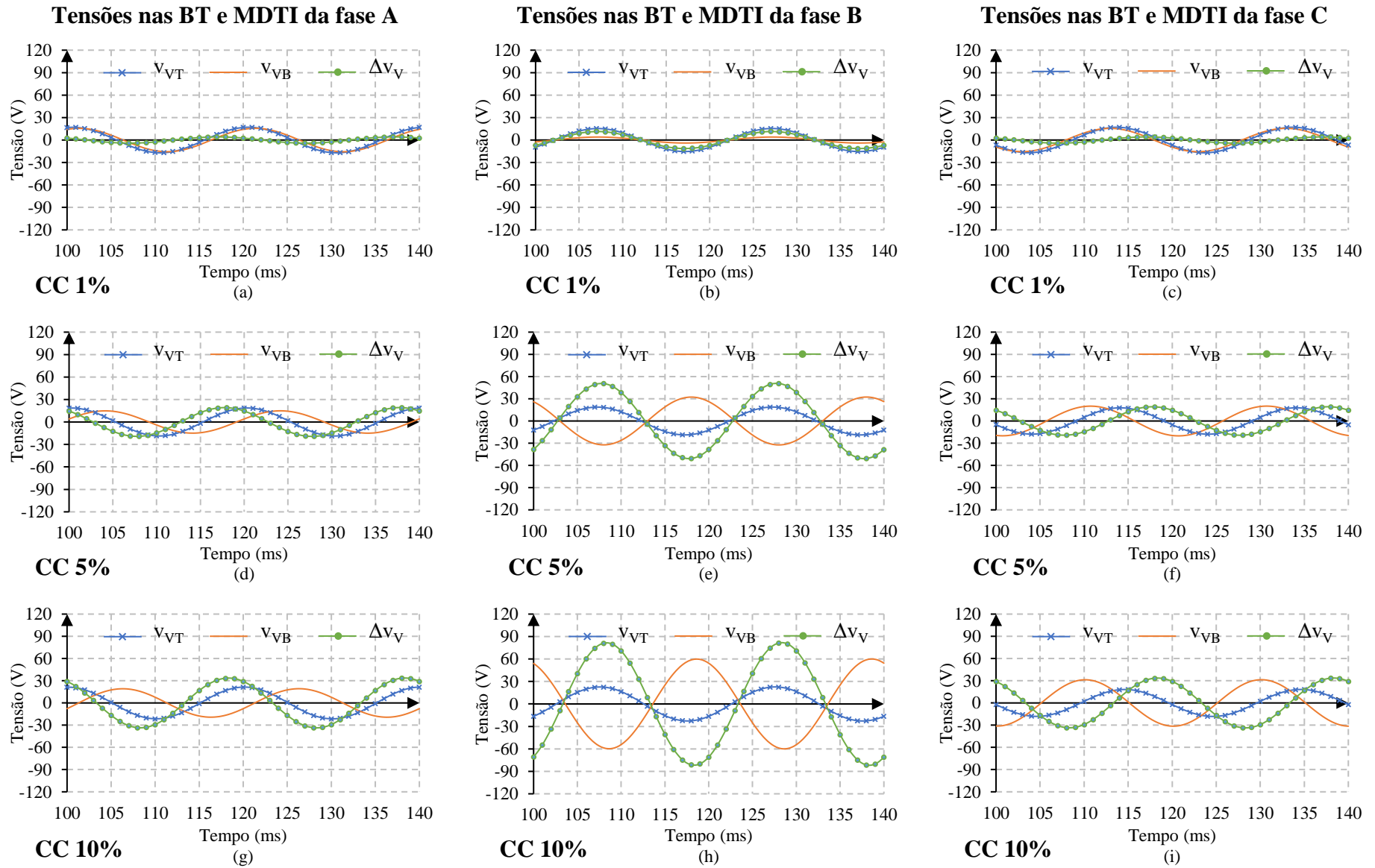


Figura 7.7 – Resultados obtidos para um CC no enrolamento primário da fase B.

A ocorrência de um curto-circuito entre espiras no enrolamento da fase C provoca um efeito idêntico àquele analisado anteriormente para a fase A, não sendo apresentado

### 7.4 Alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior: Fase A

O alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior da fase A simulou-se tendo por base a geometria do transformador apresentada na figura 7.8. O esquema elétrico não sofreu alterações em relação à situação de referência, permanecendo idêntico ao indicado na figura 7.2. Os resultados obtidos das tensões induzidas nas bobinas de teste e do MDTI nos diversos cenários apresentam-se nos gráficos da figura 7.9. A informação presente nestes gráficos é complementada pelos valores de pico correspondentes expressos na tabela 7.5.

O alongamento do enrolamento externo da fase A provoca alterações nas tensões induzidas nas bobinas de teste da fase A, e com menor intensidade, da fase B. Na fase C não se verificam alterações significativas. O MDTI permite identificar este tipo de deformações nos enrolamentos ainda numa fase inicial (1%).

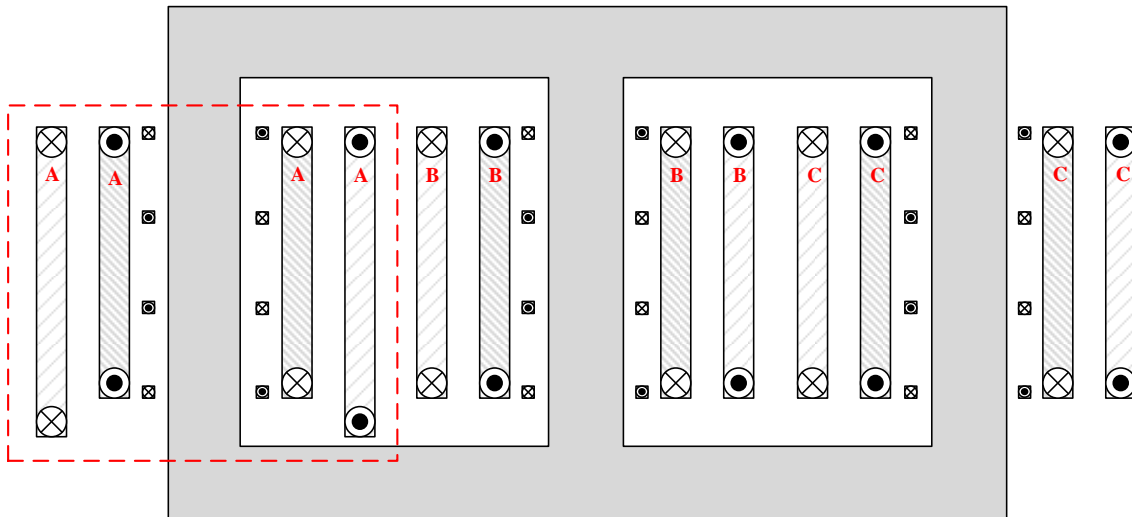


Figura 7.8 – Modelo trifásico para estudo do alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior: Fase A.

Tabela 7.5 – Valores de pico das tensões induzidas nas BT's no modelo trifásico: alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior da fase A.

Condição	$\hat{V}_{AT}$ (V)	$\hat{V}_{AB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_A$ (V)	$\hat{V}_{BT}$ (V)	$\hat{V}_{BB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_B$ (V)	$\hat{V}_{CT}$ (V)	$\hat{V}_{CB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_C$ (V)
Referência	16,78	16,78	$\approx 0$	14,49	14,49	$\approx 0$	16,82	16,84	$\approx 0$
CC 1%	16,78	19,53	2,76	14,41	15,11	1,36	16,84	16,85	0,02
CC 4%	16,83	28,00	11,19	14,18	17,37	5,49	16,86	16,91	0,09
CC 8%	17,01	39,03	22,04	13,89	20,91	10,91	16,83	16,95	0,19

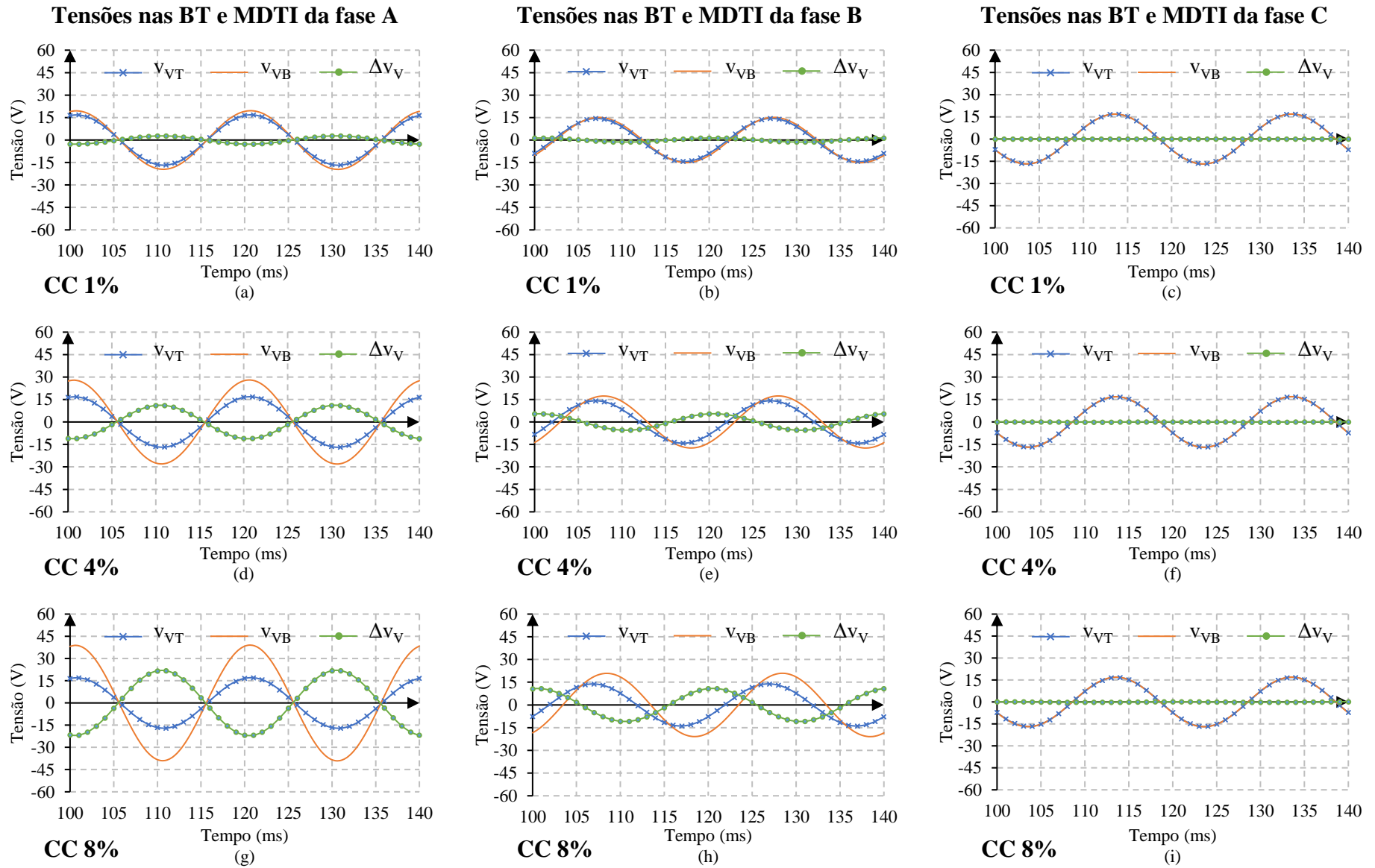


Figura 7.9 – Resultados obtidos para uma assimetria na fase A: alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.

### 7.5 Alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior: Fase B

O alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior da fase B simulou-se tendo por base a geometria do transformador apresentada na figura 7.10. O esquema elétrico não sofreu alterações em relação à situação de referência, permanecendo idêntico ao indicado na figura 7.2. Os resultados obtidos das tensões induzidas nas bobinas de teste e do MDTI nos diversos cenários apresentam-se nos gráficos da figura 7.11. A informação presente nestes gráficos é complementada pelos valores de pico correspondentes expressos na tabela 7.6.

Pela análise da tabela 7.6 e gráficos da figura 7.11 verifica-se uma alteração nos valores de pico das tensões induzidas nas diversas bobinas de teste, em todas as fases, em relação à situação de referência. O MDTI permite identificar este tipo de anomalias em máquinas com estas características numa fase precoce do defeito (1% do enrolamento). Os restantes resultados e conclusões são semelhantes aos obtidos na secção 7.3, salvo os valores de pico das tensões induzidas nas diversas bobinas de teste, pelo que não serão novamente referidos.

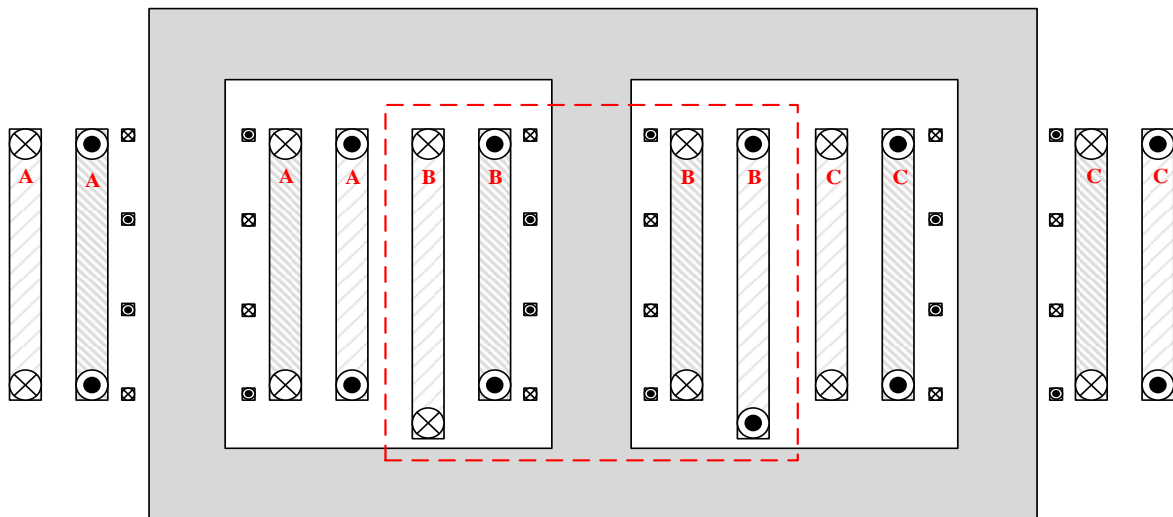


Figura 7.10 – Modelo trifásico para o estudo do alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior na fase B.

Tabela 7.6 – Valores de pico das tensões induzidas no modelo trifásico: alongamento assimétrico vertical do enrolamento exterior da fase B.

Condição	$\hat{V}_{AT}$ (V)	$\hat{V}_{AB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_A$ (V)	$\hat{V}_{BT}$ (V)	$\hat{V}_{BB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_B$ (V)	$\hat{V}_{CT}$ (V)	$\hat{V}_{CB}$ (V)	$\Delta\hat{V}_C$ (V)
<b>Referência</b>	16,78	16,78	$\approx 0$	14,49	14,49	$\approx 0$	16,82	16,84	$\approx 0$
<b>CC 1%</b>	16,69	17,36	1,36	14,21	17,98	3,77	16,75	17,34	1,36
<b>CC 4%</b>	16,46	19,40	5,50	13,42	28,65	15,24	16,51	19,32	5,49
<b>CC 8%</b>	16,12	22,51	10,86	12,48	42,51	30,05	16,16	22,35	10,87

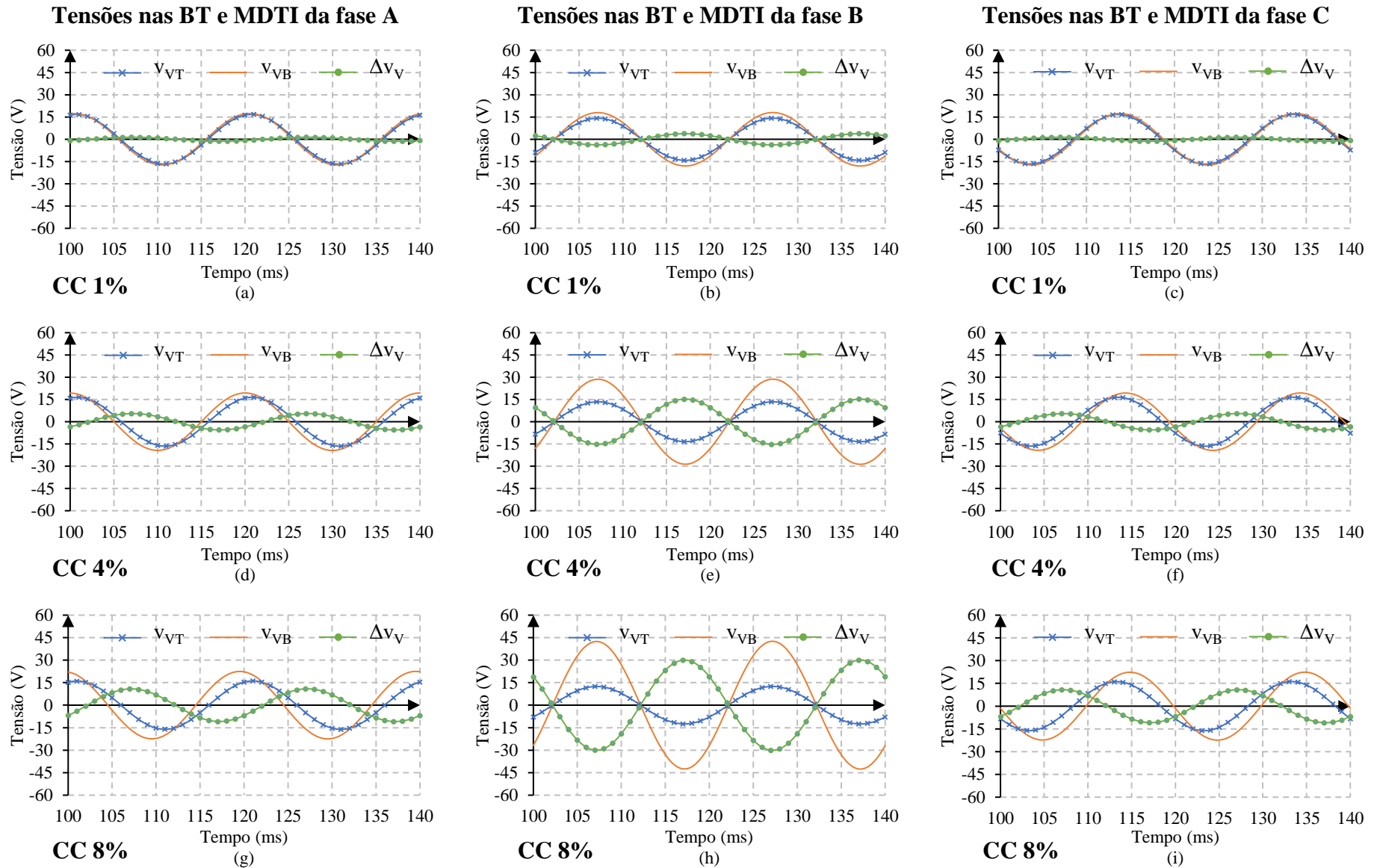


Figura 7.11 – Resultados obtidos para uma assimetria na fase B: alongamento vertical assimétrico do enrolamento externo.

## 7.6 Síntese

Uma análise global ao modelo trifásico permite concluir que os resultados são bastante próximos do caso monofásico, se efetuada uma análise por fase. Conclui-se também que um defeito numa fase pode influenciar as tensões induzidas nas bobinas de teste das restantes fases. A existência de diversas bobinas de teste na mesma máquina aumenta a complexidade do MDTI. Apesar da análise se tornar mais complexa, os valores obtidos em grande parte das simulações permitem retirar conclusões claras sendo possível identificar a anomalia numa fase bastante inicial. Em suma, o MDTI permite detetar curtos-circuitos e deformações nos enrolamentos em transformadores trifásicos, identificar a fase em defeito e caracterizar a severidade da avaria.

## Capítulo 8 – Resultados experimentais

Foram realizados ensaios laboratoriais para validar os resultados das simulações apresentadas anteriormente. Utilizou-se um transformador já existente no laboratório, propositadamente construído para analisar a ocorrência de defeitos nos seus enrolamentos, permitindo introduzir curtos-circuitos entre espiras e assimetrias geométricas entre as bobinas [21].

Foi utilizada a placa PCI-6070E da National Instruments para efetuar a aquisição digital dos sinais de tensão e corrente no transformador. A placa foi controlada através de uma aplicação em ambiente Labview. Para a medição dos sinais de tensão foi utilizado um sistema baseado em amplificadores de isolamento. Para a medição das correntes foram utilizadas pinças de corrente A622 da Tektronix. Os sinais adquiridos foram posteriormente tratados e filtrados (em ambiente Matlab) para minorar o efeito do ruído.

### 8.1 Características do transformador laboratorial

O protótipo laboratorial consiste num transformador monofásico de 2 enrolamentos com as características apresentadas na tabela 8.1. O aspeto, a geometria e as dimensões do transformador são apresentados na figura 8.1. O núcleo ferromagnético foi reaproveitado de outros transformadores usados/danificados, tendo sido necessário adaptar/redimensionar e justapor as chapas ferromagnéticas. Adicionalmente, o circuito magnético é desmontável, para possibilitar ajustar a posição dos enrolamentos e das bobinas de teste.

Tabela 8.1 – Características do transformador utilizado em laboratório.

S (VA)	$V_P = V_S$ (V)	$I_P = I_S$ (A)	$n_P = n_S$
450	45	10	166

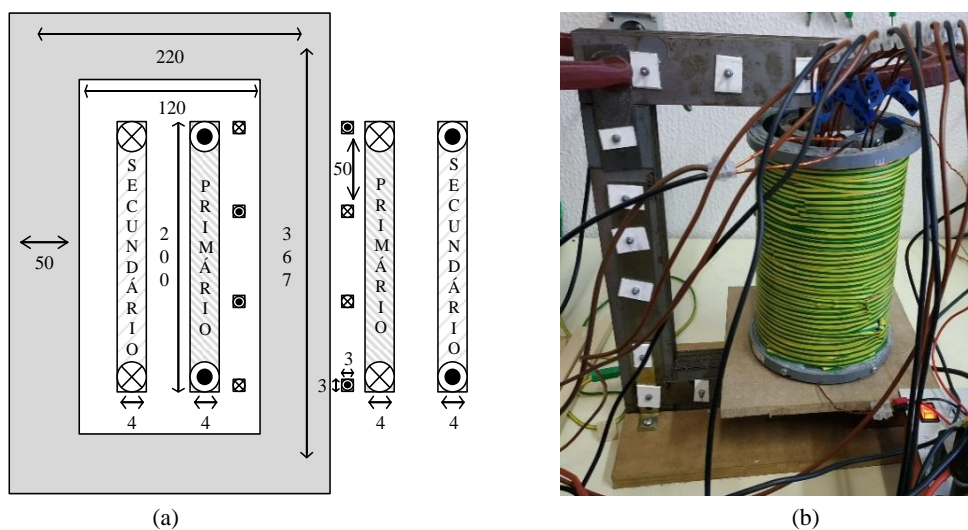


Figura 8.1 – Aspeto, geometria e dimensões do transformador laboratorial e BT's (dimensões em mm).

A conjugação destas 2 situações (justaposição imperfeita de chapas magnéticas e núcleo desmontável) introduz entreferros parasitas no circuito magnético, que por sua vez provocam dispersão do fluxo. Para evitar que esta dispersão afete as tensões induzidas nas bobinas de teste optou-se por realizar os ensaios em curto-circuito, pois nesta condição o fluxo no núcleo é reduzido. Nos ensaios laboratoriais foram incluídas apenas bobinas de teste verticais. O esquema elétrico encontra-se apresentado na figura 8.2.

### 8.2 Ensaio com condições de funcionamento sem defeito

Os resultados laboratoriais obtidos para a condição de funcionamento sem defeito (ensaio em curto-circuito convencional) são apresentados nas figuras 8.3(b), 8.3(d) e 8.3(f). Nas figuras 8.3(a) 8.3(c) e 8.3(e) apresentam-se os correspondentes resultados da simulação computacional. Verifica-se que os resultados experimentais e de simulação estão em razoável concordância. No entanto, as tensões induzidas nas bobinas de teste nos resultados experimentais possuem amplitudes ligeiramente superiores aos correspondentes resultados de simulação. Esta situação explica-se pelas imperfeições do circuito magnético real, que não são consideradas no modelo computacional, e que provocam uma maior dispersão do fluxo. Além disso, as correntes nos enrolamentos nos resultados experimentais são cerca de 5% a 7% superiores aos valores calculados, o que provoca também mais linhas de fluxo e, conseqüentemente, maiores valores de tensão induzida. A comparação entre os valores de pico das tensões induzidas é apresentada na tabela 8.2, podendo considerar-se aceitável o erro entre os valores medidos e simulados. Os resultados experimentais demonstram que para a condição de funcionamento normal a diferença entre as tensões induzidas nas bobinas de teste resulta num valor reduzido.

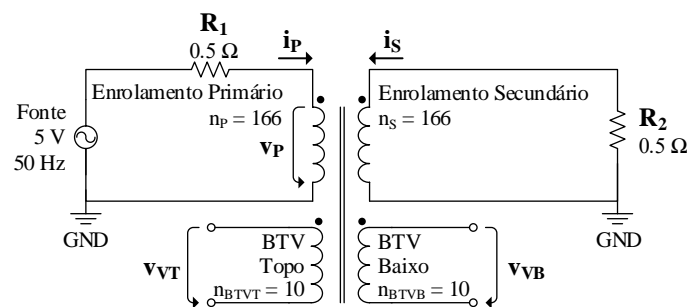


Figura 8.2 – Esquema do transformador utilizado em laboratório nas suas condições normais de funcionamento.

Tabela 8.2 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's: funcionamento nominal.

Dados	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta\hat{v}_V$ (mV)
Simulação	7,04	6,93	45,14	45,15	$\approx 0$
Laboratório	7,58	7,33	55,89	55,27	6,88
Erro %	+7,67	+5,77	+23,81	+22,41	-

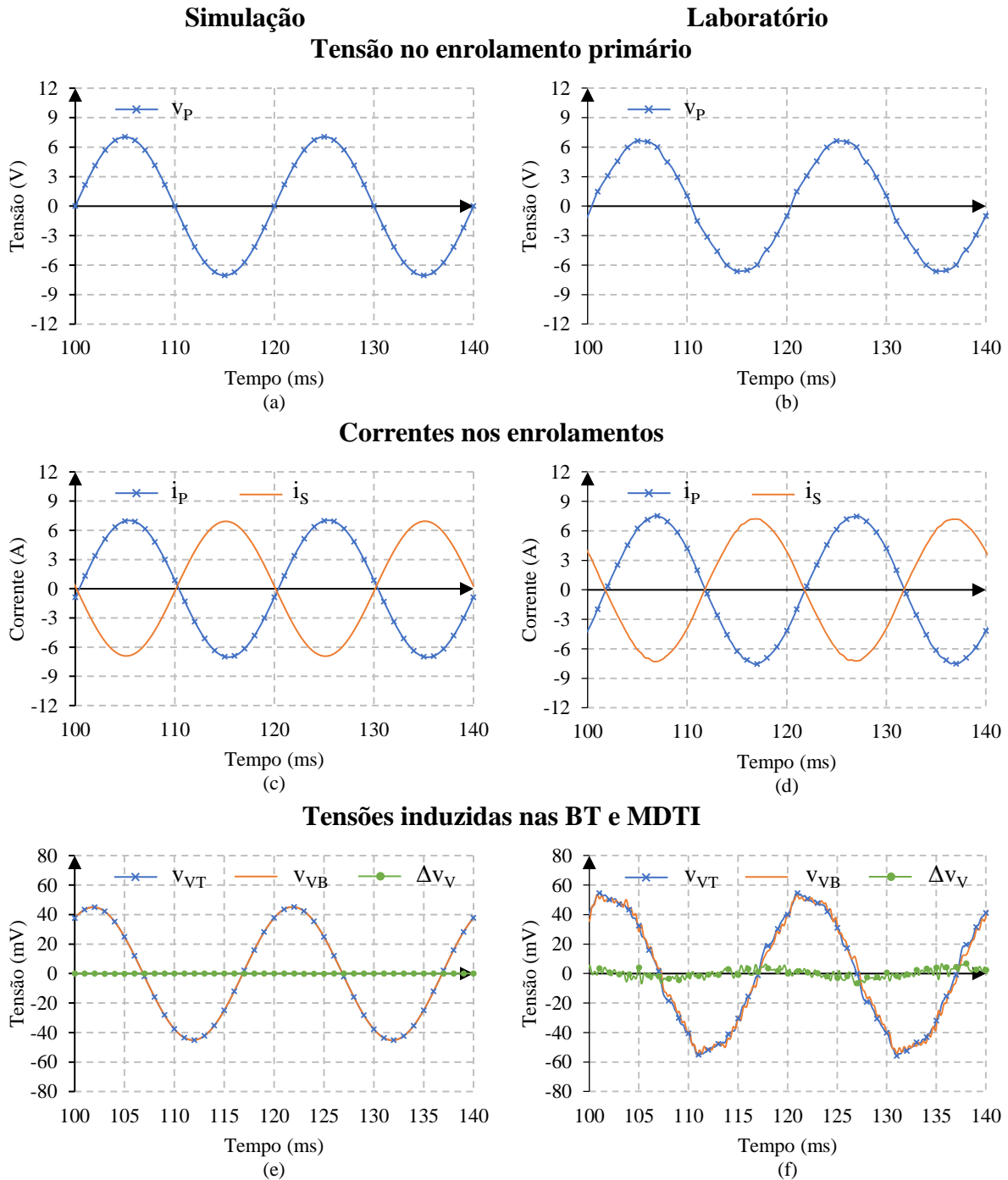


Figura 8.3 – Resultados do caso de referência.

### 8.3 CC na zona superior do primário com enrolamentos simétricos

Como referido anteriormente, optou-se por realizar os ensaios laboratoriais em curto-circuito, para minimizar a influência das imperfeições do circuito magnético. No entanto, quando se pretende analisar a ocorrência de defeitos de isolamento, é necessário garantir que a distribuição do fluxo de fugas no ensaio em curto-circuito seja representativa da condição de funcionamento em carga. Esta condição é obtida realizando um ensaio em curto-circuito não-convencional [22], que garante que as correntes nos enrolamentos têm o mesmo padrão do

ensaio em carga na presença de espiras com defeitos de isolamento. O esquema do ensaio em curto-circuito não convencional é ilustrado na figura 8.4. A geometria é idêntica à apresentada na figura 8.1 Os gráficos da figura 8.5 apresentam as formas de onda das tensões e correntes nos enrolamentos, assim como as tensões obtidas nas bobinas de teste e respetivo MDTI. Verifica-se que a corrente nas espiras afetadas pelo defeito ( $n_{cc}$  na figura 8.4) está em oposição de fase com a corrente no primário  $i_p$  (espiras alimentadas pela fonte, correspondentes à parcela do enrolamento primário sem defeito), situação idêntica àquela que ocorre no ensaio em carga, para condições de defeito incipiente (caso analisado anteriormente na figura 5.3). Pode assim dizer-se que o sentido das correntes nos enrolamentos no ensaio em curto-circuito não-convencional tem as mesmas características das do ensaio em carga na presença de um defeito entre espiras.

A comparação entre os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste e correntes nos enrolamentos é apresentada na tabela 8.3. Da análise desta tabela e da figura 8.5 conclui-se que, de um modo geral, os resultados experimentais coincidem com os resultados obtidos por simulação. O método de diagnóstico proposto consegue identificar o defeito, à semelhança dos resultados de simulação apresentados anteriormente.

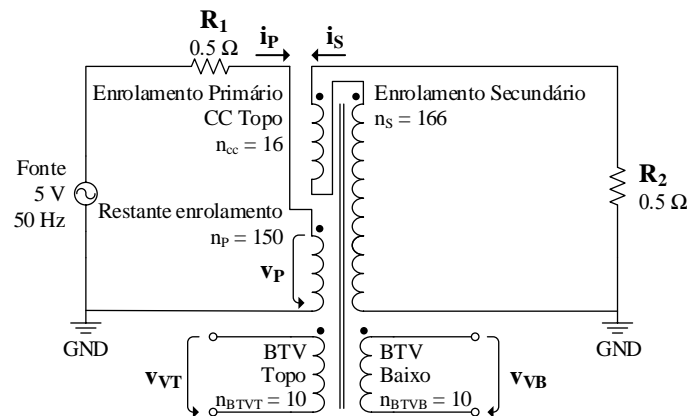


Figura 8.4 – Esquema utilizado na modelação do transformador utilizado em laboratório com a existência de um CC no topo do enrolamento primário.

Tabela 8.3 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona superior do enrolamento primário e com os enrolamentos simétricos.

Dados	$\hat{I}_p$ (A)	$\hat{I}_s$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta\hat{v}_V$ (mV)
<b>Simulação</b>	8,33	6,79	157,95	46,96	113,19
<b>Laboratório</b>	7,94	6,38	138,89	50,41	93,34
<b>Erro %</b>	-4,20	-6,04	-12,07	+7,35	-17,54

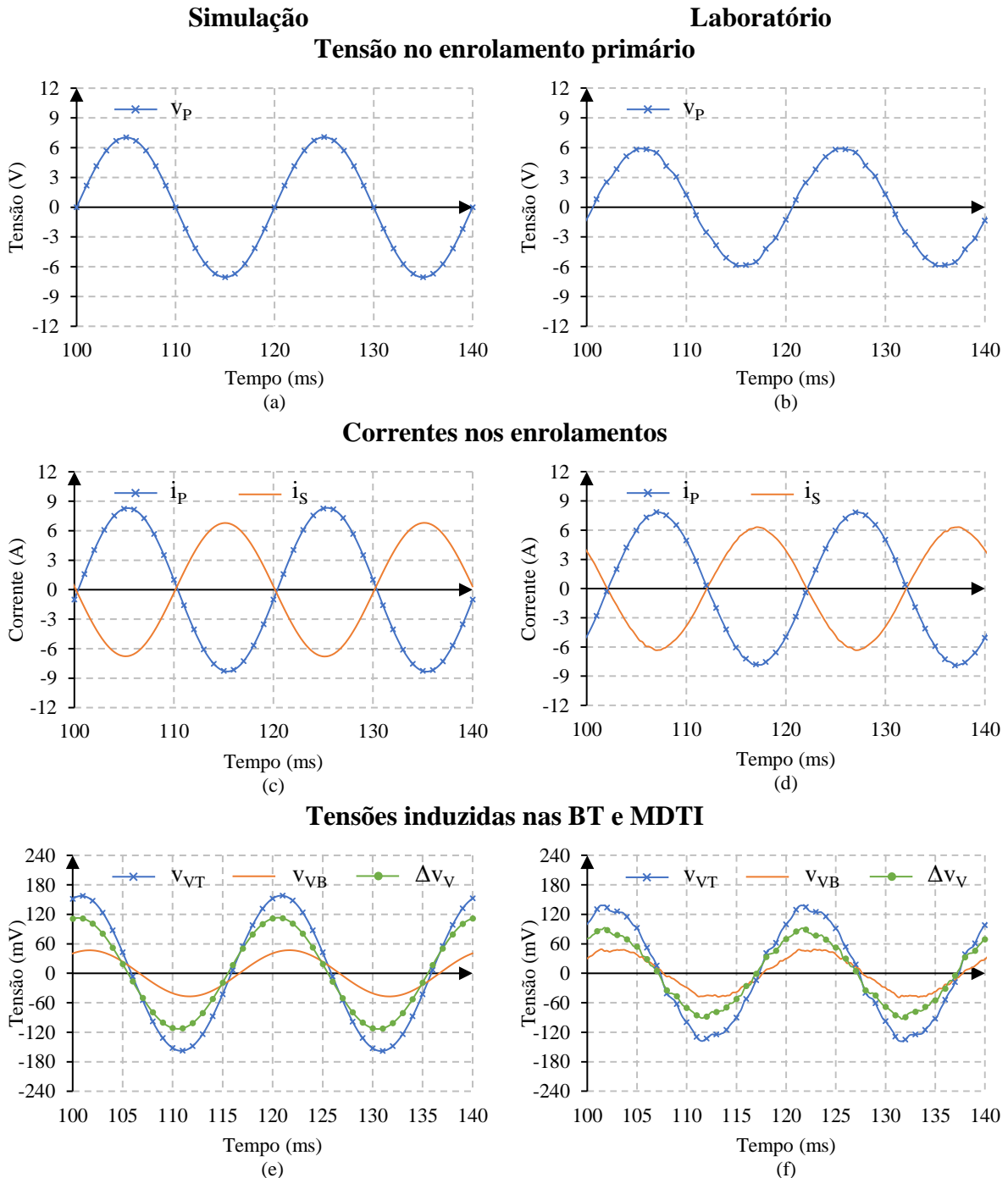


Figura 8.5 – Resultados do caso com CC na zona superior do enrolamento primário e enrolamentos simétricos.

### 8.4 CC na zona central do primário com enrolamentos simétricos

Este caso pretende estudar os efeitos causados por um CC no centro do enrolamento primário quando os enrolamentos se situam simétricos em relação ao núcleo. O esquema elétrico utilizado é apresentado na figura 8.6. Os gráficos da figura 8.7 apresentam as formas de onda das tensões e correntes nominais, assim como as tensões obtidas nas bobinas de teste e respetivo MDTI. A geometria é idêntica à apresentada na figura 8.1. A comparação entre os

valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste e correntes nos enrolamentos é apresentada na tabela 8.4.

De modo geral, os resultados obtidos em laboratório estão em concordância com os resultados teóricos obtidos nas simulações. Apesar do defeito ser simétrico as assimetrias naturais do transformador real provocam o aparecimento de um sinal de  $\Delta v_V$  com amplitude não nula. Em todo o caso, neste tipo de defeitos o MDTI pode não se revelar fiável.

### 8.5 CC na zona inferior do primário com enrolamentos simétricos

Este ensaio pretende analisar as alterações provocadas pela ocorrência de um CC na parte inferior do enrolamento primário quando os enrolamentos se situam simétricos em relação ao núcleo. O esquema elétrico utilizado é apresentado na figura 8.8. A geometria é idêntica à apresentada na figura 8.1.

Os gráficos da figura 8.9 apresentam as formas de onda das tensões e correntes nominais, assim como as tensões obtidas nas bobinas de teste e respetivo MDTI. A comparação entre os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste e correntes nos enrolamentos é apresentada na tabela 8.5.

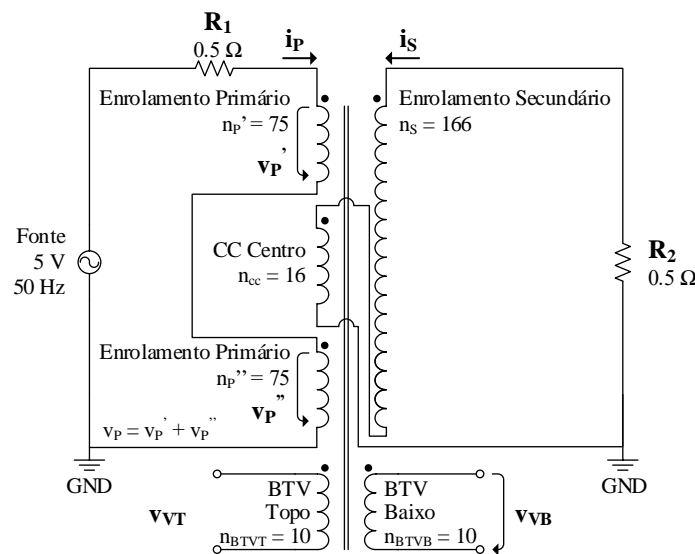


Figura 8.6 – Esquema do transformador utilizado em laboratório com CC no centro do enrolamento primário.

Tabela 8.4 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona central do enrolamento primário e com os enrolamentos simétricos.

Dados	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta \hat{v}_V$ (mV)
Simulação	8,38	6,81	26,22	26,23	$\approx 0$
Laboratório	7,61	6,06	38,91	38,03	19,52
Erro %	-9,19	-11,01	+48,40	+44,99	-

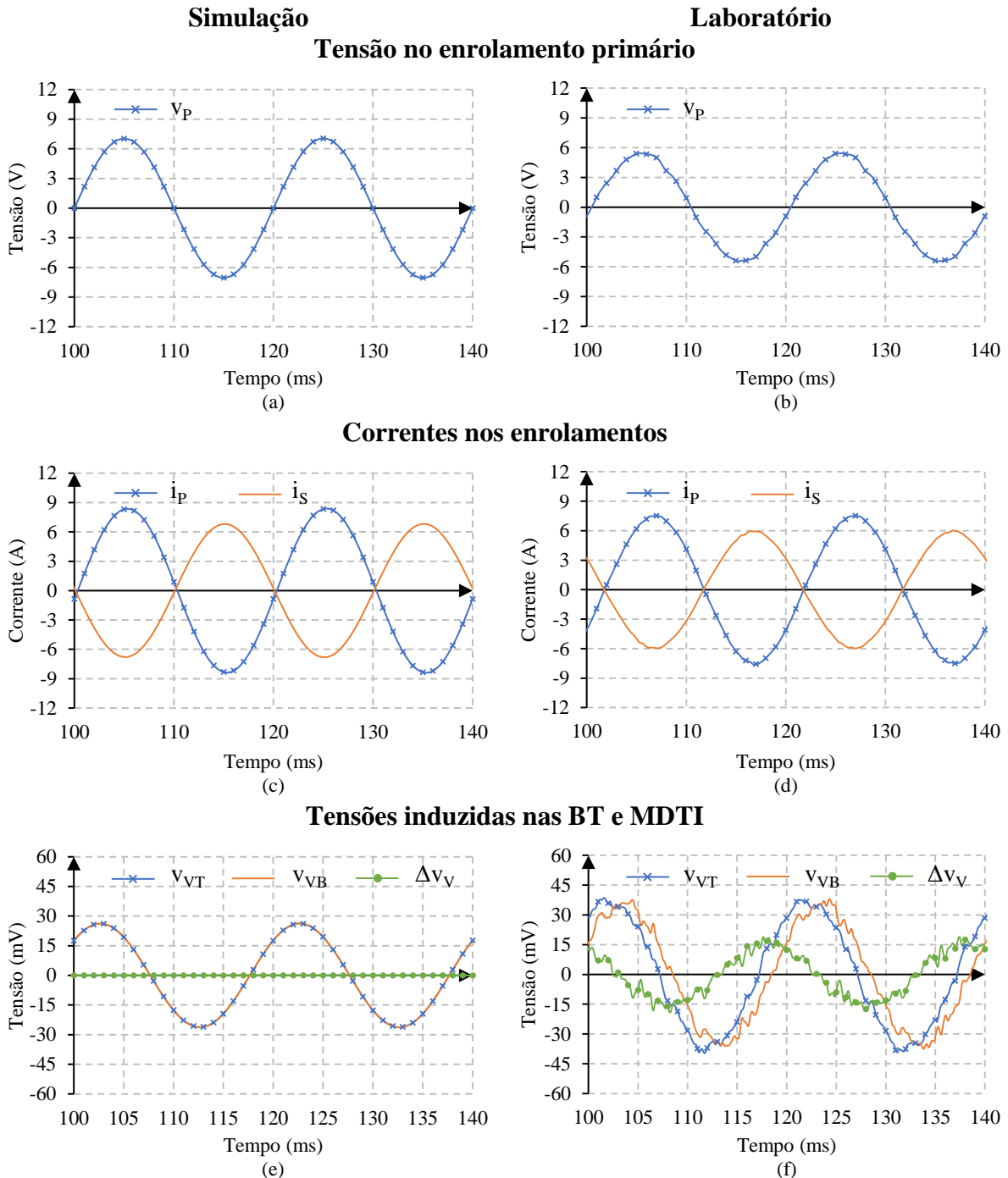


Figura 8.7 – Resultados do caso com CC na zona central do enrolamento primário e enrolamentos simétricos.

Este ensaio revelou-se simétrico ao CC na zona superior do enrolamento primário com os enrolamentos simétricos. A principal diferença é a localização do defeito e a troca de valores entre as bobinas de teste superior e inferior. Neste caso, a bobina de teste que apresenta os valores de pico mais elevados é a bobina de teste localizada na parte inferior do enrolamento primário (mais próxima do defeito). No geral, os resultados obtidos em laboratório estão em concordância com os resultados teóricos obtidos nas simulações. Conclui-se assim que este tipo de defeitos pode ser identificado pelo MDTI.

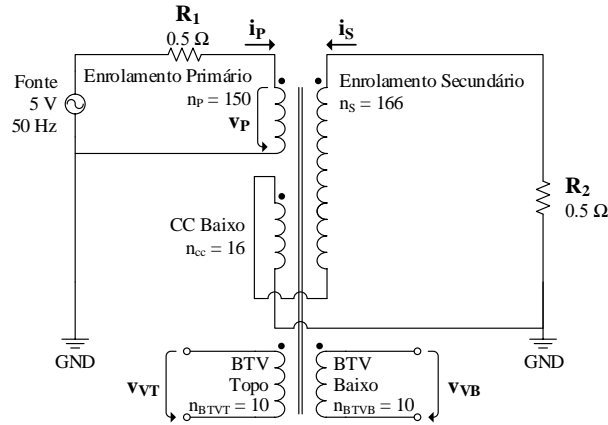


Figura 8.8 – Esquema do transformador laboratorial com CC na zona inferior do enrolamento primário.

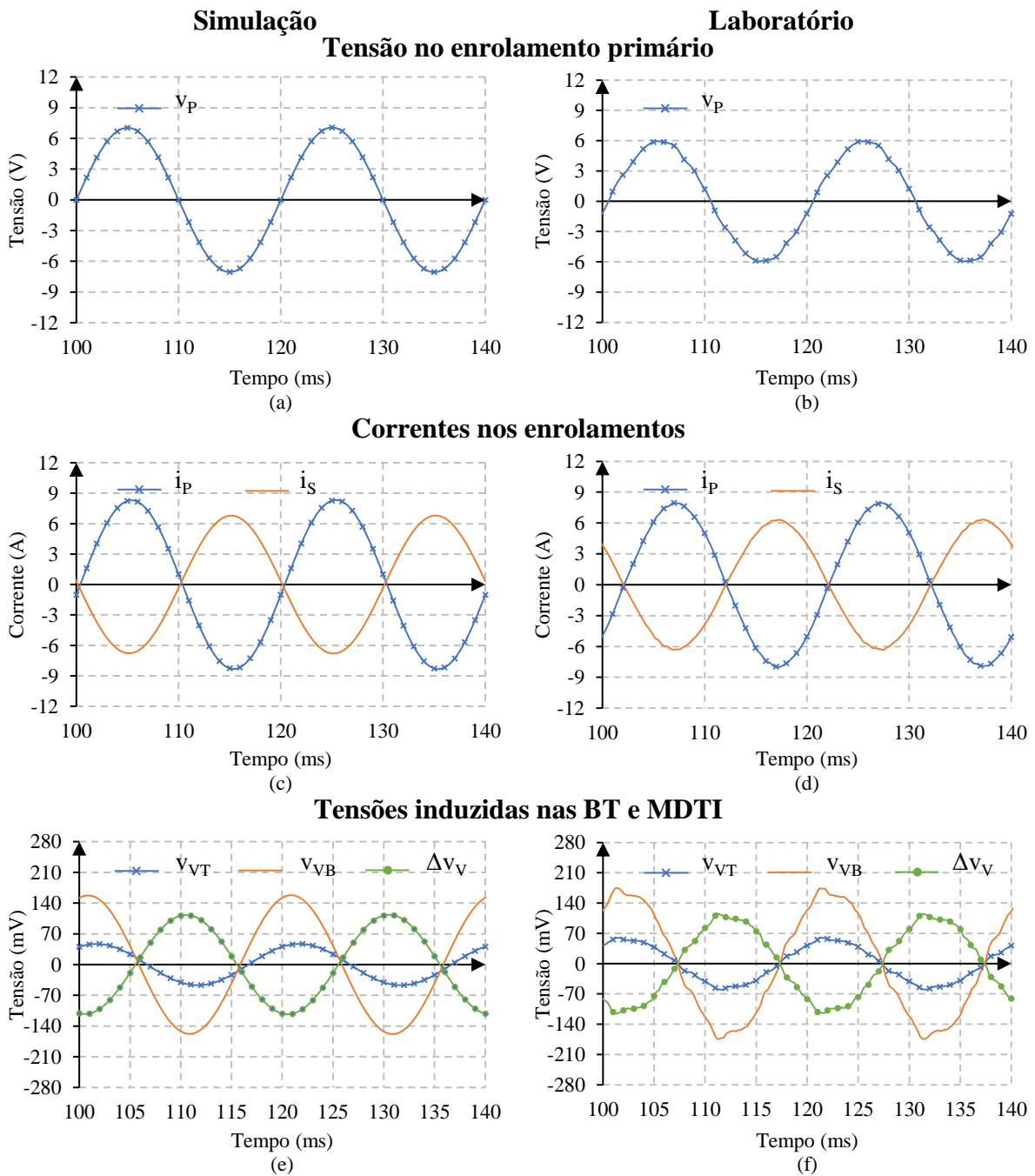


Figura 8.9 – Resultados do caso com CC na zona inferior do enrolamento primário e enrolamentos simétricos.

Tabela 8.5 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona inferior do enrolamento primário e com os enrolamentos simétricos.

Dados	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta\hat{v}_V$ (mV)
Simulação	8,33	6,79	46,96	157,95	113,31
Laboratório	8,01	6,37	60,96	176,93	116,91
Erro %	-3,84	-6,19	+29,81	+12,02	+3,18

### 8.6 Deformação – Deslocamento ascendente do enrolamento externo

Este ensaio pretende analisar as alterações provocadas pelo deslocamento ascendente do enrolamento externo. A geometria utilizada para analisar esta deformação apresenta-se na figura 8.10. Como o objetivo é analisar apenas a influência do deslocamento dos enrolamentos, o esquema elétrico manteve-se idêntico ao apresentado na figura 8.2 (referência). Os gráficos da figura 8.11 apresentam as formas de onda das tensões e correntes nominais, assim como as tensões obtidas nas bobinas de teste e respetivo MDTI. A comparação entre os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste e correntes nos enrolamentos é apresentada na tabela 8.6.

Verifica-se que, na generalidade, os resultados experimentais e de simulação se encontram em concordância. O MDTI permite identificar este tipo de defeitos.

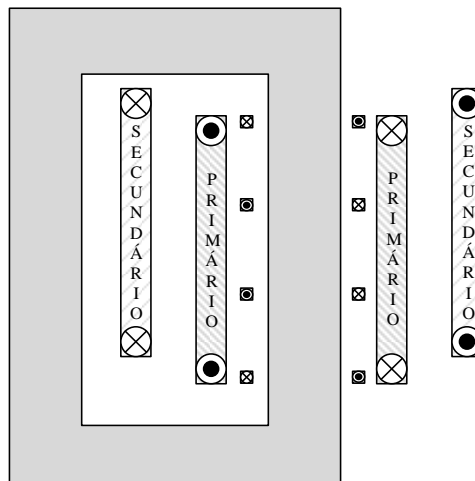


Figura 8.10 – Geometria representativa da deformação em estudo: Deslocamento ascendente do enrolamento externo.

Tabela 8.6 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um deslocamento ascendente do enrolamento externo.

Dados	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta\hat{v}_V$ (mV)
Simulação	7,02	6,89	98,85	20,65	92,83
Laboratório	7,85	7,58	99,88	26,97	79,96
Erro %	+11,82	+10,01	+1,04	+30,61	-13,86

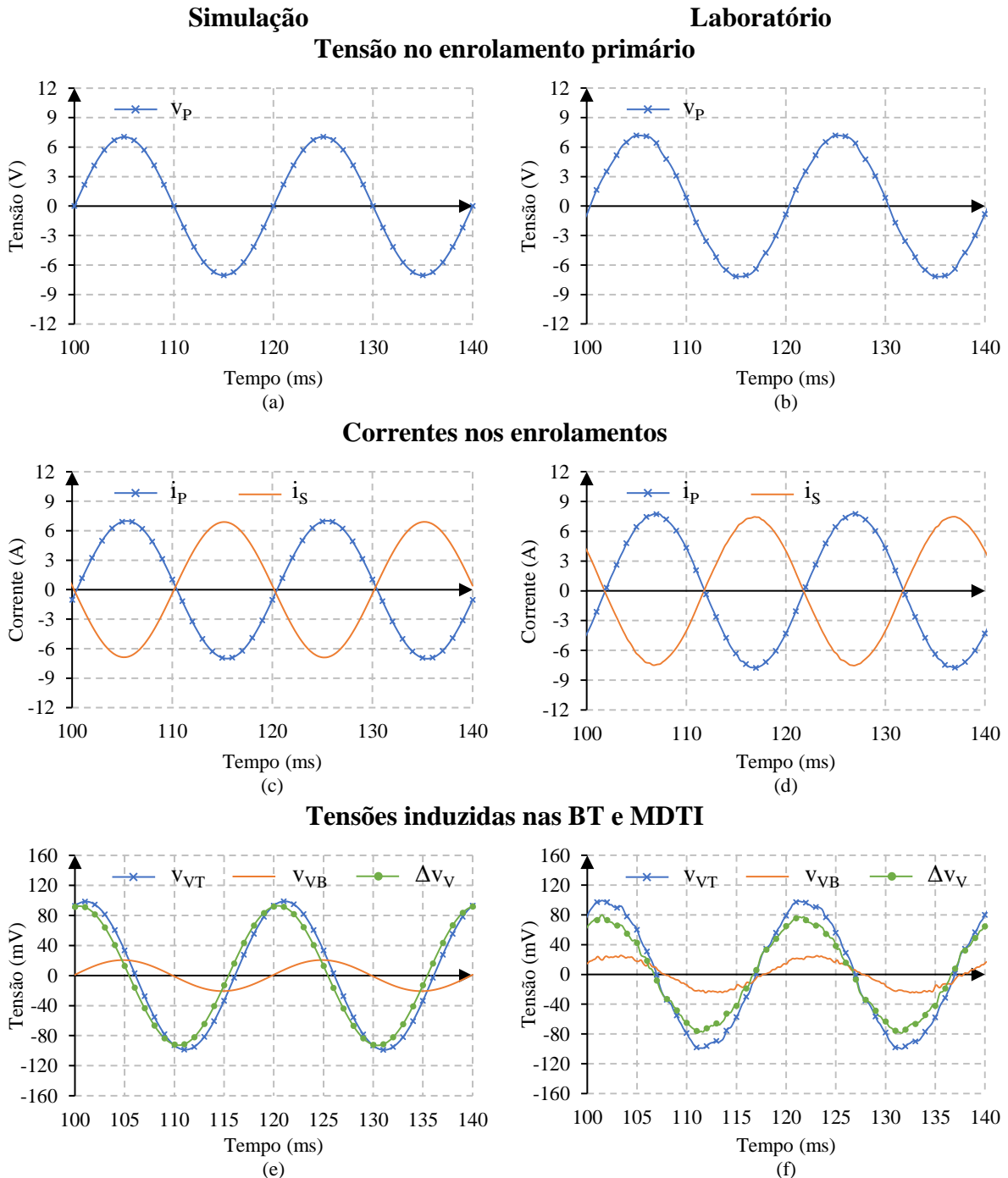


Figura 8.11 – Resultados do caso com deslocamento ascendente do enrolamento externo.

### 8.7 Enrolamentos assimétricos

Uma localização não simétrica dos enrolamentos em relação ao circuito magnético pode originar diferenças entre as tensões induzidas nas bobinas de teste superior e inferior, pois o fluxo de fugas captado por estas é distinto. Esta diferença pode provocar falsos diagnósticos pelo MDTI. A geometria utilizada neste ensaio apresenta-se na figura 8.12. O esquema elétrico permaneceu inalterado, mantendo-se semelhante à figura 8.2. Os gráficos da figura 8.13 apresentam a evolução temporal da tensão de alimentação, correntes nos enrolamentos e tensão

induzida nas bobinas de teste para um ensaio em curto-circuito convencional, sem a presença de defeito, e com os enrolamentos com posicionamento assimétrico (vertical) em relação à janela do núcleo. A comparação entre os valores de pico das tensões induzidas nas bobinas de teste e correntes nos enrolamentos é apresentada na tabela 8.7.

Os resultados experimentais e de simulação apresentam neste caso maiores discrepâncias, particularmente na tensão induzida na bobina de teste inferior, cujo valor de pico medido é praticamente o dobro do valor calculado. A influência das imperfeições do circuito magnético é aqui mais evidente, pois os enrolamentos estão mais próximos do núcleo na parte inferior da janela. Assim, qualquer dispersão anômala do fluxo provocada pelos entreferrros parasitas, não considerados no modelo computacional, afeta, de forma significativa, a tensão induzida na bobina de teste inferior.

A análise deste caso revela que a posição dos enrolamentos em relação ao circuito magnético do transformador provoca alterações ao MDTI. Estas alterações devem ser consideradas quando ocorre um defeito numa máquina com estas características de modo a evitar falsos diagnósticos. Assim, deve-se recorrer a um valor pré-definido de referência a partir do qual se considere que existe efetivamente uma avaria. Apesar de o resultado do MDTI nestas condições não se apresentar nulo continua a permitir a identificação de defeitos. Note-se que a maior parte dos cenários de defeito analisados neste capítulo apresentam valores para o MDTI consideravelmente superiores ao desvio provocado pela assimetria normal dos enrolamentos.

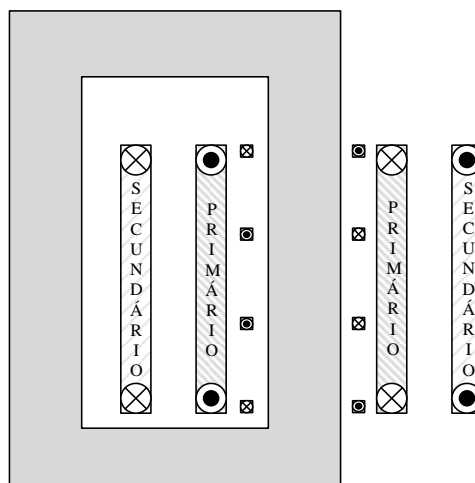


Figura 8.12 – Geometria representativa da geometria utilizada no modelo com enrolamentos assimétricos.

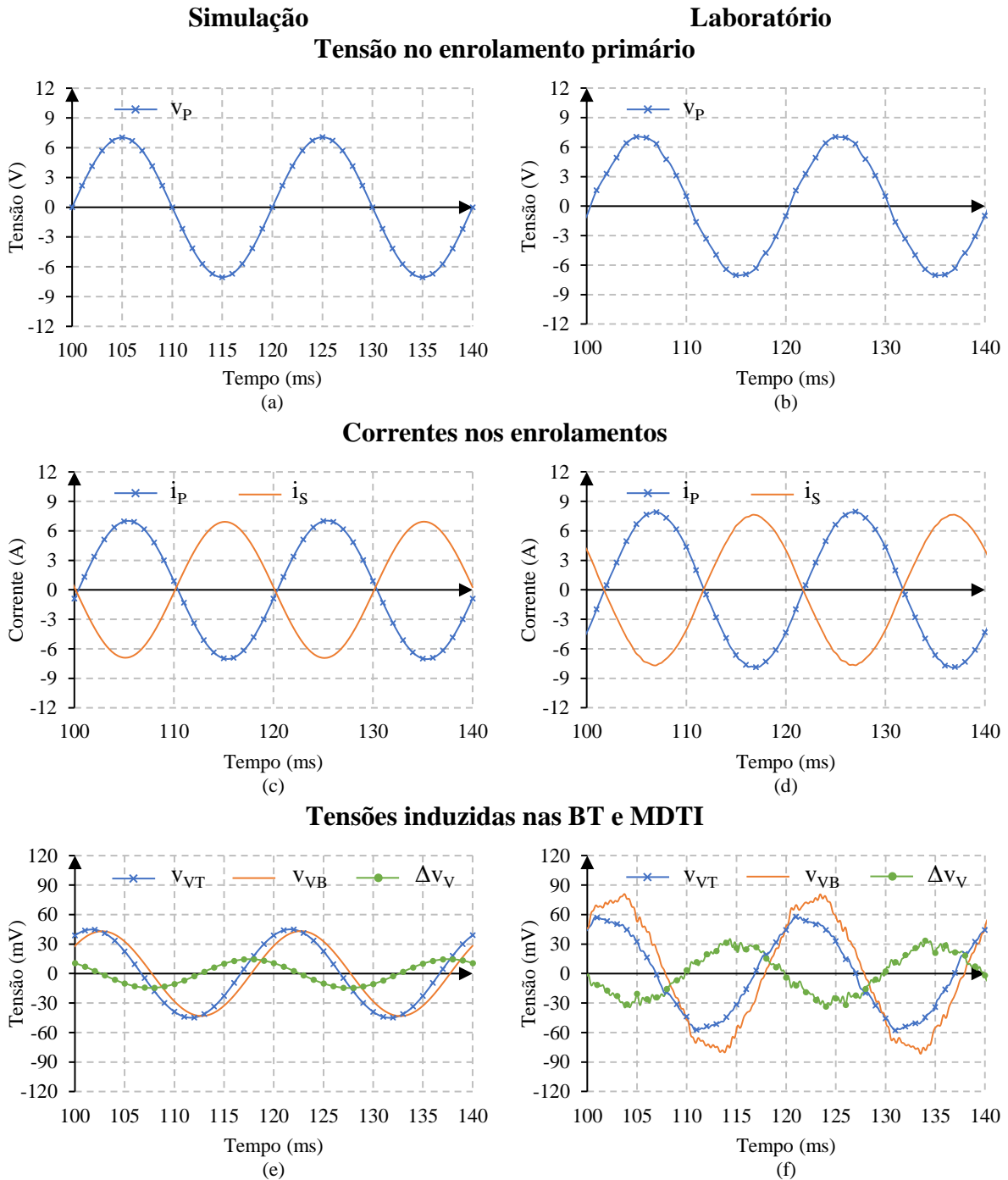


Figura 8.13 – Resultados do caso com enrolamentos assimétricos.

Tabela 8.7 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de uma localização assimétrica dos enrolamentos.

Dados	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta\hat{v}_V$ (mV)
<b>Simulação</b>	7,04	6,92	44,92	43,10	14,66
<b>Laboratório</b>	8,03	7,74	59,25	82,26	36,75
<b>Erro %</b>	+14,06	+10,59	+31,90	+90,86	+150,68

### 8.8 CC na zona superior do primário com enrolamentos assimétricos

O esquema elétrico utilizado apresenta-se na figura 8.4 enquanto a geometria se assemelha à figura 8.12. Os gráficos da figura 8.14 apresentam as formas de onda das tensões e correntes nos enrolamentos bem como as tensões induzidas nas bobinas de teste e respetivo MDTI. A tabela 8.8 completa os gráficos presentes em 8.14 indicando os seus valores de pico.

Da análise dos resultados é possível concluir que o MDTI identificar o defeito, mesmo quando os enrolamentos possuem uma geometria assimétrica na janela do núcleo.

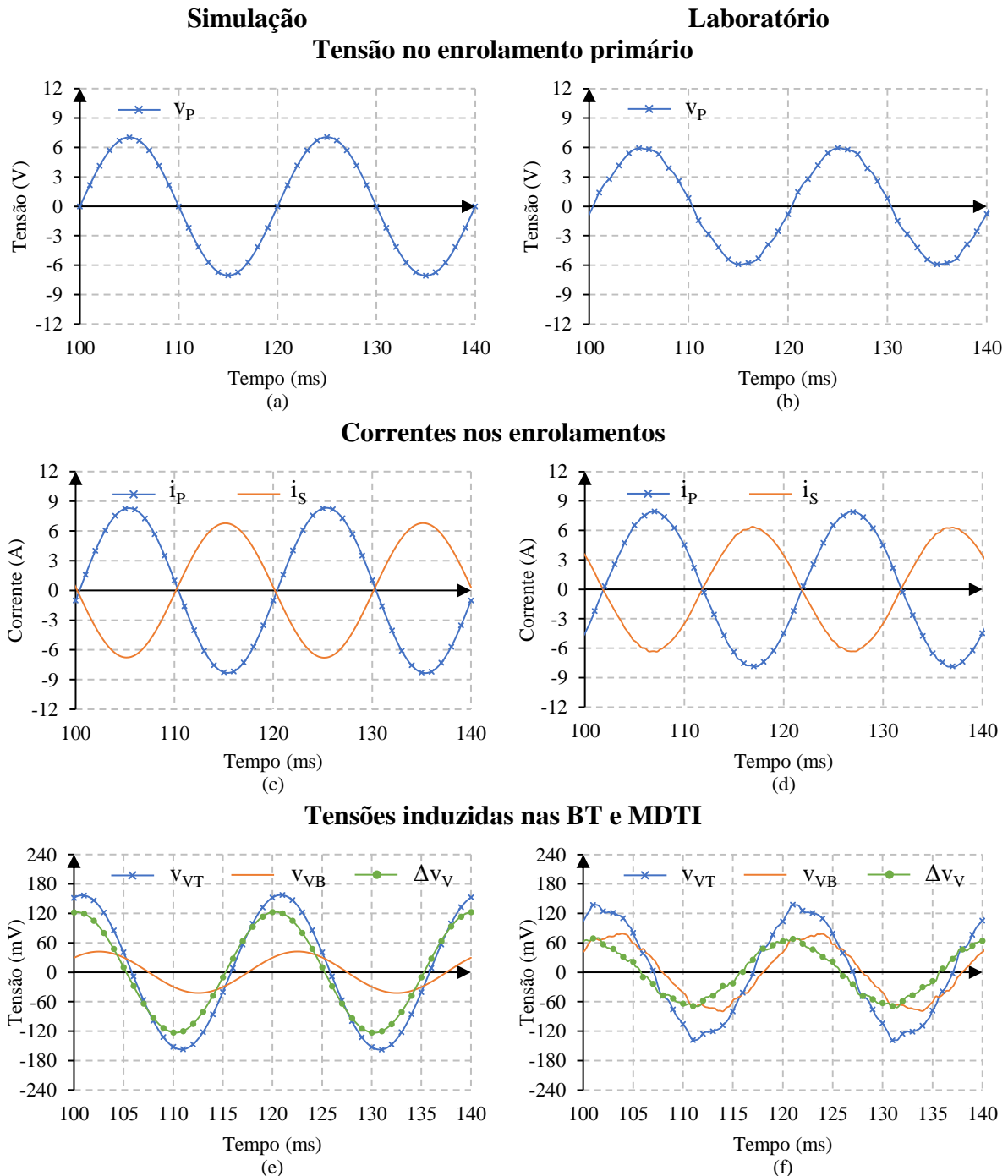


Figura 8.14 – Resultados do caso com CC na zona superior do enrolamento primário e enrolamentos assimétricos.

Tabela 8.8 – Valores de pico das correntes nos enrolamentos e tensões induzidas nas BT's para o caso de um CC na zona superior do enrolamento primário e com os enrolamentos assimétricos.

<b>Dados</b>	$\hat{I}_P$ (A)	$\hat{I}_S$ (A)	$\hat{v}_{VT}$ (mV)	$\hat{v}_{VB}$ (mV)	$\Delta\hat{v}_V$ (mV)
<b>Simulação</b>	8,34	6,78	157,33	42,27	122,89
<b>Laboratório</b>	7,97	6,39	138,94	83,11	72,31
<b>Erro %</b>	-4,44	-5,75	-11,69	+96,62	-41,16

## 8.9 Síntese

Os resultados experimentais estão globalmente em boa concordância com os resultados da simulação, com exceção dos casos onde as imperfeições do núcleo influenciam de forma significativa as linhas de fluxo magnético na proximidade dos enrolamentos. O MDTI permite detetar defeitos nos enrolamentos do transformador, quer estes sejam de natureza elétrica (curtos-circuitos entre espiras) ou de natureza mecânica (deformações e deslocamentos nos enrolamentos). No caso dos curtos-circuitos entre espiras permite ainda detetar, de forma grosseira, a zona do enrolamento onde se localiza o defeito.

## Capítulo 9 – Conclusões e trabalho futuro

Os equipamentos propostos nesta dissertação requerem ainda um longo percurso de desenvolvimento e adaptação. Aqui ficam algumas bases teóricas e modelações que demonstram que o MDTI funciona. Em relação aos equipamentos de teste propostos, verificou-se, ao longo deste trabalho, que as bobinas de teste horizontais não permitem a deteção de grande parte dos defeitos. Além deste aspeto, os valores resultantes do MDTI são, de um modo geral, baixos, sendo por vezes difícil retirar conclusões. Quando os enrolamentos se encontram posicionados assimetricamente no núcleo, que será a maioria da população de transformadores, é necessária uma atenção redobrada a definição de um valor de referência.

As bobinas de teste verticais surgiram posteriormente e revelaram-se a melhor opção estudada. Além dos valores obtidos aos seus terminais terem, na maior parte dos casos, amplitudes mensuráveis (quando comparados com zero), os resultados da aplicação do MDTI demonstram valores também significativos e onde é possível retirar conclusões com alguma certeza. Além do mais, para enrolamentos assimétricos e sem a presença de defeito, o MDTI resulta em valores baixos, que através da criação de um valor de referência, é facilmente ultrapassado.

No modelo trifásico o método de diagnóstico permite identificar a severidade da avaria e a fase em defeito, pois a amplitude das tensões induzidas nas bobinas de teste na fase afetada aumenta com a progressão do defeito e apresenta valores de  $\Delta v_V$  superiores.

Em termos de trabalho futuro existe ainda um longo caminho a percorrer nesta área. O próximo passo será o desenvolvimento de um algoritmo de deteção de defeitos com a inclusão das bobinas de teste aqui apresentadas. Os valores resultantes do MDTI e possivelmente alguns dados adicionais servirão de base para o sinal de disparo de um disjuntor ou simplesmente o aparecimento de uma notificação para uma equipa de manutenção. De seguida o estudo geométrico de um transformador e inclusão das bobinas de teste no seu interior. Neste ponto poderão ter de existir alterações geométricas na máquina ou repensar a forma como as bobinas de teste serão construídas.

---

## Referências

- [1] L. M. R. Oliveira "Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Protecção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos" Universidade de Coimbra - Faculdade de ciências e tecnologia, 2013.
- [2] F. Haghjoo, M. Mostafaei and H. Mohammadi, "A New Leakage Flux-Based Technique for Turn-to-Turn Fault Protection and Faulty Region Identification in Transformers," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 671-679, April 2018.
- [3] M. G. Say, "Alternating Current Machines," Pitman, London, 1983.
- [4] M. A. G. Martins "Gestão da vida útil dos transformadores Vol. 21, n.º 3/4" LABELEC – Grupo EDP, Departamento de Materiais Isolantes, 2009.
- [5] M. Wang, A. J. Vandermaar and 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.
- [6] P. A. Venikar, M. S. Ballal, B. S. Umre and H. M. Suryawanshi, "Search Coil Based Online Diagnostics of Transformer Internal Faults," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 6, pp. 2520-2529, Dec. 2017.
- [7] F. Haghjoo and M. Mostafaei, "Flux-based method to diagnose and identify the location of turn-to-turn faults in transformers," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 4, pp. 1083-1091, 10 3 2016.
- [8] M. Mostafaei and F. Haghjoo, "Flux-based turn-to-turn fault protection for power transformers," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 5, pp. 1154-1163, 7 4 2016.
- [9] M. F. Cabanas et al., "A New Online Method Based on Leakage Flux Analysis for the Early Detection and Location of Insulating Failures in Power Transformers: Application to Remote Condition Monitoring," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1591-1602, July 2007.
- [10] F. Haghjoo and H. Mohammadi, "Planar Sensors for Online Detection and Region Identification of Turn-to-Turn Faults in Transformers," in IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 17, pp. 5450-5459, 1 Sept.1, 2017.
- [11] MIT Staff: "Magnetic circuits and transformers", John Wiley & Sons, Inc, New York, July 1950.
- [12] L. M. R. Oliveira, Textos de apoio à disciplina de Electrotecnia Aplicada, Universidade do Algarve, 2006.

- 
- [13] Carlos Cabral - Universidade do Algarve, Máquinas Eléctricas I.
- [14] J. P. Sucena Paiva, “Redes de Energia Elétrica - Uma análise sistémica”, 4ª edição Maio 2015, IST Press.
- [15] João Rodrigues: “Guia passo-a-passo para a utilização de software FEM”; trabalho realizado no âmbito da disciplina de transitórios em sistemas elétricos de energia, MEEE, ISE, Ualg, 2018.
- [16] Prof. S. V. Kulkarni, Tutorial One: Calculation of leakage inductance of transformer using FEM, Electrical Engg. Department, IIT Bombay 2008.
- [17] L. Naranpanawe, T. Saha and C. Ekanayake, "Finite element analysis to understand the mechanical defects in power transformer winding clamping structure," 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 2017, pp. 1-5.
- [18] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, Transformer Engineering Design and Practice, Indian Institute of Technology, Bombay Mumbai, India, Marcel Dekker, Inc. 2004.
- [19] M. J. Heathcote: "The J&P Transformer Book", 12th Edition, London, Newnes, 1998.
- [20] C. C. Carvalho: "Transformadores", AEFEUP, 1983.
- [21] Pierre Bataille, “Laboratory prototype for studying winding faults in power transformers”, Erasmus Internship Report, ISE – Universidade do Algarve, 2018.
- [22] L.M.R Oliveira, A. J. M. Cardoso: "Leakage Inductances Calculation for Power Transformers Interturn Fault Studies," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.30, no.3, pp.1213,1220, June 2015.