

Ricardo André Almeida Brás

Papel do enrolamento terciário no diagnóstico de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos

4 de Setembro de 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA
ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Papel do enrolamento terciário no diagnóstico de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos

Ricardo Brás

Membros do júri

Presidente: Prof. Doutor Mário Gonçalo Mestre Veríssimo Silveirinha

Orientador: Prof. Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Vogal: Prof. Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos

4 de Setembro de 2013

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Doutor Sérgio Cruz pela disponibilidade e pela oportunidade que me deu ao permitir-me realizar esta dissertação sob a sua orientação, fazendo sempre com que tentasse melhorar e nunca facilitando nem baixando o nível de exigência, para que fosse possível retirar o máximo de proveito do trabalho realizado. Quero ainda agradecer a sua disponibilidade sempre que foi necessário realizar ensaios laboratoriais, uma vez que esse foi um ponto fulcral deste trabalho.

Em segundo lugar, quero agradecer aos meus pais que tudo fizeram para que fosse possível concretizar os meus sonhos, dando o máximo a cada dia para que não me faltasse nada nestes seis anos de curso. Um muito obrigado à minha irmã que também esteve sempre ao meu lado e me apoiou quando mais precisei.

Quero também agradecer à minha namorada que me tem vindo a acompanhar e a incentivar nos últimos três anos, nunca me deixando baixar os braços ou se quer pensar em desistir. Muito obrigado pelo amor, pelo carinho e sobretudo por seres quem és.

Por último agradeço aos meus amigos e colegas de curso, que fizeram destes últimos seis anos, os melhores e os mais ricos da minha vida; sem eles não teria sido possível, sem eles não teria sido a mesma coisa.

A todos um muito obrigado e um sincero e profundo agradecimento.

Ricardo Brás

Resumo

O presente documento apresenta o trabalho desenvolvido no âmbito da Dissertação que integra o plano curricular do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

O tema central deste trabalho prende-se com a aplicação de uma técnica de diagnóstico de avarias nos enrolamentos de transformadores, a transformadores de potência com enrolamento terciário. Esta técnica tem como base a aplicação da transformada complexa espacial às correntes de excitação dos mesmos.

No Capítulo 1 é apresentada uma pequena introdução acerca do tema à volta do qual se desenvolveu este trabalho, e quais os motivos impulsionadores do presente estudo.

No Capítulo 2 é apresentado o papel desempenhado pelo enrolamento terciário e qual a importância deste tipo de enrolamento em transformadores trifásicos com ligação estrela-estrela, sejam eles de núcleo comum ou de fases dissociadas.

No Capítulo 3 são apresentados resultados comprovadores da teoria apresentada no Capítulo 2, com o objetivo de quantificar as alterações observadas tanto na corrente de excitação como nas tensões simples dos enrolamentos do secundário de um transformador, na presença de um enrolamento terciário.

No Capítulo 4 é feita uma apresentação dos vários métodos de diagnóstico de avarias existentes.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos no âmbito do diagnóstico de avarias nos enrolamentos de transformadores com enrolamento terciário.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais acerca do trabalho desenvolvido, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-Chave: Transformadores, enrolamento terciário, diagnóstico de avarias, matriz de simetriação, Vetor de Park.

Abstract

This work was carried out under the scope of the Master Science Thesis that integrates the curriculum of the Master in Electrical and Computer Engineering, Faculty of Science and Technology, University of Coimbra.

The central theme of this work is related to the application of a diagnostic technique to detect the occurrence of winding inter-turn short-circuits in the transformer's windings, based on the application of the space vector to the exciting currents of power transformers with a tertiary winding.

Chapter 1 presents a small introduction about the theme around which this work is developed and the reasons that boosts the present study.

Chapter 2 presents the role of tertiary windings and the importance of this type of winding in a three-phase power transformers with star-star connection, both of core and shell-types or of dissociated phases.

Chapter 3 presents the results that corroborate the theory presented in Chapter 2, in order to quantify the changes observed in both the exciting current as and phase voltage of the secondary of a transformer, under the presence of a tertiary winding.

Chapter 4 presents the various methods of fault diagnosis that already exist.

Chapter 5 presents the results related to the diagnosis of faults in the windings of transformers with a tertiary winding.

In Chapter 6 are presented the main conclusions about this study, as well as some suggestions for future work.

Keywords: Transformers, tertiary winding, faults diagnosis, symmetrization matrix, Park's Vector.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	xii
Símbolos e Abreviaturas	xiv
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Análise ao mercado dos transformadores de potência	1
1.2 Corrente de excitação de um transformador	1
1.3 Limitações da ligação estrela-estrela	4
1.4 Enrolamento terciário ou de compensação	6
1.5 Objetivos propostos nesta dissertação	7
Capítulo 2 – Enrolamento terciário ou de compensação	8
2.1 Sistemas assimétricos	8
2.2 Supressão dos terceiros harmónicos das tensões	9
2.3 Compensação em regime de cargas desequilibradas	12
2.3.1 Carga entre fase e neutro num transformador de três colunas com ligação estrela-estrela	12
2.3.2 Carga entre fase e o neutro num BTTM com ligação estrela-estrela	16
Capítulo 3 – Validação experimental do papel do enrolamento terciário	18
3.1 Transformador trifásico de três colunas em vazio	18
3.2 Transformador trifásico de três colunas com carga entre fase e neutro	20
3.3 Banco trifásico de três transformadores monofásicos em vazio	22
3.4 Banco trifásico de três transformadores monofásicos com carga entre fase e neutro	24

Capítulo 4 – Métodos de diagnóstico de avarias nos enrolamentos dos transformadores ...	27
4.1 Análise dos gases dissolvidos no óleo.....	27
4.2 Grau de polimerização.....	28
4.3 Descargas parciais	28
4.4 Temperatura.....	29
4.5 Vibrações.....	29
4.6 Fluxo de fugas	30
4.7 Análise da resposta em frequência	30
4.8 Correntes de excitação.....	31
4.9 Matriz de simetrização	32
Capítulo 5 – Diagnóstico de avarias em transformadores com enrolamento terciário	39
5.1 Ensaio com alimentação equilibrada	39
5.1.1 Ensaio sem avarias no transformador	40
5.1.2 Curto-circuito entre espiras no enrolamento primário.....	43
5.2 Ensaio com alimentação desequilibrada	47
5.2.1 Resultados obtidos sem avaria.....	48
5.2.2 Resultados obtidos com curto-circuito na fase <i>R</i>	50
Capítulo 6 – Conclusões.....	53
6.1 Propostas de trabalho futuro	54
Referências Bibliográficas	55
Anexo A – Caracterização dos transformadores.....	58
Anexo B – Resultados anexos à validação experimental do papel do enrolamento terciário	69
Anexo C – Resultados anexos aos ensaios do diagnóstico de avarias	72
Anexo D – Instrumentação utilizada	84

Lista de Figuras

Fig. 1.1 – Obtenção da curva da corrente de excitação a partir da curva $B-H$	2
Fig. 1.2 – Representação da corrente de excitação para as seguintes situações: (a) Fluxo sinusoidal; (b) Fluxo não sinusoidal.	4
Fig. 1.3 – Representação do deslocamento do ponto neutro para uma ligação estrela-estrela sem neutro ($Yy0$).	5
Fig. 1.4 – Representação de um núcleo trifásico de três colunas magnéticas.....	7
Fig. 2.1 – Decomposição de um sistema trifásico assimétrico em três sistemas trifásicos simétricos: (a) Sistema assimétrico; (b) Sistema direto; (c) Sistema inverso; (d) Sistema homopolar.	8
Fig. 2.2 – Esquema representativo de um transformador: (a) Transformador trifásico de 3 colunas; (b) Banco trifásico de transformadores monofásicos.	10
Fig. 2.3 – Esquema elétrico de um transformador trifásico de três colunas magnéticas com enrolamento terciário (ligação $Yy0d$).....	12
Fig. 2.4 – Transformador com ligação $Yyn0$, com carga entre fase e neutro.	13
Fig. 2.5 – Esquemas equivalentes por fase de um transformador trifásico com ligação $Yyn0$: (a) Sistema direto; (b) Sistema inverso; (c) Sistema homopolar.....	14
Fig. 2.6 – Transformador com enrolamento terciário e carga entre fase e neutro.	15
Fig. 2.7 – Esquemas equivalentes por fase de um transformador trifásico com ligação $Yyn0d$: (a) Sistema direto; (b) Sistema inverso; (c) Sistema homopolar.....	15
Fig. 2.8 – Banco trifásico de transformadores monofásicos alimentando uma carga entre uma fase e o neutro (ligação $Yyn0$).	16
Fig. 2.9 – Transformador trifásico de cinco colunas magnéticas.....	17
Fig. 3.1 – Representação das formas de onda das correntes de excitação: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$	19
Fig. 3.2 – Representação do espectrograma das correntes de excitação da fase R do transformador: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$	19
Fig. 3.3– Representação do espectrograma das tensões simples do enrolamento secundário do transformador, com ligação $Yy0$ e $Yy0d$: (a) Fase R ; (b) Fase S ; (c) Fase T	20
Fig. 3.4 – Corrente elétrica que circula no enrolamento terciário: (a) Forma de onda; (b) Espectrograma.....	20
Fig. 3.5 – Representação das tensões simples do enrolamento secundário do transformador trifásico de três colunas: (a) Ligação $Yyn0$; (b) Ligação $Yyn0d$	21

Fig. 3.6 – Representação das correntes: (a) Correntes do primário por fase e corrente na carga; (b) Corrente no enrolamento terciário.....	21
Fig. 3.7 – Correntes de excitação dos três transformadores monofásicos: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$	22
Fig. 3.8 – Representação do espectrograma das correntes de excitação do BTTM, com ligação $Yy0$ (a) Fase R ; (b) Fase S ; (c) Fase T	23
Fig. 3.9 – Representação dos espectrogramas da corrente de excitação da fase R (Transformador R): (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$	23
Fig. 3.10 – Formas de onda das tensões simples do enrolamento primário do BTTM: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$	24
Fig. 3.11 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase R : (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$	24
Fig. 3.12 – Representação das formas de onda das tensões simples do enrolamento primário do BTTM: (a) Ligação $Yyn0$; (b) Ligação $Yyn0d$	25
Fig. 3.13 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase R : (a) Ligação $Yyn0$; (b) Ligação $Yyn0d$	25
Fig. 4.1 – Esquema equivalente por fase de um transformador trifásico.....	31
Fig. 4.2 – Representação de um núcleo trifásico ideal.....	34
Fig. 4.3 – Dedução da relutância magnética equivalente vista pelos enrolamentos de cada coluna magnética do transformador.....	34
Fig. 4.4 – Dedução da relutância magnética equivalente vista pelos fluxos da primeira e terceira coluna.....	35
Fig. 4.5 – Dedução da relutância magnética equivalente pelo fluxo da coluna central.....	36
Fig. 5.1 – Representação do VPCE do transformador quando alimenta uma carga resistiva trifásica equilibrada (ligações $Yy0$ e $Yy0d$) : (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	40
Fig. 5.2 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga trifásica equilibrada: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	41
Fig. 5.3 – Representação do VPCE quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	42
Fig. 5.4 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	43

Fig. 5.5 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>R</i> em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	44
Fig. 5.6 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>R</i> curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.	45
Fig. 5.7 – Representação do bloco que decompõe os sinais de tensão e corrente nos seus vários harmônicos no domínio do tempo e os passa para o domínio fasorial.....	48
Fig. 5.8– Representação do bloco que determina as componentes direta, inversa e homopolar da corrente de excitação, assim como a componente inversa provocada pelo desequilíbrio na alimentação e a elimina das correntes de excitação.	48
Fig. 5.9 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, sem avaria e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.	49
Fig. 5.10 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, sem avaria: (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.	50
Fig. 5.11 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>R</i> e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.....	51
Fig. 5.12 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>R</i> : (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.	51
Fig. A.1. – Transformador trifásico em análise.	58
Fig. A.2 – Enrolamento de 220 V e respectivas tomadas.	58
Fig. A.3 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo na ligação <i>Yyn0</i>	60
Fig. A.4 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo, na ligação <i>Yyn0d</i>	61
Fig. A.5 – Esquema de ligação para a obtenção da curva de magnetização do transformador.	62
Fig. A.6 – Curva de magnetização do transformador.	62
Fig. A.7 – Curva <i>B-H</i> do transformador de 6 KVA do laboratório.	63
Fig. A.8 – Banco trifásico de três transformadores monofásicos.	64
Fig. A.9 – Esquema do circuito magnético e respectivos enrolamentos do transformador de 25 VA.	64

Fig. A.10 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo (ligação Y_{yn0}).....	67
Fig. A.11 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo, na ligação Y_{yn0d}	68
Fig. B.1 – Representação do espectrograma das correntes de excitação da fase S do transformador: (a) Ligação Y_{y0} ; (b) Ligação Y_{Ny0} ; (c) Ligação Y_{y0d}	69
Fig. B.2 – Representação do espectrograma das correntes de excitação da fase T do transformador: (a) Ligação Y_{y0} ; (b) Ligação Y_{Ny0} ; (c) Ligação Y_{y0d}	69
Fig. B.3 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase S : (a) Ligação Y_{y0} ; (b) Ligação Y_{Ny0} ; (c) Ligação Y_{y0d}	70
Fig. B.4 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase T : (a) Ligação Y_{y0} ; (b) Ligação Y_{Ny0} ; (c) Ligação Y_{y0d}	70
Fig. B.5 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase S : (a) Ligação Y_{yn0} ; (b) Ligação Y_{yn0d}	71
Fig. B.6 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase T : (a) Ligação Y_{yn0} ; (b) Ligação Y_{yn0d}	71
Fig. C.1 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador se encontra em vazio: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.....	72
Fig. C.2 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	72
Fig. C.3 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador alimenta uma carga monofásica resistiva entre fase e neutro: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.....	73
Fig. C.4 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga monofásica resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	73
Fig. C.5 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador alimenta uma carga monofásica indutiva entre fase e neutro: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.....	74
Fig. C.6 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga monofásica indutiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	74

Fig. C.7 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador alimenta uma carga trifásica e equilibrada: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.....	75
Fig. C.8 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga trifásica e equilibrada: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	75
Fig. C.9 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>S</i> em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	76
Fig. C.10 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>S</i> curto-circuitadas e alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	76
Fig. C.11 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>T</i> em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	77
Fig. C.12 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>T</i> curto-circuitadas e alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	77
Fig. C.13 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase <i>R</i> em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	78
Fig. C.14 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase <i>R</i> curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	78
Fig. C.15 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase <i>S</i> em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	79
Fig. C.16 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase <i>S</i> curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	79

Fig. C.17 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase <i>T</i> em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.....	80
Fig. C.18 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase <i>T</i> curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.....	80
Fig. C.19 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>S</i> e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.....	82
Fig. C.20 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>S</i> : (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.....	82
Fig. C.21 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>T</i> e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.....	83
Fig. C.22 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase <i>T</i> : (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.....	83
Fig. D.1 – Sistema PXI-1033 com a carta PXI-6133 incorporada usada nos ensaios laboratoriais.....	84
Fig. D.2 – Caixa de terminais ligada ao PXI usada nos ensaios laboratoriais.....	84
Fig. D.3 – Fotografia da caixa de medida utilizada na obtenção dos dados nos ensaios laboratoriais.....	85
Fig. D.4 – Yokogawa WT3000, utilizado nos ensaios laboratoriais.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Decomposição harmónica das correntes de excitação do BTTM.	23
Tabela 3.2 – Decomposição harmónica das tensões do enrolamento primário do BTTM com ligação $Yyn0$	26
Tabela 3.3 – Decomposição harmónica das tensões do enrolamento primário do BTTM com ligação $Yyn0d$	26
Tabela 5.1 – Representação dos fatores de severidade do ensaio sem avaria no transformador com carga trifásica equilibrada.	41
Tabela 5.2 – Representação dos fatores de severidade do ensaio sem avaria no transformador com carga resistiva entre fase e neutro.	43
Tabela 5.3 – Representação dos fatores de severidade do ensaio com 5 % das espiras na fase R do enrolamento primário do transformador em curto-circuito e com carga resistiva entre fase e neutro.	45
Tabela 5.4 – Representação dos fatores de severidade do ensaio com 5 % das espiras nas fases R , S e T do enrolamento primário do transformador em curto-circuito e com carga resistiva entre fase e neutro.	46
Tabela 5.5 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, sem avaria com alimentação equilibrada e desequilibrada.	50
Tabela 5.6 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, com 5 % das espiras na fase R do enrolamento primário com alimentação equilibrada e desequilibrada.	52
Tabela 5.7 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, com 5 % das espiras nas fases R , S e T do enrolamento primário com alimentação equilibrada e desequilibrada.	52
Tabela A.1 – Grandezas medidas no ensaio em curto-circuito.	59
Tabela A.2 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador trifásico de três colunas referidos ao enrolamento de 220 V.	59
Tabela A.3 – Grandezas medidas no ensaio em circuito aberto.	59
Tabela A.4 – Parâmetros do núcleo do transformador trifásico de três colunas referidos ao enrolamento de 220 V.	60
Tabela A.5 – Impedância homopolar para a ligação $Yyn0$ referida ao enrolamento de 127 V.	60
Tabela A.6 – Impedâncias homopolares para a ligação $Yyn0d$ referida ao enrolamento de 220 V.	61
Tabela A.7 – Grandezas medidas no ensaio em curto-circuito em cada transformador.	65

Tabela A.8 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador monofásico <i>R</i> referidos ao enrolamento de 230 V.	65
Tabela A.9 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador monofásico <i>S</i> referidos ao enrolamento de 230 V.	65
Tabela A.10 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador monofásico <i>T</i> referidos ao enrolamento de 230 V.	65
Tabela A.11 – Grandezas medidas no ensaio em circuito aberto em cada transformador.	66
Tabela A.12 – Parâmetros do núcleo do transformador <i>R</i> referidos ao enrolamento de 230 V.	66
Tabela A.13 – Parâmetros do núcleo do transformador <i>S</i> referidos ao enrolamento de 230 V.	66
Tabela A.14 – Parâmetros do núcleo do transformador <i>T</i> referidos ao enrolamento de 230 V.	66
Tabela A.15 – Impedância homopolar para a ligação <i>Yyn0</i> referida ao enrolamento de 15 V.	67
Tabela A.16 – Impedância homopolar para a ligação <i>Yyn0d</i> referida ao enrolamento de 15 V.	68
Tabela C.1 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, com 5 % das espiras nas fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> do enrolamento secundário alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro.	81

Símbolos e Abreviaturas

Símbolos

e_{rn}	Valor instantâneo da tensão induzida total na fase r [V].
e_r	Valor instantâneo do termo fundamental da tensão induzida na fase r [V].
e_{r3}	Valor instantâneo do terceiro harmónico da tensão induzida na fase r [V].
E_o	Tensão induzida no enrolamento terciário [V].
f	Frequência fundamental [Hz].
f_R, f_S, f_T	Valores instantâneos das forças magnetomotrizes de cada enrolamento do primário do transformador [A].
FS	Fator de severidade.
\underline{I}_{exc}	Corrente de excitação no domínio fasorial [A].
$\underline{I}_{exc_j}, j \in \{R, S, T\}$	Correntes de excitação das fases R, S e T no domínio fasorial [A].
\underline{I}_c	Corrente de perdas no ferro no domínio fasorial [A].
$i_j, j \in \{R, S, T\}$	Valores instantâneos das correntes elétricas do enrolamento primário nas fases R, S e T [A].
$i_j, j \in \{r, s, t\}$	Valores instantâneos das correntes elétricas do enrolamento secundário nas fases r, s e t [A].
$i_{e\alpha}, i_{e\beta}$	Valores instantâneos das componentes $\alpha\beta$ das correntes de excitação do transformador [A].
i_{EPVA}	Valor instantâneo do módulo do vetor de Park das correntes de excitação do transformador [A].
$\underline{I}_{jd}, j \in \{r, s, t\}$	Componente direta das correntes das fases r, s e t do secundário do transformador [A].

$\underline{I}_{ji}, j \in \{r, s, t\}$	Componente inversa das correntes das fases r, s e t do secundário do transformador [A].
$\underline{I}_{jo}, j \in \{r, s, t\}$	Componente homopolar das correntes das fases r, s e t do secundário do transformador [A].
$\underline{I}_{jd}, j \in \{R, S, T\}$	Componente direta das correntes das fases R, S e T do primário do transformador [A].
$\underline{I}_{ji}, j \in \{R, S, T\}$	Componente inversa das correntes das fases R, S e T do primário do transformador [A].
$\underline{I}_{jo}, j \in \{R, S, T\}$	Componente homopolar das correntes das fases R, S e T do primário do transformador [A].
\underline{I}_L	Corrente elétrica na carga no domínio fasorial[A].
\underline{I}_m	Corrente de magnetização no domínio fasorial [A].
\underline{I}_o	Corrente homopolar no domínio fasorial [A].
$\underline{I}_j, j \in \{R, S, T\}$	Correntes elétricas do enrolamento primário nas fases R, S e T no domínio fasorial [A].
i_ϕ	Valor instantâneo da corrente de excitação [A].
N_1, N_2	Número de espiras do enrolamento primário e secundário respetivamente.
P_{11}, \dots, P_{33}	Associações das permeâncias das colunas, travessas e homopolares do circuito magnético do transformador [H].
$[Park]$	Matriz da transformação de Park.
$[Park]^{-1}$	Matriz inversa da transformação de Park.
$P_{eq1}, P_{eq2}, P_{eq3}$	Permeâncias equivalentes vistas pelos fluxos que circulam em cada coluna magnética de um transformador real de três colunas [H].
$P'_{eq1}, P'_{eq2}, P'_{eq3}$	Permeâncias equivalentes vistas pelos fluxos que circulam em cada coluna magnética de um transformador ideal de três colunas [H].
$[P_{eq}]$	Matriz das permeâncias do circuito magnético do transformador real [H].

$\left[P'_{eq} \right]$	Matriz das permeâncias do circuito magnético do transformador ideal [H].
R_{cc}	Resistência de curto-circuito referida ao enrolamento primário [Ω].
R_{Fe}	Resistência de perdas no ferro referida ao enrolamento primário [Ω].
R_p	Resistência do enrolamento primário [Ω].
R_s	Resistência do enrolamento secundário [Ω].
R'_s	Resistência do enrolamento secundário referida ao primário [Ω].
\mathfrak{R}_c	Relutância magnética da coluna do circuito magnético do transformador [H^{-1}].
\mathfrak{R}_t	Relutância magnética da travessa do circuito magnético do transformador [H^{-1}].
S_n	Potência aparente nominal [VA].
$[S]$	Matriz de simetrização.
$\underline{U}_1, \underline{U}_2$	Tensões simples do enrolamento primário e do enrolamento secundário, no domínio fasorial [V].
$\underline{U}_j, j \in \{R, S, T\}$	Tensões simples do enrolamento primário nas fases R , S e T , no domínio fasorial [V].
$\underline{U}_j, j \in \{r, s, t\}$	Tensões simples do enrolamento secundário nas fases r , s e t , no domínio fasorial [V].
$\underline{U}_{jd}, j \in \{r, s, t\}$	Componente direta das tensões simples das fases r , s e t do secundário do transformador [V].
$\underline{U}_{ji}, j \in \{r, s, t\}$	Componente inversa das tensões simples das fases r , s e t do secundário do transformador [V].
$\underline{U}_{jo}, j \in \{r, s, t\}$	Componente homopolar das tensões simples das fases r , s e t do secundário do transformador [V].

\underline{U}_{jd} , $j \in \{R, S, T\}$	Componente direta das tensões simples das fases R , S e T do primário do transformador [V].
\underline{U}_{ji} , $j \in \{R, S, T\}$	Componente inversa das tensões simples das fases R , S e T do primário do transformador [V].
\underline{U}_{jo} , $j \in \{R, S, T\}$	Componente homopolar das tensões simples das fases R , S e T do primário do transformador [V].
X_{cc}	Reatância de curto-circuito do transformador referida ao enrolamento primário [Ω].
X_m	Reatância de magnetização do transformador, referida ao enrolamento primário [Ω].
X_p	Reactância do enrolamento primário [Ω].
X_s	Reactância do enrolamento secundário [Ω].
X'_s	Reactância do enrolamento secundário referida ao primário [Ω].
$Yy0$	Ligação estrela-estrela sem o neutro tanto do lado do primário como do lado do secundário e com índice horário zero.
$Yyn0$	Ligação estrela-estrela sem o neutro do lado do primário mas com neutro do lado do secundário e com índice horário zero.
$YNy0$	Ligação estrela-estrela com o neutro ligado do lado do primário e com índice horário zero.
$Yy0d$	Ligação estrela-estrela com enrolamento terciário sem neutro e com índice horário zero.
$Yyn0d$	Ligação estrela-estrela com enrolamento terciário com neutro no enrolamento secundário e com índice horário zero.
Z_{cc}	Impedância de curto-circuito referida ao enrolamento primário [Ω].
Z_{Load}	Impedância da carga [Ω].
Z_m	Impedância de magnetização do transformador, reduzida ao lado do primário [Ω].

Z_o	Impedância homopolar [Ω].
ψ	Fluxo magnético encadeado [Wb].
Φ_R, Φ_S e Φ_T	Fluxos magnéticos das colunas R, S e T do transformador, respectivamente [Wb].
Φ_{1R}, Φ_{1S} e Φ_{1T}	Termo fundamental dos fluxos magnéticos das colunas R, S e T do transformador [Wb].
Φ_{3R}, Φ_{3S} e Φ_{3T}	Componente de terceiro harmónico dos fluxos magnéticos das colunas R, S e T do transformador [Wb].

Abreviaturas

BTTM	Banco trifásico de três transformadores monofásicos.
DP	Descargas parciais.
EPVA	<i>Extended Park's Vector Approach</i> .
f.e.m.	Tensão induzida.
f.m.m.	Força magnetomotriz.
VPCE	Vetor de Park das correntes de excitação.

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Análise ao mercado dos transformadores de potência

O mercado global dos transformadores encontra-se num estado de maturidade tal, que não se têm verificado inovações significativas, tanto a nível do produto em si, como a nível tecnológico. No entanto, não é por isso que se deixou de apostar na investigação e desenvolvimento tecnológico nesta área [1].

Os analistas do mercado de transformadores tinham previsto que o preço dos transformadores de potência deveria ter apresentado durante a década de 90 uma acentuada descida. Por outro lado previa-se também que o rácio entre o volume de vendas e a procura deste tipo de máquina ir-se-ia manter constante. No entanto, em inícios de 2002, esta situação apresentava-se completamente revertida. Particularmente foi o aumento dos preços das matérias-primas que apresentaram um grande impacto no preço dos transformadores de potência [1].

Estudos recentes revelam que o total de receitas do mercado global de transformadores elétricos (incluindo transformadores na área da produção e na área da distribuição) era, em 2009, de 23 biliões de dólares. Do total deste valor, 11 biliões de dólares correspondiam ao mercado mundial de transformadores de potência, tendo portanto este mercado crescido 13 % entre 2000 e 2009 [1].

Prevê-se que este mercado continue a desenvolver-se a um ritmo acentuado na próxima década, sendo esse desenvolvimento na ordem dos 20 % até 2020. Existem ainda novas previsões que indicam que o mercado global de transformadores irá chegar aos 53.6 biliões de dólares em 2017, o que equivale a mais de 10 milhões de unidades.

Posto isto, não existe qualquer surpresa em que recaiam sobre esta máquina elétrica inúmeras preocupações quanto à sua manutenção, impulsionando deste modo o desenvolvimento de métodos capazes de monitorizar e diagnosticar de uma forma fiável o seu estado de funcionamento.

1.2 Corrente de excitação de um transformador

Levando em linha de conta que a análise da corrente de excitação de um dado transformador desempenha um papel fulcral ao longo deste trabalho, na medida em que tanto o estudo da origem dos harmónicos nas tensões induzidas nos enrolamentos dos transformadores, como o diagnóstico de avarias dos mesmos é feito tendo como base a análise espectral da corrente de

excitação, torna-se conveniente a elaboração deste subcapítulo, com a finalidade de esclarecer certos pontos que possam ser menos claros, no que à corrente de excitação diz respeito.

Esta corrente é medida aplicando ao primário do transformador a sua tensão nominal e deixando em circuito aberto o seu secundário. Nestas condições só existem fluxos provocados pelas correntes de excitação. Estes fluxos serão tanto mais sinusoidais, quanto maior conteúdo harmónico contiverem as correntes, fruto da histerese do material ferromagnético do núcleo. A relação entre o ciclo histerético do material do núcleo, o fluxo e a corrente de excitação pode ser observada na Fig. 1.1.

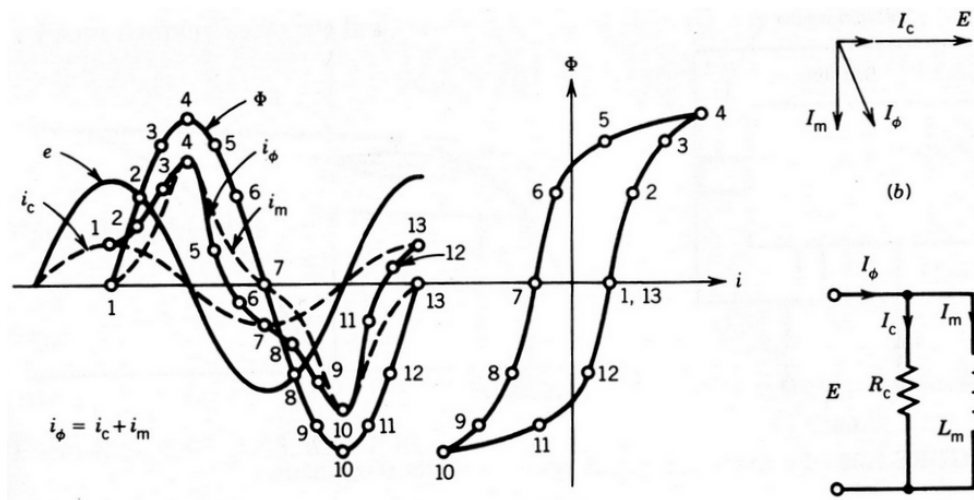


Fig. 1.1 – Obtenção da curva da corrente de excitação a partir da curva B-H.

Tendo em conta a característica não linear entre o fluxo magnético e a corrente de excitação, ($\Phi = f(i_\phi)$) devido ao facto dos transformadores, por motivos económicos, serem construídos de modo a funcionarem no início da saturação magnética, ao efetuar-se uma análise espectral à onda da corrente de excitação observa-se a presença de um grande conteúdo harmónico, e quanto maior é o nível de excitação do transformador, mais este se aproxima da saturação magnética e consequentemente maior conteúdo harmónico terá a corrente de excitação [2]. É portanto fácil de entender pela análise da Fig. 1.1 que para que existam fluxos e consequentemente tensões sinusoidais induzidas no enrolamento secundário é necessário que a corrente de excitação contenha um conteúdo harmónico significativo, em especial a componente de terceiro harmónico.

Contudo, para efeito do estudo da importância da utilização do enrolamento terciário, pode admitir-se, a partir de agora, que a corrente de excitação é composta apenas por um termo fundamental e por um terceiro harmónico, uma vez que são os termos mais preponderantes nesta corrente. Por outro lado, só o terceiro harmónico da corrente de excitação vai ser compensado pelo enrolamento terciário.

Para que se tenha uma ideia, os valores típicos da corrente de excitação de um transformador variam entre 0,6 % – 8 % da corrente nominal do enrolamento primário, para transformadores modernos de chapas de cristais orientados ou laminadas a frio. Por outro lado, no caso de transformadores antigos com chapas laminadas a quente o valor da corrente de excitação já pode variar entre 4 % e 14 % do valor da corrente nominal [3].

Existem inúmeros fatores que têm a ver com os processos mecânicos de construção do núcleo de um transformador que influenciam a corrente de excitação do mesmo.

O primeiro é a geometria do núcleo, pois diversos estudos demonstram que a disposição das chapas ferromagnéticas que constituem o núcleo dos transformadores influenciam o processo de recozimento ou secagem dos núcleos dos mesmos, e não sendo estes secos de uma forma homogênea, a corrente de excitação irá sofrer alterações, podendo os valores de amplitude da mesma diminuir até 10 % [4].

Outro fator que influencia bastante a forma de onda da corrente de excitação de cada transformador, tem a ver com os processos mecânicos na construção do núcleo do mesmo. Durante o processo de corte das chapas, é aplicado um lubrificante que ficará na região do entreferro, de forma a que as mesmas não sejam danificadas e que as folhas de material ferromagnético sejam cortadas de uma forma uniforme. Estudos desenvolvidos revelam que o valor médio da corrente de excitação pode aumentar entre 5 % – 10 % com a aplicação deste tipo de lubrificantes. Um aspeto muito importante tem a ver também com o manuseamento das chapas com as quais se vai construir o núcleo, pois qualquer degradação das mesmas no processo de empilhamento, poderá alterar de forma drástica a corrente de excitação do transformador [4].

Por fim, existe um último aspeto que diferencia a corrente de excitação dos diferentes transformadores, que é o material ferromagnético utilizado para a construção do núcleo. Pois para transformadores da mesma potência e aparentemente semelhantes, poder-se-ão observar correntes de excitação completamente diferentes, e isso deve-se exatamente à aplicação de materiais de características diferentes na construção do núcleo [4].

1.3 Limitações da ligação estrela-estrela

Tal como já foi referido no subcapítulo anterior, para que os fluxos criados num dado transformador sejam sinusoidais, e as tensões induzidas no enrolamento secundário também o sejam, será necessário que a corrente de excitação contenha para além da componente fundamental, um terceiro harmónico, como se pode verificar na Fig. 1.2 (a). Por outro lado se a corrente de excitação se apresentar sinusoidal os fluxos são não sinusoidais, contendo harmónicos de tripla frequência e apresentando uma forma de onda mais achatada, tal como representa a Fig. 1.2 (b) [3],[5],[6].

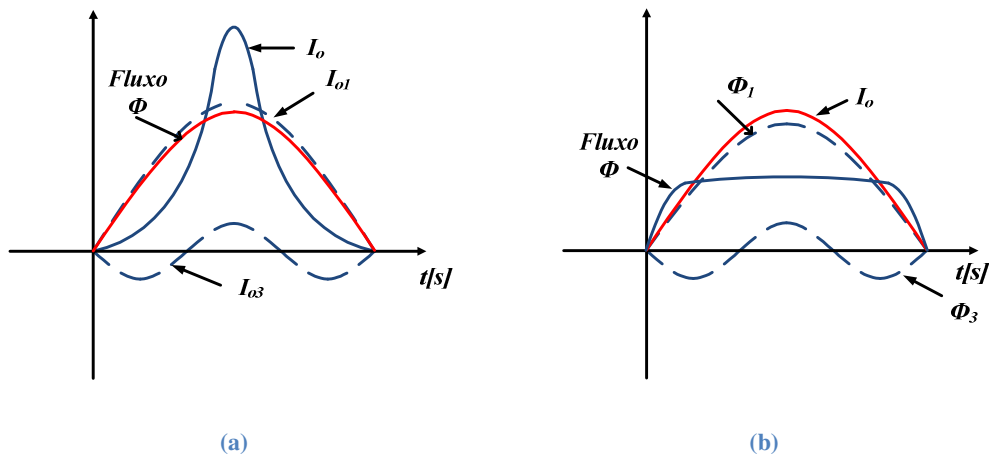


Fig. 1.2 – Representação da corrente de excitação para as seguintes situações: (a) Fluxo sinusoidal; (b) Fluxo não sinusoidal.

O caso representado na Fig. 1.2 (b) representa uma das grandes limitações de transformadores com ligação estrela-estrela com neutro isolado do lado do enrolamento primário. Neste caso, como o neutro do enrolamento primário não se encontra ligado ao neutro do sistema de alimentação, não será possível a circulação do 3º harmónico das correntes de excitação, levando a que os fluxos sejam não sinusoidais. Deste modo, não sendo sinusoidais os fluxos, as tensões induzidas quer no primário quer no secundário também não o serão, surgindo aqui um problema, pois o transformador comportar-se-á como um gerador de terceiros harmónicos. Nestas circunstâncias as tensões induzidas na fase r podem ser dadas pela seguinte expressão:

$$e_m = e_r \sin \omega t + e_{r3} \sin 3\omega t, \quad (1.1)$$

sendo e_m a tensão induzida total, e_r o termo fundamental e e_{r3} o terceiro harmónico da tensão induzida.

Enquanto que os termos fundamentais das tensões induzidas nas três fases do transformador estão desfasados entre si de 120° , o terceiro harmónico das mesmas encontra-se em fase, constituindo uma sequência homopolar. Por outro lado, considerando-se que os vetores

representativos dos termos fundamentais ($f = 50$ Hz) se encontram a rodar a uma velocidade angular $\omega = 2\pi f = 100\pi$ rad/s, e que os vetores representativos dos terceiros harmônicos das tensões giram a uma velocidade 3ω , verifica-se que os vetores dos terceiros harmônicos se deslocam a uma velocidade angular 2ω relativamente aos vetores do termo fundamental, resultando por isso um fenómeno denominado por deslocamento do ponto neutro, fenómeno esse que provocará desequilíbrios nas tensões simples do enrolamento do secundário do transformador, mantendo-se inalteradas as tensões compostas, como se pode observar na Fig. 1.3 [5], [7], [8].

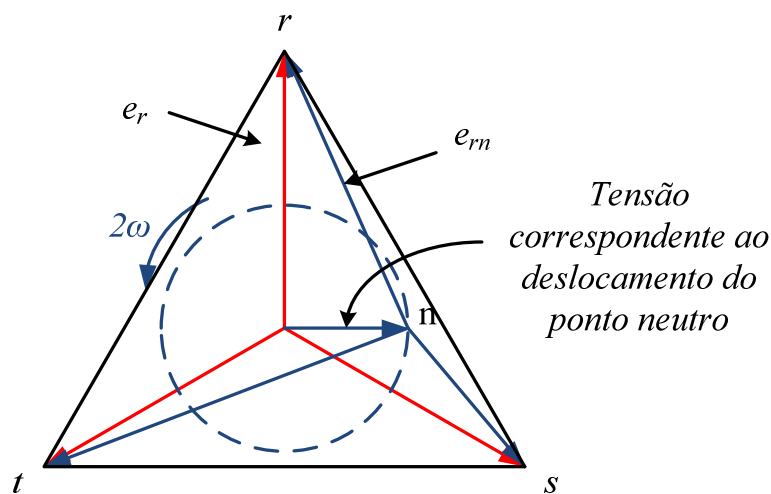


Fig. 1.3 – Representação do deslocamento do ponto neutro para uma ligação estrela-estrela sem neutro ($Yy0$).

O transformador está assim convertido num gerador de tensões não sinusoidais com grande percentagem de terceiro harmónico, tensões estas que se vão propagar ao longo dos sistemas elétricos de energia. Consequentemente, a existência de grande conteúdo harmónico nas redes e sistemas de energia provocará, interferências nas comunicações telefónicas, sobretensões e falhas no funcionamento de bancos de condensadores [6].

O segundo ponto a evidenciar será a limitação apresentada por uma ligação estrela-estrela sem ligação do neutro do enrolamento primário ao neutro do sistema de alimentação, quando o transformador está a funcionar em regime de cargas desequilibradas, principalmente se a carga estiver ligada entre uma das fases do secundário e o neutro (ligação $Yyn0$). Provocar-se-ão mais uma vez desequilíbrios nas tensões dos enrolamentos do secundário do transformador, provocados pelo deslocamento do ponto neutro.

1.4 Enrolamento terciário ou de compensação

Tendo em conta que já foram apresentados os dois grandes problemas existentes aquando da utilização de uma ligação $Yy0$ ou de uma ligação $Yyn0$ em transformadores de potência, estão reunidas as condições necessárias para apresentar de uma forma breve o papel importante que o enrolamento terciário, também conhecido como enrolamento de compensação, desempenha neste tipo de ligações.

Em sistemas trifásicos de alta tensão, os transformadores apresentam usualmente os seus enrolamentos com ligações em estrela, e neste tipo de ligação já se torna evidente, e prática comum a utilização de um enrolamento terciário com uma potência nominal igual a cerca de 35 % da potência nominal de um dos outros dois enrolamentos do transformador (Normalmente o de maior potência). Contudo, esta regra dos 35 %, embora muito usada, pode ser um obstáculo para utilizadores não informados, na medida em que tendo em conta a função para a qual está a ser dimensionado o enrolamento terciário, este deve ser dimensionado com uma maior ou menor potência nominal [7].

O papel principal do enrolamento terciário deve ser o de estabilizar o ponto neutro das tensões do enrolamento secundário do transformador, quando na presença de cargas desequilibradas ligadas entre uma fase e o neutro do secundário. Portanto a supressão do terceiro harmónico das tensões deve ser vista como um papel secundário. É por isso importante dizer que se esta for a razão pela qual se vai instalar o enrolamento terciário, então este pode ter uma potência nominal mais reduzida [7].

Pelo que foi referido anteriormente, se os transformadores estiverem a funcionar em regimes assimétricos, sejam eles causados pela rede ou pelas cargas ligadas ao transformador, existirá o aparecimento de fluxos com uma componente homopolar no núcleo do transformador.

Caso o núcleo magnético do transformador for do tipo *core* de três colunas magnéticas, como o representado na Fig. 1.4 ocorre um fenómeno interessante. Tal fenómeno tem a ver com a inexistência de um caminho para a componente homopolar dos fluxos, tendo esta de retornar pela parte exterior ao núcleo, ou seja, pelo ar, caso o transformador não contenha qualquer cuba. Caso contrário circulará pela cuba metálica, levando a mesma a ser percorrida por correntes residuais que provocarão o aquecimento de todos os elementos metálicos constituintes da envolvente do transformador [7].

É importante referir ainda que o aparecimento de fluxos homopolares, não depende só do tipo de ligação dos enrolamentos do transformador, mas também da configuração do núcleo [7].

É de notar que o enrolamento terciário tem pouco impacto na compensação da componente inversa dos fluxos, mas por outro lado cancela ou diminui drasticamente os fluxos homopolares.

Ou seja, a circulação de uma corrente através do enrolamento terciário permite a compensação da componente homopolar da corrente que circula nos enrolamentos do transformador.

O enrolamento de compensação é mais utilizado em transformadores trifásicos de 5 colunas, ou em transformadores trifásicos de fases dissociadas, uma vez que no caso dos transformadores trifásicos de 3 colunas magnéticas com ligação $Yy0$ existe um facto especial a ter em conta, facto esse que tem a ver com a obrigatoriedade das componentes homopolares dos fluxos terem de circular pelo ar [7], [8].

No Capítulo 2 será abordada com maior ênfase esta temática.

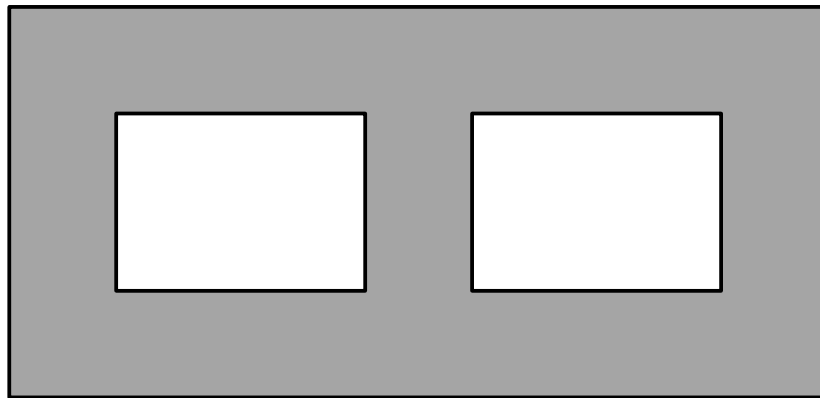


Fig. 1.4 – Representação de um núcleo trifásico de três colunas magnéticas.

1.5 Objetivos propostos nesta dissertação

Com esta dissertação pretende estudar-se o impacto do enrolamento terciário no diagnóstico de avaria nos enrolamentos de transformadores de potência. Para tal foi feito um diagnóstico com base na representação do Vetor de Park das correntes de excitação do transformador dando assim continuidade aos trabalhos desenvolvidos em [9] e [10].

Aplicou-se também este tipo de diagnóstico de avarias no caso de o transformador ser alimentado por um sistema trifásico desequilibrado de tensões, com o objetivo de verificar se o método se mantém igualmente eficaz e robusto.

Capítulo 2 – Enrolamento terciário ou de compensação

2.1 Sistemas assimétricos

Por vezes no estudo de sistemas de energia polifásicos, ocorrem situações em que é necessário determinar as grandezas elétricas e características respetivas quando ocorrem regimes de funcionamento assimétricos permanentes. Também na análise de transformadores trifásicos existe a necessidade de estudar os regimes de funcionamento assimétricos, provocados tanto pela respetiva alimentação, como pelo regime de carga do mesmo, ou ainda pelas suas características construtivas [11].

Para efetuar de uma forma simplificada uma análise envolvendo um sistema trifásico a funcionar em regime assimétrico, decompõe-se o mesmo em três sistemas trifásicos simétricos, que não são mais que três sistemas de grandezas sinusoidais, desfasadas de 120° e com a mesma amplitude, como se pode observar na Fig. 2.1.

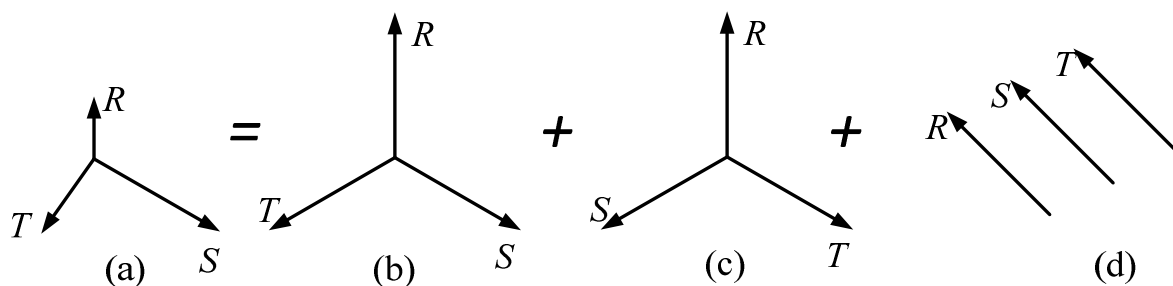


Fig. 2.1 – Decomposição de um sistema trifásico assimétrico em três sistemas trifásicos simétricos: (a) Sistema assimétrico; (b) Sistema direto; (c) Sistema inverso; (d) Sistema homopolar.

Estes três sistemas simétricos são obtidos a partir do sistema assimétrico através das expressões seguintes, e são validas para tensões, correntes elétricas e fluxos magnéticos.

Sistema direto

$$\underline{I}_{Rd} = \frac{1}{3}(\underline{I}_R + \underline{aI}_S + \underline{a}^2 \underline{I}_T). \quad (2.1)$$

$$\underline{I}_{Sd} = \frac{1}{3}(\underline{a}^2 \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{aI}_T). \quad (2.2)$$

$$\underline{I}_{Td} = \frac{1}{3}(\underline{aI}_R + \underline{a}^2 \underline{I}_S + \underline{I}_T). \quad (2.3)$$

\underline{I}_{Rd} , \underline{I}_{Sd} e \underline{I}_{Td} representam a componente direta das correntes elétricas das fases R , S e T , \underline{I}_R , \underline{I}_S e \underline{I}_T representam os fasores das correntes simples das fases R , S e T , sendo $\underline{a} = \underline{e}^{j\frac{2\pi}{3}}$ e $\underline{a}^2 = \underline{e}^{j\frac{4\pi}{3}}$.

Sistema inverso

$$\underline{I}_{Ri} = \frac{1}{3}(\underline{I}_R + \underline{a}^2 \underline{I}_S + \underline{a} \underline{I}_T). \quad (2.4)$$

$$\underline{I}_{Si} = \frac{1}{3}(\underline{a} \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{a}^2 \underline{I}_T). \quad (2.5)$$

$$\underline{I}_{Ti} = \frac{1}{3}(\underline{a}^2 \underline{I}_R + \underline{a} \underline{I}_S + \underline{I}_T). \quad (2.6)$$

\underline{I}_{Ri} , \underline{I}_{Si} e \underline{I}_{Ti} representam a componente inversa das correntes elétricas das fases R , S e T .

Sistema homopolar

$$\underline{I}_{Ro} = \underline{I}_{So} = \underline{I}_{To} = \frac{1}{3}(\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T). \quad (2.7)$$

\underline{I}_{Ro} , \underline{I}_{So} e \underline{I}_{To} representam a componente homopolar das correntes elétricas das fases R , S e T .

Será portanto com base nas expressões apresentadas nesta secção que se irá proceder ao estudo do comportamento dos transformadores trifásicos com ligação $Yyn0$, a funcionar em regime de carga desequilibrada, e consequentemente perceber o papel desempenhado pelo enrolamento terciário neste tipo de ligação.

2.2 Supressão dos terceiros harmónicos das tensões

Como já foi referido no subcapítulo 1.4, o enrolamento terciário apresenta dois papéis importantes no que diz respeito a transformadores trifásicos de potência com ligação estrela-estrela e cujo neutro do enrolamento primário esteja isolado. Um desses papéis diz respeito à estabilização do ponto neutro¹ aquando da existência de cargas desequilibradas, e o outro à supressão dos terceiros harmónicos das tensões do transformador. Será este último o que irá ser debatido neste subcapítulo, de modo a que se entenda de forma clara os mecanismos e o processo através do qual é feita esta supressão dos terceiros harmónicos.

¹ A estabilização do ponto neutro consiste no papel realizado pelo enrolamento terciário, eliminando a componente homopolar dos fluxos magnéticos criada por cargas ligadas entre fase e neutro. Deste modo, as tensões induzidas não vão conter terceiros harmónicos e portanto deixa de existir o fenómeno de deslocamento do ponto neutro, citado no subcapítulo 1.3.

Antes de mais é importante referir que no que diz respeito à supressão dos terceiros harmónicos nas tensões de um transformador, a aplicação do enrolamento terciário apresenta-se com uma maior importância e com uma maior necessidade em transformadores de 5 colunas magnéticas ou em transformadores de fases dissociadas, sendo estes últimos em tudo idênticos a um banco trifásico de três transformadores monofásicos, que consiste na ligação de três transformadores monofásicos entre si [7].

A razão desta afirmação prende-se essencialmente com o número de colunas magnéticas existentes em ambos os tipos de transformador, pois se no banco trifásico de transformadores monofásicos temos o equivalente a 4 colunas magnéticas, no transformador trifásico de três colunas temos menos uma, como se pode verificar na Fig. 2.2.

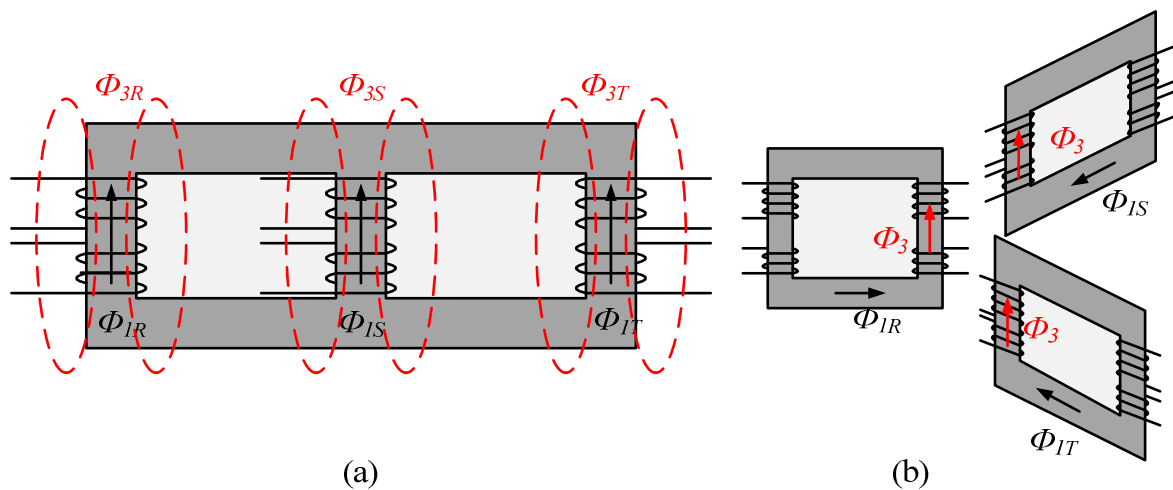


Fig. 2.2 – Esquema representativo de um transformador: (a) Transformador trifásico de 3 colunas; (b) Banco trifásico de transformadores monofásicos.

Numa ligação estrela-estrela, não existindo neutro do lado do enrolamento primário, não será possível a circulação de terceiros harmónicos nas correntes de excitação, o que por sua vez provocará o aparecimento de fluxos homopolares e conseqüente aparecimento de terceiros harmónicos nas tensões induzidas nos enrolamentos. Contudo este fenómeno não acontece com o mesmo destaque nos dois tipos de transformadores trifásicos. Tendo em conta o caso do transformador trifásico de 3 colunas magnéticas, verifica-se que a supressão da quarta coluna magnética, baseia-se no facto dos termos fundamentais dos fluxos magnéticos, Φ_{1R} , Φ_{1S} e Φ_{1T} se encontrarem desfasados 120° e portanto a sua soma é nula como se pode observar na expressão 2.8.

$$\Phi_{1R} + \Phi_{1S} + \Phi_{1T} = 0. \quad (2.8)$$

Por outro lado, no que diz respeito aos fluxos homopolares, esta expressão já não é válida, uma vez que estes se encontram em fase. Desta num transformador deste tipo, os fluxos

homopolares passam a ver como quarta coluna o ar, o que se traduz numa grande relutância, e conseqüente enfraquecimento dos mesmos. Posto isto chega-se à conclusão que as tensões induzidas nos enrolamentos do transformador serão fruto da componente fundamental dos fluxos magnéticos, Φ_{1R} , Φ_{1S} e Φ_{1T} e de uma componente homopolar enfraquecida dos mesmos. Desta forma, as tensões vão possuir pouco conteúdo de 3º harmónico, não sendo o papel primordial do terciário, no caso do transformador trifásico de três colunas, a supressão dos terceiros harmónicos das tensões. Contudo apresenta-se na Fig. 2.3 o esquema unifilar de um transformador trifásico de três colunas magnéticas com enrolamento terciário, onde se pode observar a circulação da corrente homopolar através do enrolamento terciário.

Pelo contrário, no caso de um banco trifásico de transformadores monofásicos (BTTM), existindo a quarta coluna, como se pode verificar na Fig. 2.2 (b), o fluxo homopolar criado pela não circulação de terceiros harmónicos nas correntes de excitação poderá circular. Posto isto, os fluxos magnéticos por fase neste tipo de transformador, não são perfeitamente sinusoidais uma vez que são resultado da soma das componentes fundamentais Φ_{1R} , Φ_{1S} e Φ_{1T} com as componentes de terceiro harmónico Φ_{3R} , Φ_{3S} e Φ_{3T} , que agora têm a possibilidade de circular através da quarta coluna do BTTM.

Como consequência do que foi apresentado, não sendo sinusoidais os fluxos magnéticos, as tensões induzidas nos enrolamentos do secundário também não o são, comportando-se o BTTM como um gerador de terceiros harmónicos para a rede elétrica. Tendo em conta a necessidade de evitar que o BTTM funcione como um gerador de terceiros harmónicos para a rede elétrica surge então a necessidade de incorporar no mesmo um enrolamento terciário.

Ao existir este enrolamento, os fluxos homopolares vão originar o aparecimento de três tensões induzidas (E_o), uma por cada fase, o que é equivalente a ter no enrolamento uma tensão induzida total igual a $3 \times E_o$, devido à característica homopolar das mesmas. Conseqüentemente vai circular no enrolamento terciário uma corrente homopolar I_o . Esta corrente I_o , tal como qualquer corrente tenderá a opor-se à causa que lhe deu origem, neste caso a variação dos fluxos homopolares [3], [5].

A circulação desta corrente homopolar provoca então uma elevada diminuição do fluxo homopolar, não o eliminando por completo uma vez que se tal acontecesse não existiriam tensões induzidas (E_o) e conseqüentemente não existiria corrente I_o no terciário.

A existência do enrolamento terciário elimina assim os terceiros harmónicos das tensões simples do primário e do secundário, com conseqüente diminuição da impedância homopolar do banco trifásico de transformadores monofásicos, mantendo assim estável o ponto neutro das tensões do secundário [12].

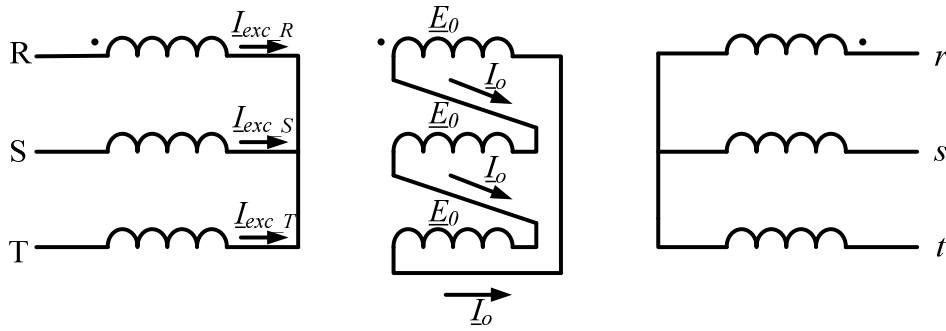


Fig. 2.3 – Esquema elétrico de um transformador trifásico de três colunas magnéticas com enrolamento terciário (ligação $Yy0d$).

2.3 Compensação em regime de cargas desequilibradas

É com base nos três sistemas trifásicos e simétricos descritos no subcapítulo 2.1 que é estudado o papel desempenhado pelo enrolamento terciário, num transformador com uma ligação estrela-estrela sem neutro do lado do enrolamento primário, a funcionar num regime de carga assimétrico em especial no caso em que a carga é ligada entre uma fase e o neutro do enrolamento do secundário² [7].

Neste subcapítulo o estudo do papel do enrolamento terciário na presença de uma carga entre uma fase e o neutro, é dividido em dois casos. Um primeiro considerando que o transformador é trifásico de três colunas magnéticas e com ligação $Yyn0d$, e no segundo caso considera-se que temos um banco trifásico de transformadores monofásicos, com o mesmo tipo de ligação.

2.3.1 Carga entre fase e neutro num transformador de três colunas com ligação estrela-estrela

A ligação de uma carga entre a fase r e o neutro do secundário, tal como representado na Fig. 2.4, provoca a circulação de uma corrente I_L do lado do secundário, que se traduz também na circulação de uma corrente I_R do lado do primário desta mesma fase. Na medida em que não existe neutro do lado do primário, e atendendo às leis de *Kirchoff*, as correntes do primário são assim obrigadas a respeitar a seguinte equação:

$$i_R + i_S + i_T = 0, \quad (2.9)$$

² Também neste caso, em que os desequilíbrios são causados pela carga, a utilização de um enrolamento terciário é mais comum em transformadores de fases dissociadas ou em bancos trifásicos de transformadores monofásicos, do que propriamente em transformadores trifásicos de três colunas magnéticas.

onde i_R , i_S e i_T representam os valores instantâneos das correntes simples por fase do primário do transformador.

Portanto, na medida em que na fase R do lado do primário circula uma corrente, i_R para que se respeite a equação 2.9, terá que circular em cada uma das fases S e T uma corrente $i_R / 2$, não podendo estas correntes serem compensadas no lado do secundário do transformador, uma vez que nas fases s e t não existe qualquer corrente, como se pode observar na fig.2.4.

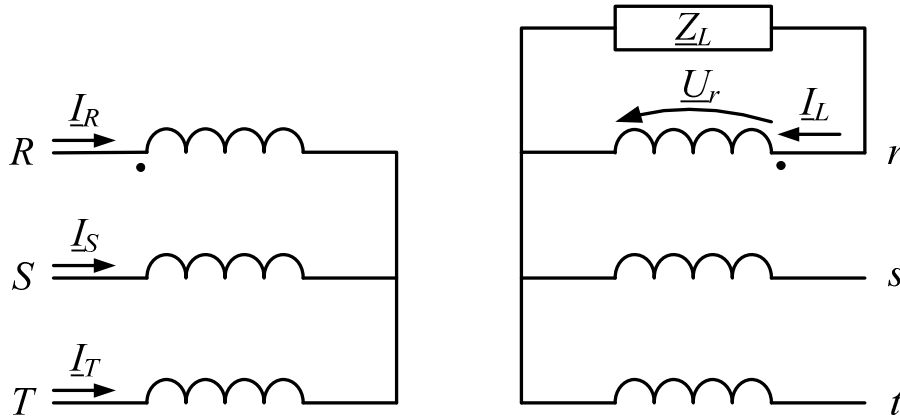


Fig. 2.4 – Transformador com ligação $Yyn0$, com carga entre fase e neutro.

Considerando a Fig. 2.4, que representa uma carga entre uma fase e o neutro do enrolamento secundário de um transformador, vai abordar-se de uma forma analítica, este problema.

O primeiro passo desta análise será então decompor as correntes elétricas do secundário nas suas componentes direta, inversa e homopolar, através das equações apresentadas no subcapítulo 2.1. Contudo, uma vez que neste caso só existe corrente elétrica na fase r do enrolamento secundário, só essa fase será decomposta nas suas respectivas componentes direta, inversa e homopolar, como se pode observar pelas expressões 2.10, 2.11 e 2.12.

$$\underline{I}_{rd} = \frac{1}{3} \times (\underline{I}_r + \underline{a} \underline{I}_s + \underline{a}^2 \underline{I}_t) = \frac{1}{3} \times \underline{I}_r = \frac{1}{3} \times \underline{I}_L \quad (2.10)$$

$$\underline{I}_{ri} = \frac{1}{3} \times (\underline{I}_r + \underline{a}^2 \underline{I}_s + \underline{a} \underline{I}_t) = \frac{1}{3} \times \underline{I}_r = \frac{1}{3} \times \underline{I}_L \quad (2.11)$$

$$\underline{I}_{ro} = \frac{1}{3} \times (\underline{I}_r + \underline{I}_s + \underline{I}_t) = \frac{1}{3} \times \underline{I}_r = \frac{1}{3} \times \underline{I}_L \quad (2.12)$$

Rapidamente se chega à conclusão que o resultado das equações anteriores é uma corrente homopolar dada por,

$$\underline{I}_{rd} = \underline{I}_{ri} = \underline{I}_{ro} = \frac{1}{3} \underline{I}_L \quad (2.13)$$

em que \underline{I}_L representa a corrente elétrica na carga, no domínio fasorial. Resultará como consequência da circulação desta corrente elétrica um fluxo magnético também ele homopolar. Posto isto, os fluxos magnéticos apresentam uma componente fundamental e um terceiro harmónico. Consequentemente as tensões induzidas nos enrolamentos do secundário do transformador, também apresentam uma componente fundamental e um correspondente terceiro harmónico, levando ao deslocamento do ponto neutro e a consequentes desequilíbrios nas tensões simples dos enrolamentos do secundário. Os esquemas equivalentes por fase de um transformador com ligação $Yyn0$, para um sistema direto, inverso e homopolar, são os representados na Fig. 2.5.

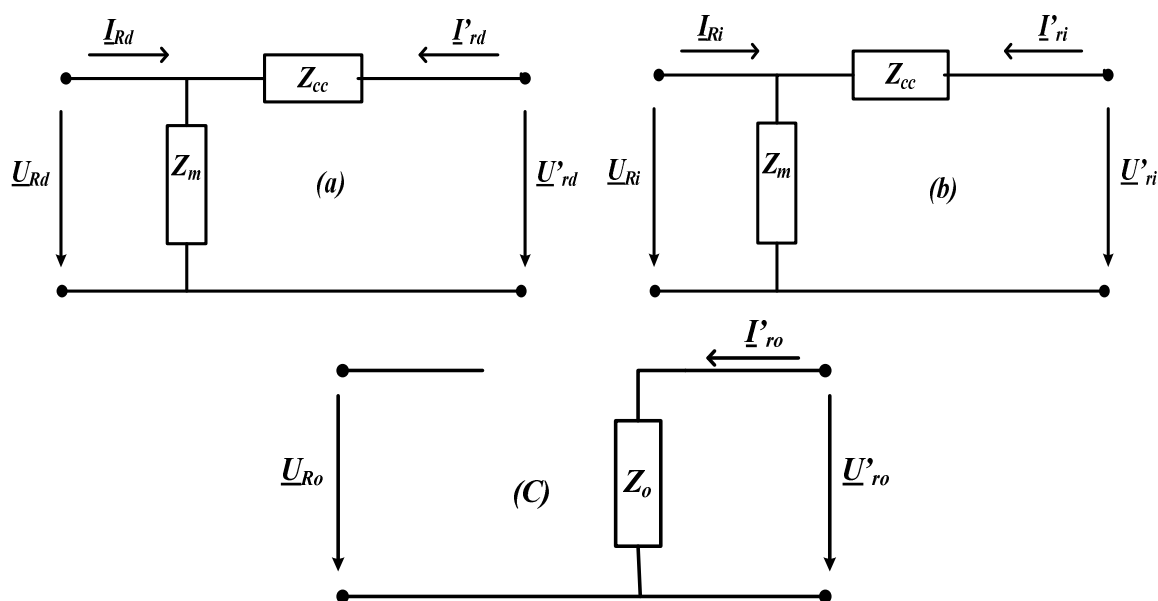


Fig. 2.5 – Esquemas equivalentes por fase de um transformador trifásico com ligação $Yyn0$: (a) Sistema direto; (b) Sistema inverso; (c) Sistema homopolar.

Perante os efeitos do desequilíbrio de cargas, tem-se como solução a inclusão de um enrolamento terciário nos transformadores de potência. A função do enrolamento terciário será realizada de uma forma em tudo idêntica àquela descrita no subcapítulo 2.2, onde se apresentou o mecanismo de supressão dos terceiros harmónicos das tensões. Neste caso em que se tem uma carga entre a fase e o neutro o enrolamento terciário permitirá que os fluxos homopolares criados pelo desequilíbrio da carga, induzam neste enrolamento três forças eletromotrizes E_o , que por sua vez provocam a circulação de uma corrente homopolar I_o , tal como se pode verificar na Fig. 2.6.

Esta corrente homopolar ir-se-á opor à causa que lhe deu origem, neste caso os fluxos homopolares, reduzindo-os drasticamente, deixando assim de existir o deslocamento do ponto neutro e consequentemente desequilíbrios nas tensões simples, tanto no primário como no secundário.

Por outro lado a corrente homopolar I_o compensará também as correntes das fases S e T do primário, deixando assim o transformador de conter qualquer tipo de desequilíbrio

Pode concluir-se portanto que sendo o transformador dotado de um enrolamento terciário, este deixa de ser vulnerável aos efeitos da presença quer de cargas desequilibradas entre a fase e o neutro, quer de terceiros harmônicos nas tensões.

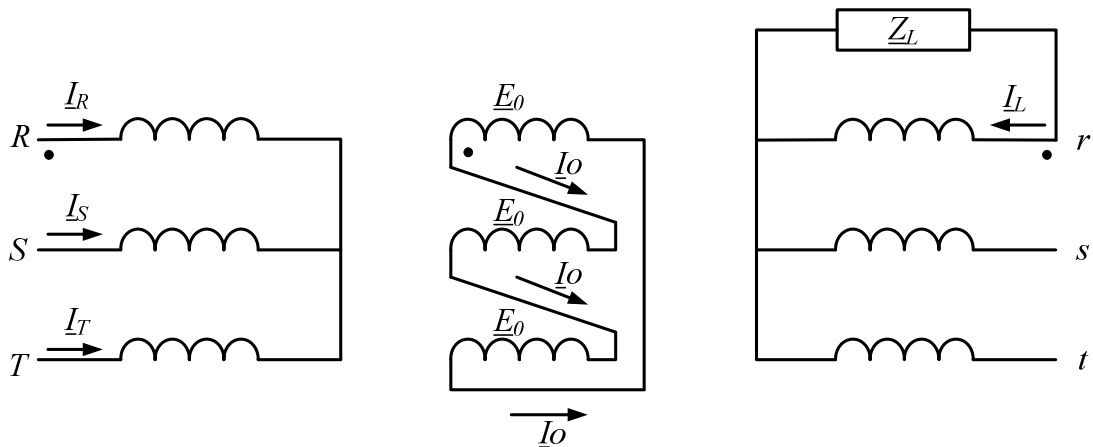


Fig. 2.6 – Transformador com enrolamento terciário e carga entre fase e neutro.

Os esquemas equivalentes por fase de um transformador com ligação $Yyn0d$, para um sistema direto, inverso e homopolar, são os representados na Fig. 2.7.

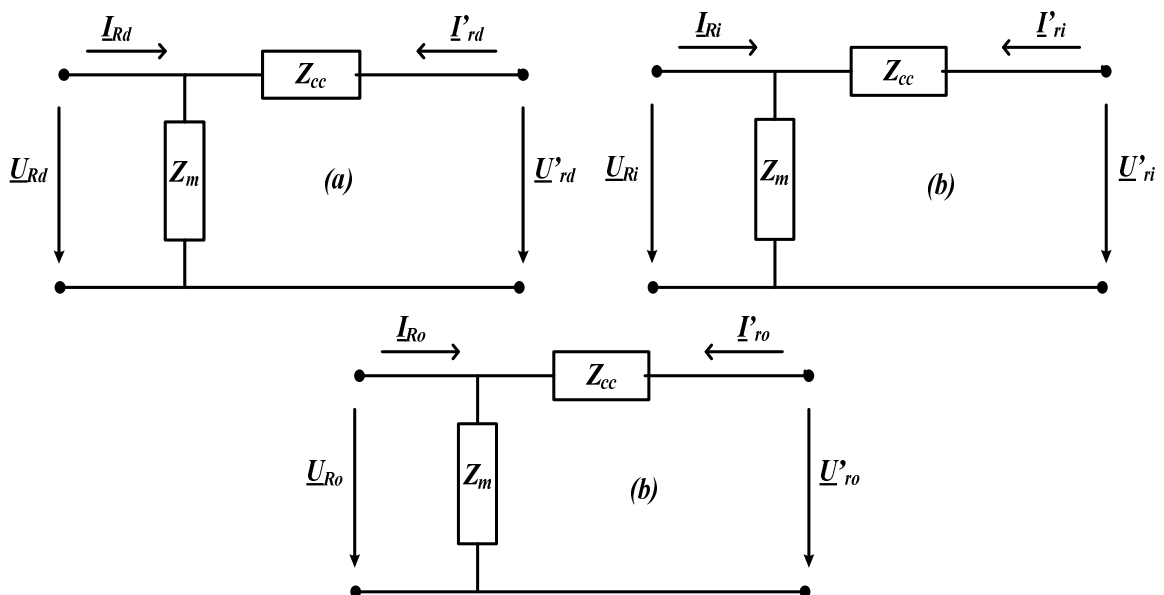


Fig. 2.7 – Esquemas equivalentes por fase de um transformador trifásico com ligação $Yyn0d$: (a) Sistema direto; (b) Sistema inverso; (c) Sistema homopolar.

2.3.2 Carga entre fase e o neutro num BTTM com ligação estrela-estrela

No caso de um banco trifásico de transformadores monofásicos, com uma ligação estrela-estrela com o neutro do enrolamento primário isolado e com ligação de uma carga entre uma fase e o neutro (Fig. 2.8), os fenómenos verificados serão qualitativamente os mesmos que aqueles que se verificam no caso do transformador trifásico de três colunas, contudo, mais visíveis [3].

Na Fig. 2.8 estão representados três transformadores monofásicos ligados entre si a partir de uma ligação estrela-estrela sem neutro acessível do lado do enrolamento primário, e com uma carga derivada entre fase e neutro. Uma configuração deste tipo funcionará de uma forma análoga a um único transformador monofásico em carga, ligado à rede por intermédio de duas bobinas, sendo essas bobinas o enrolamento primário de cada um dos outros dois transformadores.

Pelo facto de existirem bobinas ligadas ao enrolamento primário do transformador carregado, isso vai implicar a existência de quedas de tensão.

Por outro lado, uma vez que não existe neutro disponível no primário, por mais pequena que seja a corrente provocada por uma dada carga ligada entre uma fase e o neutro do secundário, existem sempre fluxos homopolares associados, e na medida em que comparativamente ao transformador trifásico de três colunas nesta configuração existe uma coluna a mais, os fluxos homopolares podem circular pela mesma. Provocar-se-á então um deslocamento do ponto neutro, com conseqüente desequilíbrio das tensões simples dos enrolamentos do secundário do BTTM, bem mais acentuado do que no caso de um transformador trifásico de três colunas.

Aumentam portanto as tensões simples nos dois transformadores não carregados, levando-os a um estado de elevada saturação, na medida em que a corrente que por cada um deles circula será neste caso uma corrente de excitação e que não será compensada do lado do secundário.

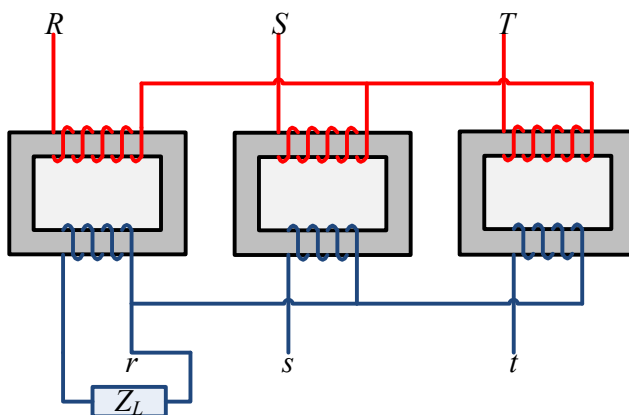


Fig. 2.8 – Banco trifásico de transformadores monofásicos alimentando uma carga entre uma fase e o neutro (ligação Y_{yn0}).

Por último, um tipo de transformador que apresenta um comportamento em tudo idêntico ao banco trifásico de três transformadores monofásicos é o transformador de cinco colunas.

A razão pela qual tal acontece é que neste transformador existem duas colunas magnéticas a mais³, sem qualquer enrolamento nas mesmas, como pode ser observado na Fig. 2.9. Portanto se a este transformador for ligada uma carga entre uma das fases e o neutro, vai existir a circulação de um fluxo homopolar que tal como no caso do banco trifásico poderá circular por estas duas colunas provocando o deslocamento do ponto neutro e conseqüente desequilíbrio das tensões simples dos enrolamentos do secundário do transformador.

Posto isto, é bem visível que nestes dois tipos de transformador, quando utilizados com ligação estrela-estrela sem neutro disponível do lado do primário, o enrolamento terciário desempenha um papel relevante no que diz respeito ao funcionamento com cargas entre fase e neutro, uma vez que são tipos de transformadores que facilitam a circulação dos fluxos homopolares, sendo os efeitos prejudiciais dos mesmos mais sentidos do que num transformador trifásico do tipo *core*.

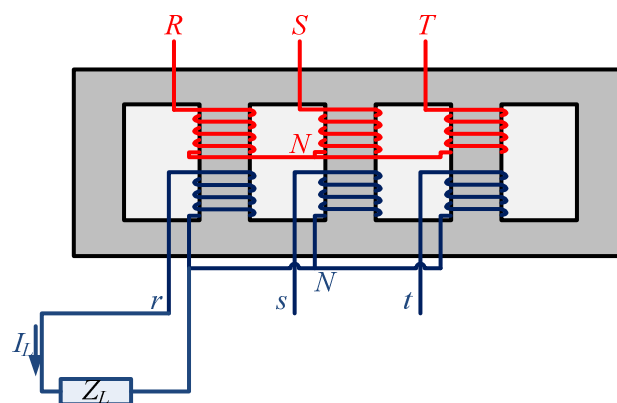


Fig. 2.9 – Transformador trifásico de cinco colunas magnéticas.

³ Este tipo de transformador, tem cinco colunas para ser mais baixo, para que o núcleo seja mais simétrico, para que apresente um Z_0 muito maior do que um transformador de três colunas magnéticas e por razões de facilidade de transporte.

Capítulo 3 – Validação experimental do papel do enrolamento terciário

Neste capítulo pretende-se fazer uma análise experimental sobre o funcionamento do enrolamento terciário. Procura-se deste modo evidenciar o impacto da presença do enrolamento terciário, no funcionamento de um transformador trifásico com ligação estrela-estrela com neutro isolado do lado do enrolamento primário. Desta forma foram realizados cinco ensaios, sendo três deles em vazio e os restantes com uma carga resistiva ligada entre uma fase do enrolamento secundário e o neutro da estrela do mesmo. O que diferencia cada um dos ensaios é a ligação efetuada no transformador tanto em vazio como em carga, como pode ser verificado ao longo do capítulo.

Para isso foram utilizados dois tipos de transformadores trifásico, sendo o primeiro um transformador trifásico do tipo *core* com três colunas magnéticas com potência nominal de 6 kVA sem qualquer cuba envolvente, possui quatro enrolamentos por coluna, com tensões nominais 220/220/127/127 V. O segundo será um banco trifásico de três transformadores monofásicos, transformadores esses de 25 VA de potência nominal e cada um é dotado de três enrolamentos com tensões nominais de 230/15/15 V.

No que diz respeito à aquisição de dados, esta foi executada utilizando o analisador de potência Yokogawa WT3000 representado no anexo D. Posteriormente os dados foram tratados com recurso aos *softwares Matlab* e ao *Diadem*.

3.1 Transformador trifásico de três colunas em vazio

No presente subcapítulo apresentam-se alguns resultados experimentais que demonstram o comportamento do transformador com uma ligação estrela-estrela em vazio, ou ainda quando este apresenta um enrolamento terciário. Deste modo com estes três primeiros ensaios, pretende-se demonstrar o papel do enrolamento terciário na supressão dos terceiros harmónicos nas tensões simples do transformador.

Na execução dos respetivos ensaios foi utilizado um sistema trifásico equilibrado de tensões com o valor de 220 V, 50 Hz por fase.

Na Fig. 3.1 estão representadas as formas de onda das correntes de excitação do transformador trifásico de três colunas magnéticas, com as ligações $Yy0$, $YNy0$ e $Yy0d$. Pode verificar-se que as três ondas apresentam algumas diferenças, que têm a ver essencialmente com a quantidade de terceiro harmónico que cada uma contém.

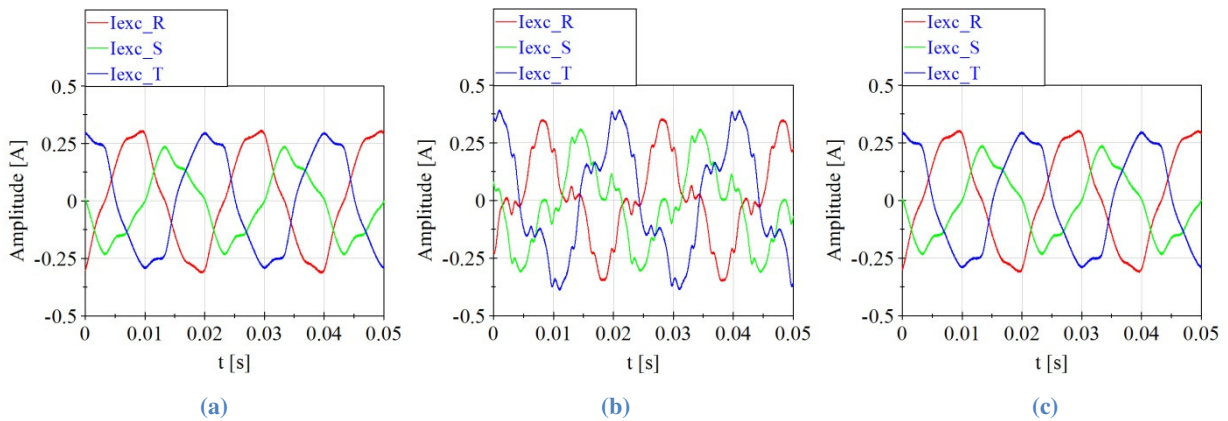


Fig. 3.1 – Representação das formas de onda das correntes de excitação: (a) Ligação Yy0; (b) Ligação YNy0; (c) Ligação Yy0d.

Como se pode observar na Fig. 3.2 (b), a ligação YNy0 apresenta uma componente de terceiro harmónico muito superior do que no caso dos ensaios com ligação Yy0 e Yy0d, Fig. 3.2 (a) e Fig. 3.2 (c). Tal resultado prende-se com o facto de na ligação YNy0 o condutor neutro permitir a circulação do terceiro harmónico das correntes de excitação, o que já não é possível nas outras duas ligações.

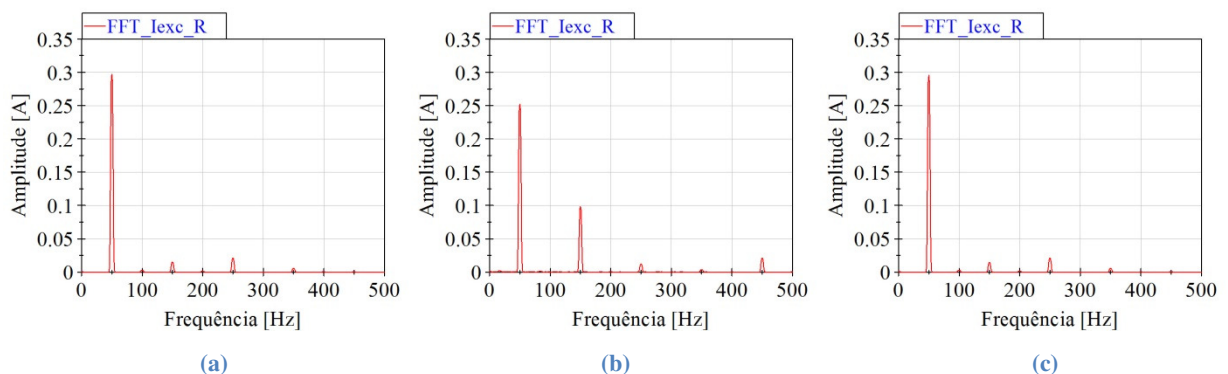


Fig. 3.2 – Representação do espetrograma das correntes de excitação da fase R do transformador: (a) Ligação Yy0; (b) Ligação YNy0; (c) Ligação Yy0d.

Quanto aos espetrogramas das correntes de excitação das fases S e T, encontram-se no Anexo B, uma vez que o comportamento das correntes de excitação para os diferentes tipos de ligação é o mesmo apresentado na fase R.

Na ligação Yy0d, apesar de não circularem terceiros harmónicos nas correntes de excitação, o enrolamento terciário anula a componente de terceiro harmónico presente nos fluxos, evitando assim que as tensões simples do secundário apresentem uma elevada componente de terceiro harmónico (Fig. 3.3). A corrente que circula no enrolamento terciário é a representada na Fig. 3.4 e apresenta essencialmente uma componente de terceiro harmónico.

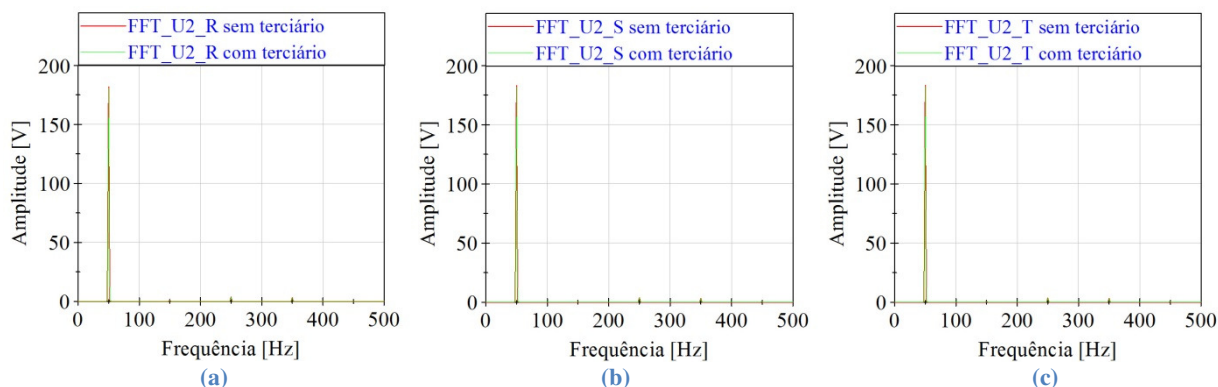


Fig. 3.3– Representação do espectrograma das tensões simples do enrolamento secundário do transformador, com ligação $Yy0$ e $Yy0d$: (a) Fase R; (b) Fase S; (c) Fase T.

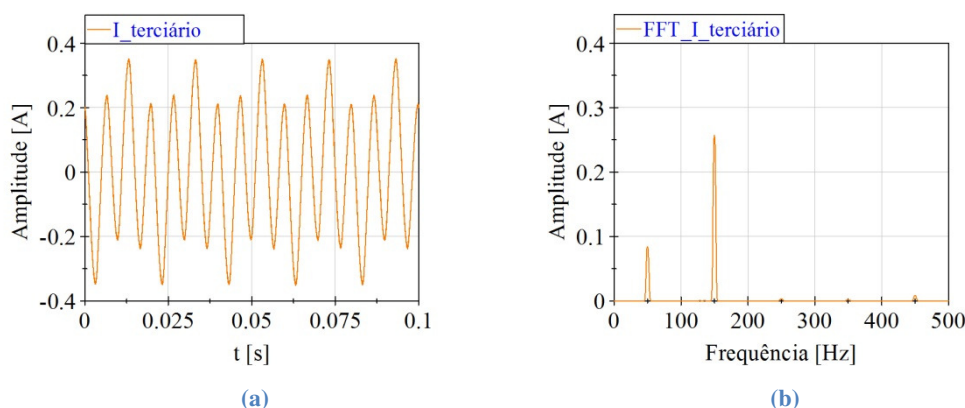


Fig. 3.4 – Corrente elétrica que circula no enrolamento terciário: (a) Forma de onda; (b) Espectrograma.

3.2 Transformador trifásico de três colunas com carga entre fase e neutro

Os resultados apresentados neste subcapítulo vão contribuir para a compreensão do papel do enrolamento terciário no que diz respeito à compensação feita por este, na presença de fluxos homopolares originados aquando da presença de uma carga ligada entre a fase r e o neutro, sendo essa carga neste caso, uma carga resistiva com valor $R_L = 22 \Omega$. Os ensaios foram executados com o transformador alimentado por um sistema trifásico equilibrado de tensões com o valor de 220 V, 50 Hz por fase.

O primeiro ponto a evidenciar prende-se com os desequilíbrios nas tensões simples do enrolamento secundário. Tal como se pode verificar na Fig. 3.5 (a), na ligação $Yyn0$ existe um ligeiro desequilíbrio das mesmas, sendo a tensão com menor amplitude a tensão simples da fase r (fase carregada). Contudo, esse desequilíbrio não é muito significativo, por razões que já foram descritas no Capítulo 2.

Com a incorporação do enrolamento terciário, esses desequilíbrios reduziram-se, não ficando as tensões exatamente iguais (Fig. 3.5 (b)), porque este enrolamento apenas compensa a componente homopolar das correntes da carga, não compensa a componente inversa.

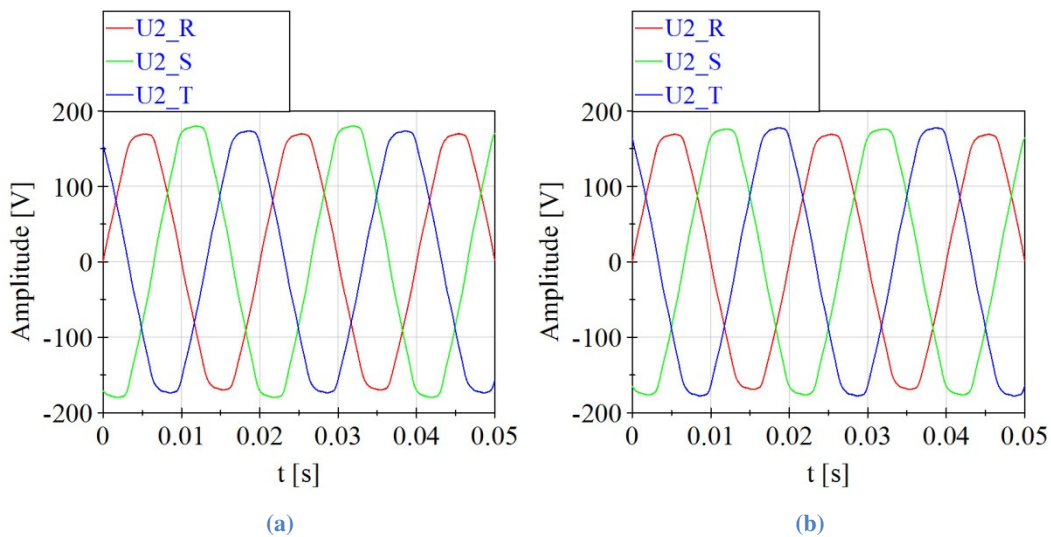


Fig. 3.5 – Representação das tensões simples do enrolamento secundário do transformador trifásico de três colunas: (a) Ligação Yyn0; (b) Ligação Yyn0d.

Esta compensa o   feita pelo enrolamento terciário através da circula o de uma corrente homopolar pelo mesmo, corrente esta que   exatamente a componente homopolar da corrente da carga que   dada pela expressão seguinte,

$$I_{ro} = \frac{1}{3} I_L. \quad (3.1)$$

Este resultado pode constatar-se, pela análise da figura Fig. 3.6 (a), e através da aplica o da equa o 3.1, verificando-se que $I_{ro} = 1.51 \text{ A}$. Observando a Fig. 3.6 (b) pode constatar-se que a corrente do terciário   de 1.38 A, valor muito próximo do calculado anteriormente.

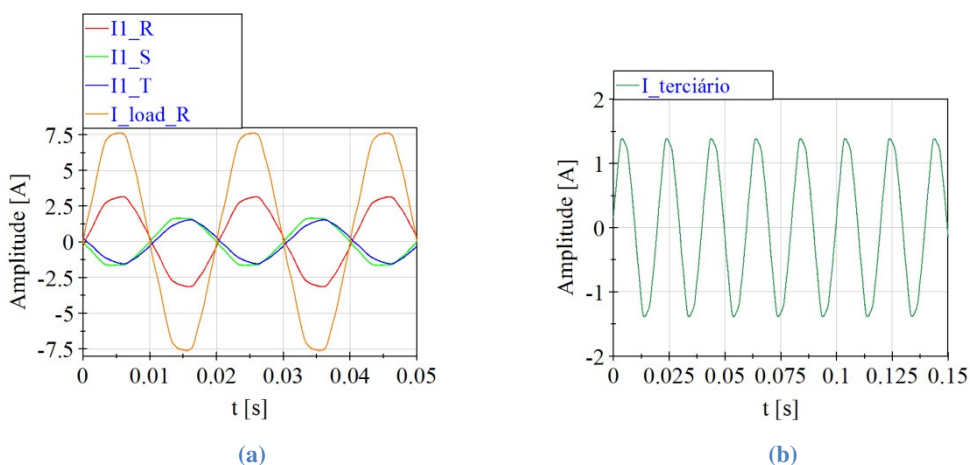


Fig. 3.6 – Representa o das correntes: (a) Correntes do primário por fase e corrente na carga; (b) Corrente no enrolamento terciário.

3.3 Banco trifásico de três transformadores monofásicos em vazio

Neste subcapítulo pretende demonstrar-se mediante a análise de alguns resultados experimentais, o papel que o enrolamento terciário desempenha na supressão dos terceiros harmónicos das tensões simples num banco trifásico de transformadores monofásico com ligação estrela-estrela, na medida em que este apresenta um funcionamento análogo a um transformador trifásico de fases dissociadas.

Para tal realizaram-se três ensaios em vazio, aplicando, tal como foi feito com o transformador trifásico de três colunas, as ligações $Yy0$, $YNy0$ e $Yy0d$. O sistema de alimentação utilizado neste caso, foi um sistema trifásico equilibrado de tensões com o valor de 230 V, 50 Hz, por fase.

Uma pequena condicionante da análise dos resultados obtidos nestes ensaios, prende-se com o facto de o transformador monofásico R , apesar de ter exatamente a mesma potência nominal e tensões nominais dos outros dois, não tem uma amplitude da corrente de excitação igual, como se pode observar na Fig. 3.7 (a). Contudo, mesmo assim dá para retirar algumas conclusões quanto ao comportamento deste tipo de máquina eléctrica na presença de um enrolamento terciário.

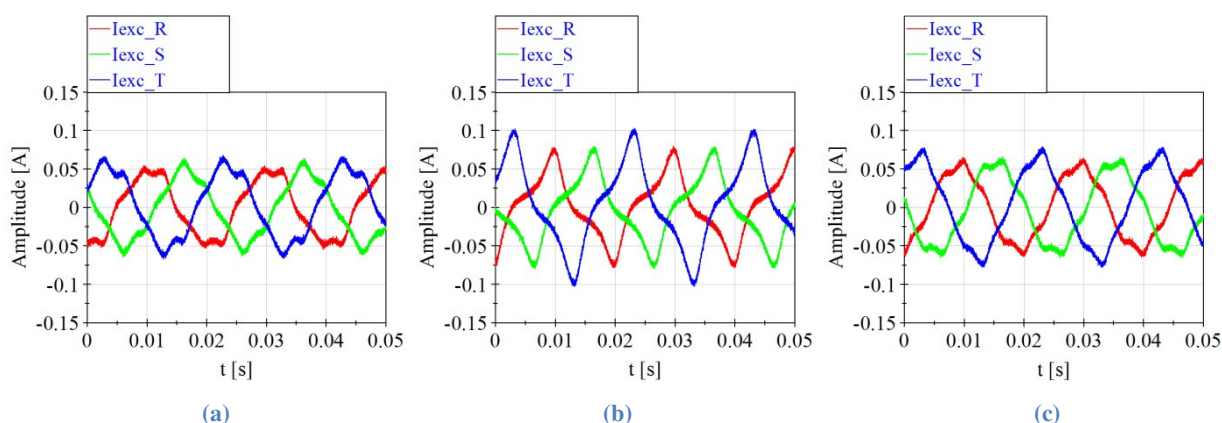


Fig. 3.7 – Correntes de excitação dos três transformadores monofásicos: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $NYy0$; (c) Ligação $Yy0d$

Pode ainda concluir-se que mesmo na ligação $Yy0$, as correntes de excitação apresentam uma componente de terceiro harmónico significativa, como se pode observar na Fig. 3.8 e na Tabela 3.1. Tal resultado deve-se ao facto dos transformadores estarem sujeitos a uma elevada saturação.

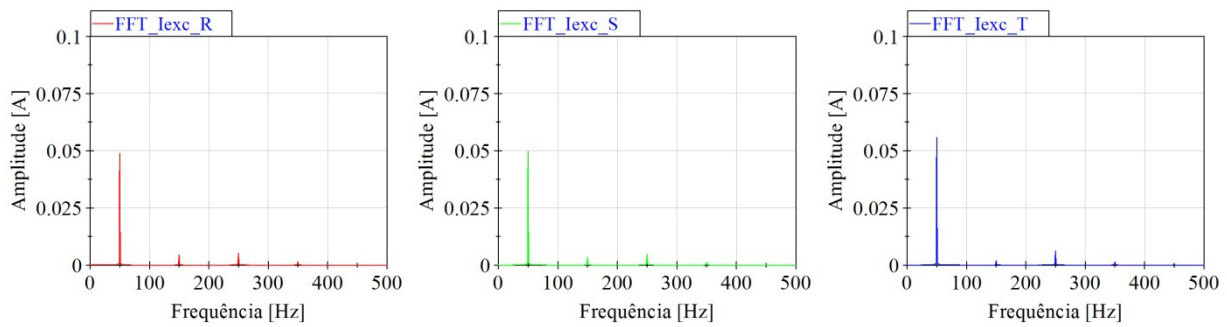


Fig. 3.8 – Representação do espectrograma das correntes de excitação do BTM, com ligação $Yy0$ (a) Fase R ; (b) Fase S ; (c) Fase T .

Tabela 3.1 – Decomposição harmônica das correntes de excitação do BTM.

Ligação $Yy0$			
Correntes do primário do BTM			
			% em relação ao fundamental
Transformador R	Fundamental	0.0489 A	100 %
	3º Harmónico	0.0045 A	9.35 %
Transformador S	Fundamental	0.0497 A	100 %
	3º Harmónico	0.0034 A	6.78 %
Transformador T	Fundamental	0.0558 A	100 %
	3º Harmónico	0.0019 A	3.49 %

É também possível constatar, com base na Fig. 3.9 que ao ligar o neutro do lado do enrolamento primário a amplitude da componente de terceiro harmónico aumentou, tal como já era esperado. Já na ligação $Yy0d$, o terceiro harmónico diminui em relação à ligação $Yy0$, uma vez que os transformadores deixam de estar sujeitos a elevadas saturações, fruto da compensação feita pelo enrolamento terciário.

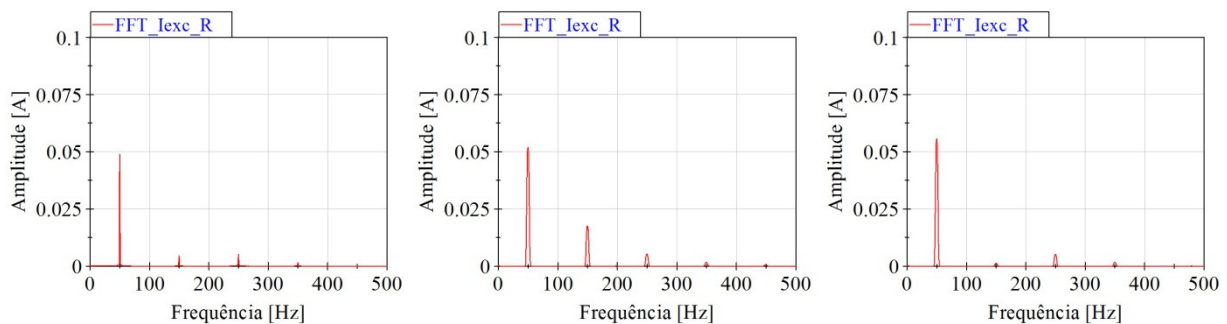


Fig. 3.9 – Representação dos espectrogramas da corrente de excitação da fase R (Transformador R): (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$.

Quanto às tensões simples do enrolamento primário, mesmo sendo tensões impostas pelo sistema de alimentação, verificaram-se grandes alterações na sua forma de onda, nos três tipos de ligações utilizados, tal como se pode constatar pela análise da Fig. 3.10. Confirma-se portanto, que a não circulação de terceiro harmónico nas correntes de excitação, neste tipo de configuração

de transformador trifásico, provoca o aparecimento de grandes quantidades de terceiro harmônico nas tensões simples do BTTM como é possível ver na Fig. 3.10 (a) e na Fig. 3.11(a).

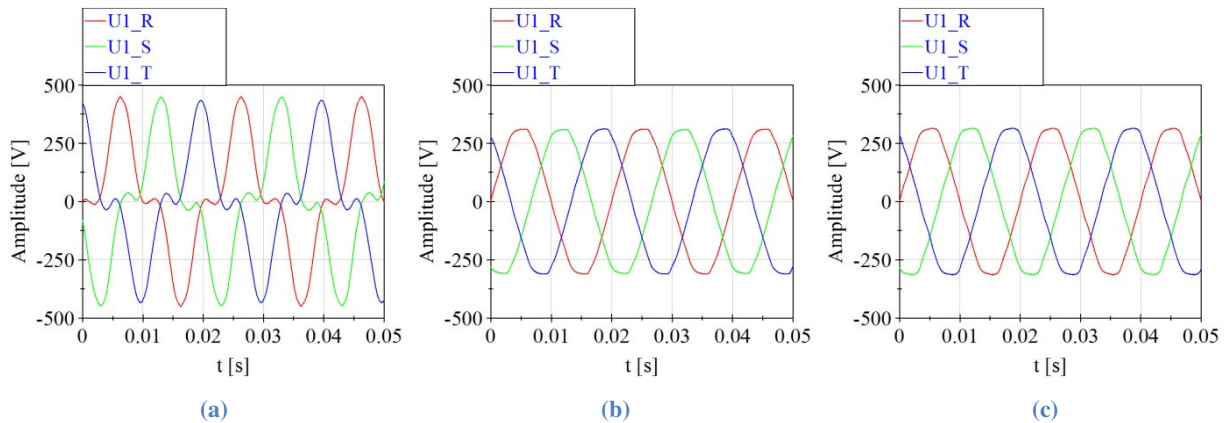


Fig. 3.10 – Formas de onda das tensões simples do enrolamento primário do BTTM: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$.

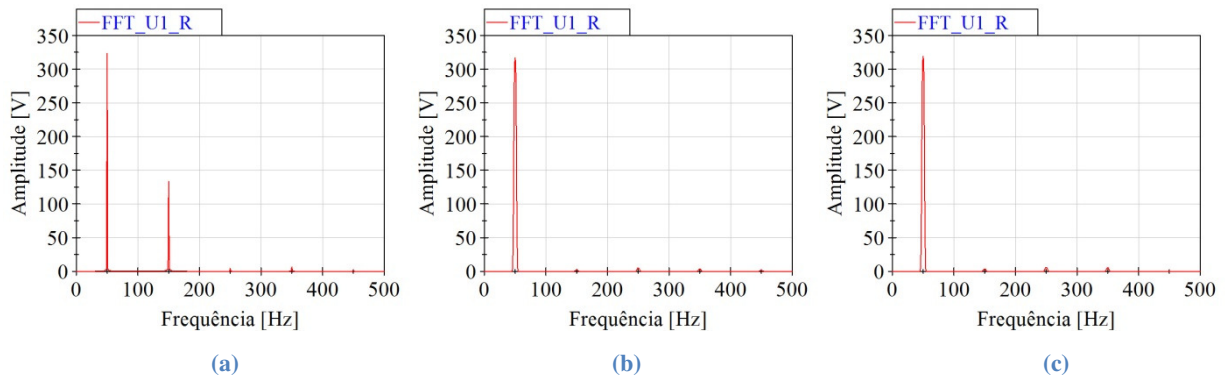


Fig. 3.11 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase R: (a) Ligação $Yy0$; (b) Ligação $YNy0$; (c) Ligação $Yy0d$.

Uma vez que os espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário se comportam da mesma forma para as fases R e S , estes resultados encontram-se no Anexo B.

3.4 Banco trifásico de três transformadores monofásicos com carga entre fase e neutro

Os resultados apresentados neste subcapítulo espelham o comportamento do BTTM na presença de uma carga resistiva entre a fase r e o neutro do enrolamento secundário. Os ensaios foram realizados alimentando o BTTM através de um sistema trifásico e equilibrado de tensões com o valor de 230 V, 50 Hz. As ligações utilizadas foram $Yyn0$ e $Yyn0d$.

Nestes ensaios, pode verificar-se que acontecem alguns fenómenos interessantes e com algumas diferenças comparativamente aos fenómenos observados com o transformador trifásico de três colunas.

Um aspeto a frisar prende-se com o facto das tensões simples do primário do BTTM com ligação $Yy0$, apresentarem uma componente de terceiro harmónico muito elevada, resultando em grandes desequilíbrios das mesmas, o que já não acontece quando se aplica um enrolamento terciário ao BTTM, uma vez que este elimina os terceiros harmónicos dos fluxos magnéticos originados pela corrente homopolar da carga. Tal conclusão pode retirar-se pela análise da Fig. 3.12 (a) e da Fig. 3.12 (b).

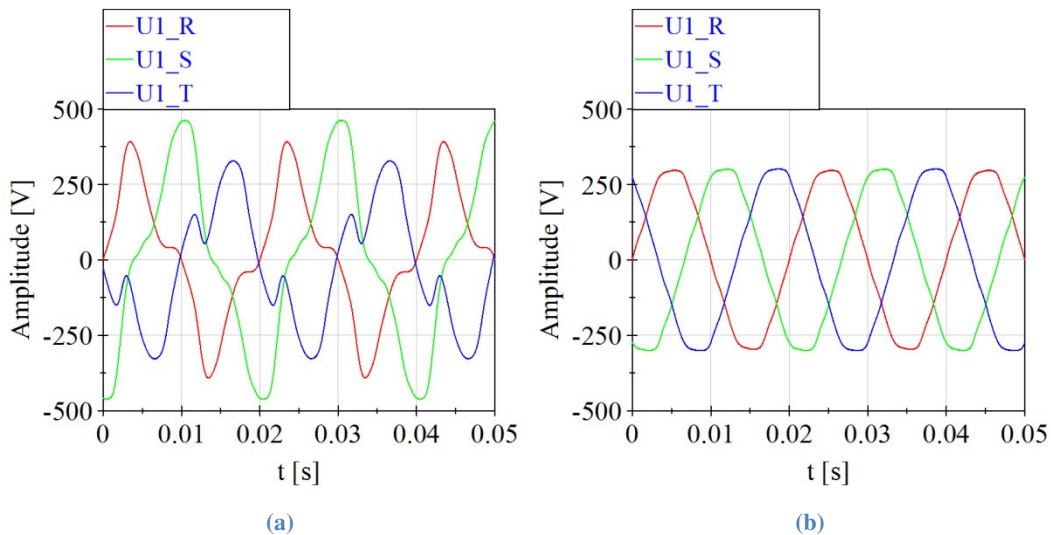


Fig. 3.12 – Representação das formas de onda das tensões simples do enrolamento primário do BTTM: (a) Ligação $Yyn0$; (b) Ligação $Yyn0d$.

Os espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM com ligação, $Yyn0$ e $Yyn0d$, estão representados na Fig. 3.13.

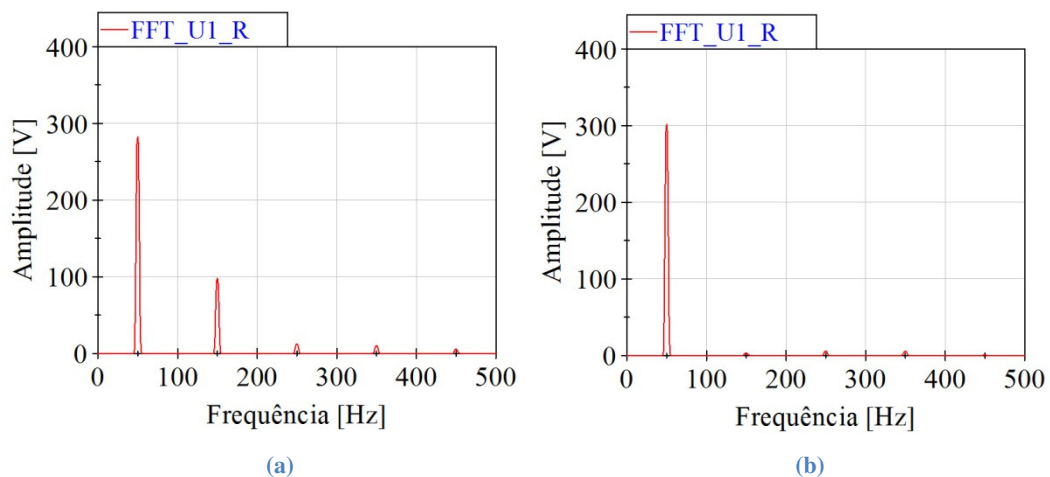


Fig. 3.13 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase R: (a) Ligação $Yyn0$; (b) Ligação $Yyn0d$.

Na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 encontram-se representados os termos fundamentais e os terceiros harmónicos das tensões simples do enrolamento primário do BTTM e pode constatar-se

o grande decréscimo do terceiro harmónico com a inclusão do enrolamento terciário, confirmando-se assim a teoria descrita no Capítulo 2.

Quanto aos espectrogramas das tensões simples do primário do BTTM das fases *S* e *T* estão representados no Anexo B.

Tabela 3.2 – Decomposição harmónica das tensões do enrolamento primário do BTTM com ligação *Yyn0*.

Ligação <i>Yyn0</i>			
Tensões do primário do BTTM			
			% em relação ao fundamental
Transformador <i>R</i>	Fundamental	282.42 V	100 %
	3º Harmónico	97.79 V	34.63 %
Transformador <i>S</i>	Fundamental	392.67 V	100 %
	3º Harmónico	97.25 V	24.77 %
Transformador <i>T</i>	Fundamental	265.81 V	100 %
	3º Harmónico	97.32 V	36.61 %

Tabela 3.3 – Decomposição harmónica das tensões do enrolamento primário do BTTM com ligação *Yyn0d*.

Ligação <i>Yyn0d</i>			
Tensões do primário do BTTM			
			% em relação ao fundamental
Transformador <i>R</i>	Fundamental	301.77 V	100 %
	3º Harmónico	2.94 V	0.97 %
Transformador <i>S</i>	Fundamental	306.52 V	100 %
	3º Harmónico	2.3 V	0.75 %
Transformador <i>T</i>	Fundamental	307.13 V	100 %
	3º Harmónico	2.42 V	0.79 %

Capítulo 4 – Métodos de diagnóstico de avarias nos enrolamentos dos transformadores

Ao longo de várias décadas, têm sido desenvolvidos e aplicados inúmeros métodos de diagnóstico de avarias em transformadores [13-16]. Com este capítulo pretende-se descrevê-los de uma forma breve e intuitiva, para que se fique a entender alguns dos processos que envolvem tais métodos de diagnóstico. Contudo e levando em linha de conta os trabalhos desenvolvidos nos últimos anos à volta do diagnóstico de avarias nos enrolamentos dos transformadores, o tipo de método utilizado nesta dissertação será baseado na análise das correntes de excitação, mais particularmente na representação do vetor de Park das mesmas.

4.1 Análise dos gases dissolvidos no óleo

Este tipo de diagnóstico consiste na análise dos gases dissolvidos no óleo isolante de transformadores imersos em óleo. Tais gases são originados por falhas ocorridas no transformador, tais como descargas parciais, arcos elétricos e sobreaquecimento do óleo ou do papel isolante. Normalmente a concentração destes gases depende da localização e da severidade da avaria.

Os gases mais perigosos são os gases combustíveis, como é o caso do Hidrogénio (H_2), o Eteno (C_2H_6), o Etileno (C_2H_4) e o Acetileno (C_2H_2). Estes gases podem levar mesmo o transformador a incendiar-se ou a explodir [13].

Desta forma, a presença e a concentração de tais gases acima de valores considerados normais⁴, constitui um dos critérios que associa a concentração destes gases a diversos tipos de avarias, caso contrário a máquina encontrar-se-á em estado normal de funcionamento. Esta avaliação é feita tendo em conta as normas CEI 60599 [17] e IEEE std C57.104-1991, que definem os valores típicos.

Mais recentemente, por forma a complementar a análise feita aos gases dissolvidos no óleo, procede-se também a análises físico-químicas das características do óleo por forma a detetar o teor de humidade, a acidez, o fator de dissipação dielétrica, a resistividade do óleo e a tensão de rotura. A conjugação dos resultados obtidos através dos diferentes testes realizados ao óleo isolante do transformador permitem, deste modo, criar índices de avaliação do estado de funcionamento do transformador. Estes índices vão de 0 a 4, sendo 0 sinónimo de excelente estado de conservação e 4 sinónimo de necessidade de cuidados a ter com o transformador [13].

⁴ Um valor normal de determinado gás, é um valor de concentração do mesmo no óleo até ao qual a experiência demonstra uma baixa ocorrência de avarias.

4.2 Grau de polimerização

A celulose constituinte do papel isolante é composta através de ligações químicas entre átomos de carbono, hidrogénio e oxigénio. Esta é facilmente degradada quando sujeita a ambientes hostis com excessiva presença de humidade, elevadas temperaturas e elevada presença de oxigénio [16].

Posto isto, este método consiste essencialmente na medição do comprimento dos polímeros de celulose. Contudo, para o efeito é necessária a recolha de amostras do papel isolante, o que requer a retirada de funcionamento do transformador.

Mais recentemente para determinar o estado de conservação do papel isolante dos enrolamentos dos transformadores, são também utilizados mais dois métodos, como é o caso do teste de análise à concentração de compostos de furano no óleo isolante e o teste baseado no rácio entre a concentração de CO_2 e CO . Este último apresenta algumas limitações, uma vez que a decomposição do próprio óleo produz CO_2 e CO [13].

No que diz respeito à análise da concentração de compostos de furano no óleo, trata-se de um método muito eficaz e com uma vantagem em relação à análise do grau de polimerização da celulose do papel isolante. Essa vantagem tem a ver com o facto de se tratar de um método de diagnóstico não evasivo, não sendo necessário retirar o transformador de serviço [13], [16].

4.3 Descargas parciais

As descargas parciais (DP) são normalmente causadas pela circulação do óleo refrigerante dentro da cuba. O óleo ao friccionar com os materiais constituintes do isolamento provoca o aparecimento de campos eléctricos de intensidade elevada, os quais dão origem a descargas parciais que poderão deteriorar o isolamento [18].

Estas descargas geram no seu ponto de origem ondas eletromagnéticas, acústicas e sobreaquecimentos. Teoricamente se estes fenómenos forem detetáveis está-se perante um cenário de avaria, sendo por isso este método de diagnóstico baseado na deteção de tais fenómenos originados pelas descargas parciais [18].

Recentemente para detetar estes fenómenos, provocados pelas descargas parciais, utilizam-se métodos de deteção de sinais de frequência ultra alta (UHF), uma vez que uma descarga parcial gera sinais normalmente muito curtos, com menos de 1ns de tempo de subida [19].

As DP geram sinais que contêm frequências na ordem dos GHz. A deteção baseada em UHF apresenta vantagens em relação a outros métodos de diagnóstico anteriormente desenvolvidos, como é o caso do método convencional referido na norma IEC60270 onde a gama de frequências de deteção é inferior a 1 MHz [19].

4.4 Temperatura

Têm sido adotadas inúmeras estratégias para desenvolver sensores de temperatura, adequados, que possam ser instalados nos enrolamentos dos transformadores. Existem diversos sistemas de medida que apresentam condições para poderem ser aplicados na prática em transformadores comerciais [18].

Os resultados mais promissores são os obtidos por dispositivos munidos de um transmissor de fibra ótica ligado a um sensor de cristal. Estes dispositivos demonstram grande potencial em testes de fábrica e até certo ponto em serviço. Contudo, as suas maiores limitações prendem-se com o facto de só ser possível colocar estes sensores durante o processo de fabrico ou reparação, e é extremamente difícil encontrar o ponto ótimo para os colocar, uma vez que são instalados na estrutura do isolamento em ambientes de alta tensão, devendo existir uma precaução redobrada, por forma a preservar a integridade elétrica e mecânica do sistema de isolamento [18].

4.5 Vibrações

A análise de vibrações produzidas durante o funcionamento dos transformadores tem sido abordada na tentativa de obter um método fiável e robusto de diagnóstico de deformações nos enrolamentos de transformadores de potência. A medição e a análise das vibrações podem, porém, revelar-se complexas tendo em conta as diversas fontes de vibrações existentes nos transformadores (interações magnéticas, interações mecânicas, comutação de cargas, etc.) [15].

Mais recentemente têm sido desenvolvidos estudos para melhorar este tipo de diagnóstico, por forma a torná-lo um método de diagnóstico *online*, assim como descobrir qual o ponto ótimo para colocar os acelerómetros, chegando-se à conclusão que o melhor local seria na parte inferior da cuba debaixo das colunas magnéticas [20].

Para tal foi desenvolvido um modelo que estima as vibrações existentes na cuba de um transformador de potência, tendo em conta todas as fontes de vibrações existentes no transformador, quando este se encontra em bom estado de funcionamento. Ao comparar os valores das vibrações estimados com os valores medidos podem retirar-se conclusões acerca do estado dos enrolamentos [20].

Este modelo foi testado num transformador de teste de 1500 kVA, construído com base num transformador de 60 MVA. Contudo, este transformador de teste não reproduz verdadeiramente um cenário real, sendo necessário validar tal modelo em transformadores existentes na rede elétrica [21].

4.6 Fluxo de fugas

Um método convencional para detectar alterações na geometria dos enrolamentos consiste na medição da indutância de fugas. Como resultado de um curto-circuito, o diâmetro do enrolamento interior tem tendência a diminuir, e o exterior a aumentar, provocando um aumento do fluxo de fugas entre os enrolamentos e conseqüentemente uma maior reactância de fugas. Todavia existem fatores que afetam a medição da indutância de fugas, tais como a influência da reactância de magnetização, o nível de tensão a que é efetuado o teste, os tipos de ligações, o tipo de núcleo do transformador e a precisão dos equipamentos de medida [22].

Mais recentemente foi concebido um modelo baseado em elementos finitos, que tem como objetivo a representação das linhas do fluxo de fugas de um transformador trifásico de três colunas. Através da análise dos resultados deste modelo pode concluir-se que quando o transformador se encontra em bom estado de funcionamento e não apresenta qualquer deformação na geometria dos enrolamentos, as linhas do fluxo de fugas apresentavam uma simetria horizontal em relação a uma linha que passa a meia altura do núcleo magnético. Pelo contrário, tal não acontece quando existe uma avaria nos enrolamentos do transformador, podendo assim identificar-se por intermédio deste método de diagnóstico, potenciais avarias nos enrolamentos do transformador [23].

4.7 Análise da resposta em frequência

O método em questão baseia-se na determinação da função de transferência do transformador, para através da mesma detectar deformações nos enrolamentos, comparando a função de transferência com uma previamente obtida. Uma deformação na geometria dos enrolamentos resulta na alteração da função de transferência do transformador [24].

Em termos práticos é injetado um impulso numa extremidade do transformador, e são medidos os espetros do impulso e da sua resposta na outra extremidade, obtidos a partir da aplicação da transformada de *Fourier*. A função de transferência é obtida através da divisão dos dois espetros [25].

Este tipo de diagnóstico, quando conciliado com a análise dos gases dissolvidos no óleo pode desempenhar um importante papel na determinação das condições mecânicas de um transformador [24].

4.8 Correntes de excitação

O método de diagnóstico tendo em conta as correntes de excitação baseia-se essencialmente na representação do Vetor de Park das mesmas. Este método de diagnóstico apresenta a vantagem de ser um método *online*, não existindo assim a necessidade de retirar os transformadores de serviço [14], [26].

A base sobre a qual assenta este método de diagnóstico baseia-se na elipticidade da representação do Vetor de Park das correntes de excitação, (VPCE), do transformador, sendo um dos pontos fulcrais deste método, a determinação das correntes de excitação com rigor e exatidão para qualquer nível de carga do transformador.

Tendo em conta que os tipos de ligações em estudo no que diz respeito ao diagnóstico de avarias foram as ligações estrela-estrela sem neutro no primário, com e sem enrolamento terciário, as correntes de excitação, são calculadas por intermédio das equações seguintes,

$$i_{exc_R} = i_R + \frac{N_2}{N_1} i_r. \quad (4.1)$$

$$i_{exc_S} = i_S + \frac{N_2}{N_1} i_s. \quad (4.2)$$

$$i_{exc_T} = i_T + \frac{N_2}{N_1} i_t. \quad (4.3)$$

Sendo i_R, i_S e i_T os valores instantâneos das correntes elétricas das fases R, S e T do enrolamento primário e i_r, i_s e i_t os valores instantâneos das correntes elétricas das fases r, s e t do enrolamento secundário.

A convenção utilizada ao longo da dissertação é a representada na Fig. 4.1.

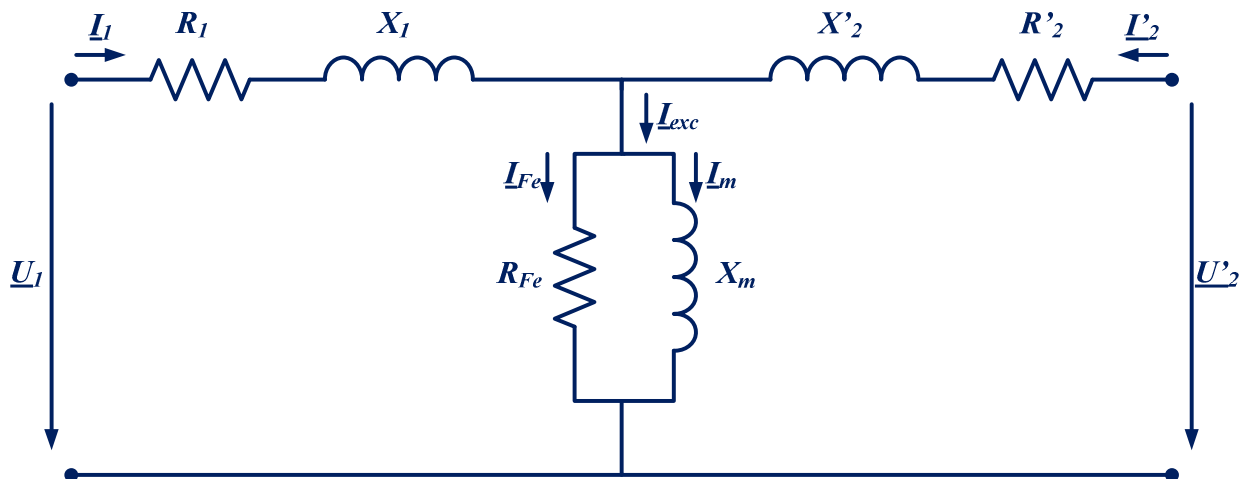


Fig. 4.1 – Esquema equivalente por fase de um transformador trifásico.

Obtidas as correntes de excitação calcula-se as componentes α e β através da equação,

$$\begin{bmatrix} i_{e\alpha} \\ i_{e\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{exc_R} \\ i_{exc_S} \\ i_{exc_T} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Quanto maior a elipticidade do respetivo Vetor de Park, maior será o fator de severidade da avaria, sendo este calculado por intermédio do EPVA (Extended Park's Vector Approach) das correntes de excitação, que consiste numa análise espectral do módulo do Vetor de Park das mesmas, módulo este dado pela equação 4.5 [27], [28].

$$i_{EPVA} = \sqrt{i_{e\alpha}^2 + i_{e\beta}^2}. \quad (4.5)$$

Tipicamente se não existir qualquer tipo de assimetria, o espetrograma do EPVA conterà apenas uma componente DC. Em caso de avaria, ou qualquer assimetria elétrica ou magnética, aparecerá no espetrograma do EPVA uma componente a $2f$ (100 Hz). Esta componente a 100 Hz vai introduzir uma elipticidade na representação do Vetor de Park das correntes de excitação. O fator de severidade da avaria, será dado pelo quociente entre a componente espectral $2f$ e a componente contínua do VPCE,

$$FS(\%) = \frac{i_{2f}}{i_{DC}} \times 100\%. \quad (4.6)$$

4.9 Matriz de simetrização

O Vetor de Park das correntes de excitação representa atualmente uma ferramenta muito importante no diagnóstico de avarias nos enrolamentos de transformadores de potência. Contudo, a assimetria do núcleo magnético e os harmónicos presentes nas correntes de excitação fazem com que a representação do VPCE, em condições normais de funcionamento, não seja igual à representação circular ideal. Tanto esta assimetria do núcleo magnético como a presença de componentes harmónicas nas correntes de excitação provocam uma elipticidade na representação do VPCE do transformador. Como tal, para que seja possível um diagnóstico de avarias fidedigno no circuito elétrico do transformador existe a necessidade que tais assimetrias sejam compensadas.

Um dos objetivos propostos em [10] foi o desenvolvimento de uma matriz de simetrização que compensasse as assimetrias do núcleo magnético, contudo foi detetado um pequeno erro na dedução da matriz de simetrização $[S]$. Este subcapítulo tem portanto como objetivo a correção desse erro e a demonstração mais uma vez da dedução da matriz de simetrização, por forma a que se perceba melhor qual a sua origem.

Da lei de Opkinson vem que,

$$\begin{bmatrix} \Phi_R \\ \Phi_S \\ \Phi_T \end{bmatrix} = [P]_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} f_R \\ f_S \\ f_T \end{bmatrix} = [P]_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} N_1 i_R \\ N_1 i_S \\ N_1 i_T \end{bmatrix} = N_1 \cdot [P]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Onde f_R , f_S e f_T representam os valores instantâneos das forças magnetomotrizes nos enrolamentos das fases R , S e T do enrolamento primário do transformador e $[P]_{3 \times 3}$, representa a associação de permeâncias das colunas, travessas e homopolares do circuito magnético do transformador.

Um transformador ideal tem o esquema magnético apresentado na Fig. 4.2, onde é possível definir um eixo de simetria vertical central. A relutância equivalente vista pelo fluxo ao circular na primeira coluna pode ser determinada associando as relutâncias magnéticas das colunas e travessas.

É demonstrado na Fig. 4.3 a dedução da relutância equivalente, sendo esta idêntica para as três colunas magnéticas, definindo assim $P'_{eq1} = P'_{eq2} = P'_{eq3} = \frac{1}{6\mathfrak{R}_t}$, sendo P'_{eq1} , P'_{eq2} e P'_{eq3} , as permeâncias magnéticas equivalentes ideais. O erro encontrado na dedução desenvolvida em [10], tem a ver precisamente com o denominador das relutância magnéticas, que em vez de ser 5 deve ser 6, como se pode constatar pela análise da Fig. 4.3.

Nesta dedução foi considerado que $\mathfrak{R}_c = 2\mathfrak{R}_t$, onde \mathfrak{R}_c e \mathfrak{R}_t representam a relutância magnética da coluna e da travessa do transformador, isto porque num transformador trifásico de três colunas o comprimento médio do percurso percorrido pelo fluxo da travessa é metade do da coluna [10].

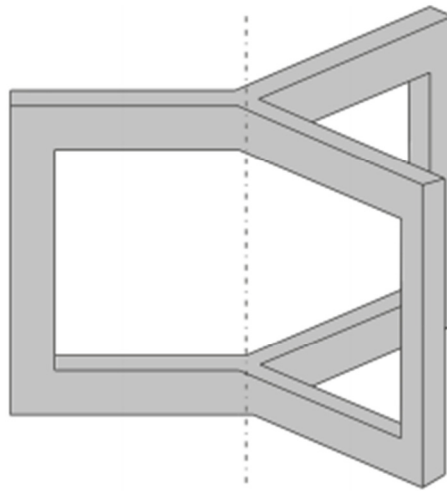


Fig. 4.2 – Representação de um núcleo trifásico ideal

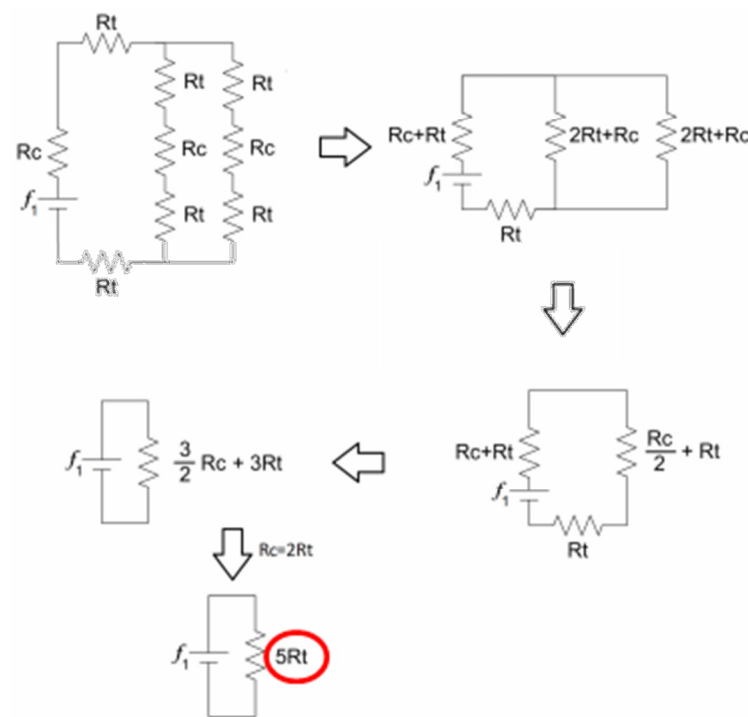


Fig. 4.3 – Dedução da relutância magnética equivalente vista pelos enrolamentos de cada coluna magnética do transformador.

Calculada a permeância magnética equivalente vista pelos fluxos que circulam em cada coluna, é agora possível constituir a matriz de permeâncias ideal:

$$\left[P'_{eq} \right] = \begin{bmatrix} P'_{eq1} & -\frac{1}{2}P'_{eq2} & -\frac{1}{2}P'_{eq3} \\ -\frac{1}{2}P'_{eq1} & P'_{eq2} & -\frac{1}{2}P'_{eq3} \\ -\frac{1}{2}P'_{eq1} & -\frac{1}{2}P'_{eq2} & P'_{eq3} \end{bmatrix} = \frac{1}{6\mathfrak{R}t} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Nas Fig. 4.4 e Fig. 4.5 são ilustradas as deduções das novas relutâncias equivalentes reais, vistas pelo fluxo que circula pelas colunas magnéticas de um transformador real.

Tendo em conta as assimetrias apresentadas por um transformador do tipo *core*, (Núcleo de três colunas magnéticas) pode constatar-se que as relutâncias magnéticas vistas pelos fluxos que circulam na primeira e terceira coluna são idênticas, definindo-se assim $P_{eq1} = P_{eq3} = \frac{3}{16R_t}$. Atribui-se do mesmo modo $P_{eq2} = \frac{1}{4R_t}$ à relutância vista pelo fluxo que circula na coluna central.

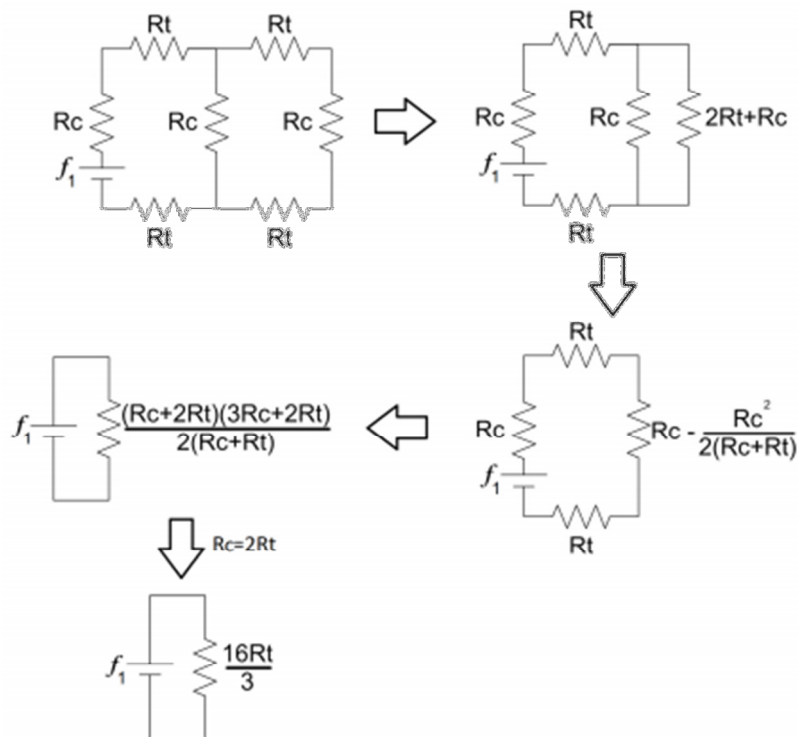


Fig. 4.4 – Dedução da relutância magnética equivalente vista pelos fluxos da primeira e terceira coluna.

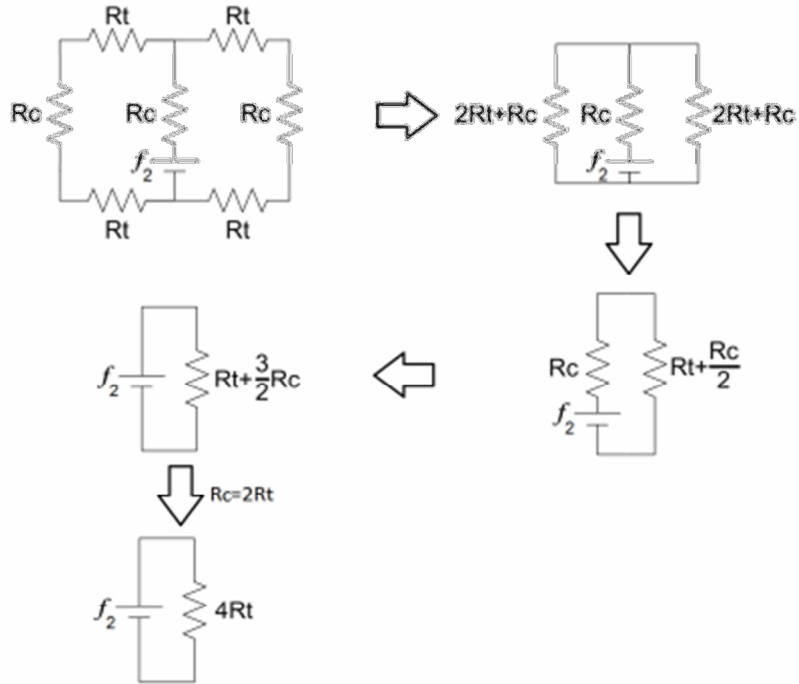


Fig. 4.5 – Dedução da relutância magnética equivalente pelo fluxo da coluna central.

Em [9] é definida a matriz de associação das permeâncias de um transformador real de três colunas, $[P_{eq}]$, usada no modelo de simulação computacional descrito na secção 3.1. A sua apresentação simplificada através das permeâncias equivalentes vistas pelos fluxos das três colunas é dada por:

$$[P_{eq}] = \frac{3}{16\mathfrak{R}t} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Seguidamente define-se a matriz da transformação de, $[Park]$, um sistema trifásico para bifásico,

$$[Park] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

a matriz de transformação, $[Park]^{-1}$ de um sistema bifásico para um sistema trifásico:

$$[Park]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Aplicando as duas na equação 4.7 obtém-se, no caso de um transformador trifásico ideal:

$$\begin{bmatrix} \Phi_\alpha \\ \Phi_\beta \end{bmatrix} = N_1 \left([Park] \cdot [P'_{eq}]_{3 \times 3} \cdot [Park]^{-1} \right) \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Quanto à matriz de permeâncias ideal, é a seguinte.

$$[P'_{\alpha\beta}] = [Park] \cdot [P'_{eq}]_{3 \times 3} \cdot [Park]^{-1} = \frac{1}{6\mathfrak{R}t} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

De forma análoga, aplicando a matriz de permeâncias a um transformador real de três colunas magnéticas, $[P_{eq}]$, obtém-se:

$$[P_{\alpha\beta}] = \frac{1}{16\mathfrak{R}t} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{6} \\ -\frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{11}{6} \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Posto isto, utilizando 4.13 e 4.14 pode escrever-se o seguinte:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}_{ideal} = [P'_{\alpha\beta}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_\alpha \\ \Phi_\beta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

e

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}_{real} = [P_{\alpha\beta}]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_\alpha \\ \Phi_\beta \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Substituindo 4.16 em 4.17, tem-se que,

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}_{ideal} = \begin{bmatrix} P_{\alpha\beta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}_{real}, \quad (4.17)$$

Onde o produto entre as matrizes de permeância é o fator de assimetria entre as correntes de excitação reais e as correntes de excitação ideais. Este fator de assimetria indicará então a matriz de simetrização $[S]$, a ser aplicada às correntes de excitação reais, transformadas previamente para um referencial $\alpha\beta$ que é dada por:

$$[S] = 6\Re_t \frac{3}{16\Re_t} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{6} \\ -\frac{\sqrt{3}}{6} & \frac{11}{6} \end{bmatrix} = \frac{9}{8} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\sqrt{3}}{9} \\ -\frac{\sqrt{3}}{9} & \frac{11}{9} \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

Capítulo 5 – Diagnóstico de avarias em transformadores com enrolamento terciário

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados no âmbito do estudo de diagnóstico de avarias em transformadores com enrolamento terciário. Tendo em conta que os resultados da aplicação do vetor de Park das correntes de excitação, assim como a aplicação da simetriação das correntes de excitação, já foram abordados em [9] e em [10], os resultados obtidos no âmbito desta dissertação focar-se-ão essencialmente na aplicação deste método de diagnóstico em transformadores trifásicos com enrolamento terciário.

Na realização dos diversos ensaios, foram considerados dois cenários diferentes, no que diz respeito à alimentação do transformador trifásico de três colunas magnéticas. Primeiramente foi aplicado um sistema trifásico e equilibrado de tensões ao transformador, e num segundo momento, aplicou-se um sistema trifásico desequilibrado de tensões, por forma a desenvolver uma forma fiável de diagnóstico de avarias nos enrolamentos do transformador, caso se verifique tal cenário.

No que diz respeito à aquisição dos dados durante os diversos ensaios, foi utilizado um sistema PXI, e caixas de medida, de modo a gravar os dados relativos às correntes e às tensões do transformador. Posteriormente os dados obtidos foram processados, recorrendo aos *softwares* Matlab e Diadem. Na representação do VPCE filtrado, o filtro utilizado foi um filtro passa baixo Butterworth de 5ª ordem de 125 Hz a fim de manter a amplitude da componente 50 Hz das correntes de excitação.

5.1 Ensaios com alimentação equilibrada

Estes ensaios realizaram-se aplicando ao enrolamento primário (enrolamento de 220 V), um sistema trifásico de tensões equilibrado, com uma amplitude de 220 V, 50 Hz por fase. Foram realizados diversos ensaios, com diferentes níveis de carga, por forma a demonstrar que a representação do Vetor de Park das correntes de excitação não sofre alterações tendo em conta o regime de carga, tal como já tinha sido referido em [28].

No Anexo C apresentam-se resultados obtidos através da análise de um ensaio em vazio, um com carga trifásica resistiva equilibrada, outro com uma carga monofásica resistiva entre fase e neutro e outro com uma carga monofásica indutiva entre fase e neutro, e em todos eles se verifica que as representações do VPCE, pouco ou nada se altera, tendo em conta o nível de carga. Posto isto, e tendo em conta que o objetivo desta dissertação é o diagnóstico de avarias em transformadores com enrolamento terciário, neste subcapítulo, consideram-se apenas dois níveis

de carga, sendo eles uma carga resistiva equilibrada e uma carga monofásica resistiva entre fase e neutro

5.1.1 Ensaios sem avarias no transformador

5.1.1.1 Carga trifásica equilibrada

Neste ensaio considerou-se que o transformador não tem qualquer avaria nos seus enrolamentos, foi alimentado por um sistema equilibrado de tensões e alimenta uma carga trifásica resistiva equilibrada, com o valor $R_L=21 \Omega$ por fase. Os tipos de ligações utilizadas foram, uma ligação $Yy0$ e uma ligação $Yy0d$.

A Fig. 5.1 (a) ilustra as componentes α e β das correntes de excitação do transformador com e sem enrolamento terciário, antes e depois de aplicar a matriz de simetrização. Como se pode verificar a presença do enrolamento terciário, não afeta em nada as representações do VPCE, sendo estas coincidentes no caso de existir ou não enrolamento terciário. Pode desta forma dizer-se que este método de diagnóstico será também válido em transformadores trifásicos com ligação estrela-estrela sem neutro do lado do enrolamento primário, dotados com este tipo de enrolamento de compensação.

Por outro lado na Fig. 5.1 (b) pode constatar-se que mesmo depois das correntes de excitação serem filtradas, os resultados não se alteram, estando portanto ambas as representações em concordância.

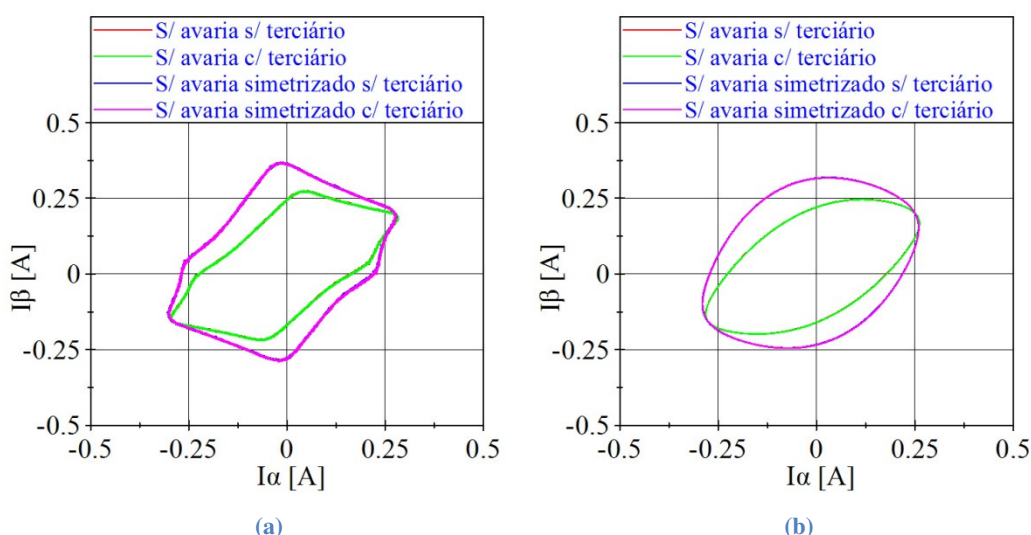


Fig. 5.1 – Representação do VPCE do transformador quando alimenta uma carga resistiva trifásica equilibrada (ligações $Yy0$ e $Yy0d$): (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

Na Fig. 5.2 está ilustrado o EPVA das correntes de excitação do transformador com e sem terciário, sendo a Fig. 5.2 (a) o EPVA experimental real e a Fig. 5.2 (b) o EPVA experimental

simetrizada. Tal como já foi referido no subcapítulo 4.7, o EPVA contém uma componente DC e uma componente sinusoidal ao dobro da frequência fundamental ($2f = 100$ Hz), componente esta que resulta da existência de uma assimetria elétrica ou magnética no transformador.

Os fatores de severidade para cada uma das representações do EPVA, tanto no caso em que existe um enrolamento terciário, como no caso em que não existe são os representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Representação dos fatores de severidade do ensaio sem avaria no transformador com carga trifásica equilibrada.

		I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
Sem matriz de simetriação	Sem terciário	0.244	0.080	32.70 %
	Com terciário	0.244	0.080	32.66 %
Com matriz de simetriação	Sem terciário	0.277	0.055	19.86 %
	Com terciário	0.277	0.055	19.86 %

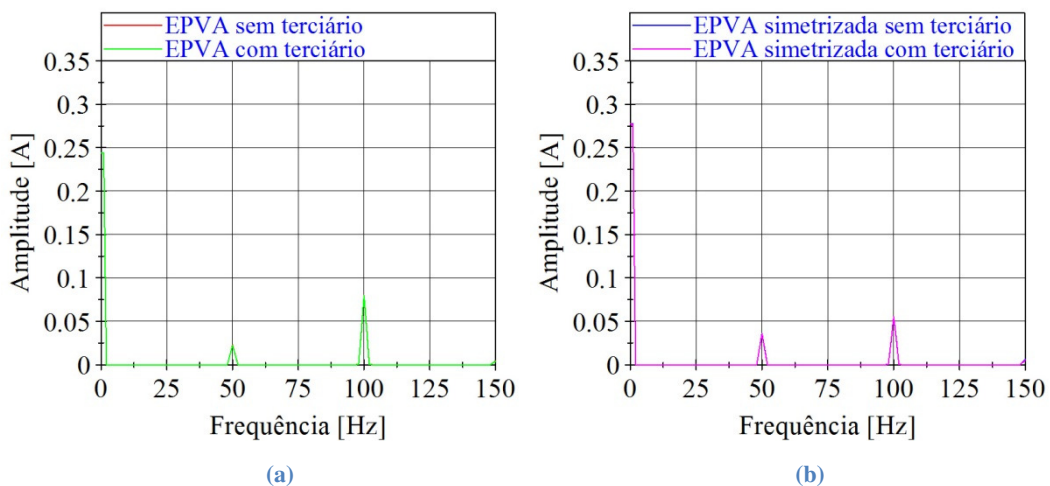


Fig. 5.2 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga trifásica equilibrada: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Pode concluir-se portanto que antes da compensação das assimetrias do núcleo magnético do transformador, por intermédio da aplicação da matriz de simetriação, existe um valor elevado do fator de severidade podendo assim conduzir-nos a um mau diagnóstico de avarias. Ao aplicar a matriz de simetriação, a componente DC aumenta e por outro lado a componente a 100 Hz, representativa de uma assimetria existente, diminui com a consequente diminuição do fator de severidade, levando assim a um diagnóstico mais fidedigno.

Mais uma vez é de grande importância referir que esta técnica de diagnóstico se revela eficaz, tanto na presença do enrolamento terciário no transformador como na sua ausência, na medida em que os resultados obtidos apresentam uma diferença inferior a 1 %.

5.1.1.2 Ensaio com carga resistiva entre fase e neutro

Seguidamente apresentam-se alguns resultados obtidos com carga desequilibrada, nomeadamente uma carga entre fase e neutro, caso em que o enrolamento terciário desempenha um importante papel. Neste ensaio a carga utilizada trata-se de uma carga resistiva com o valor $R_L = 14 \Omega$.

A Fig. 5.3 ilustra o VPCE do transformador com e sem terciário, antes e depois de ser aplicada a matriz de simetrização. A Fig. 5.3 (a) representa o VPCE experimental real e a Fig. 5.3 (b) o VPCE obtido depois das correntes de excitação serem sujeitas a filtragem. Em ambos os casos os resultados obtidos são idênticos, notando-se apenas uma pequena diferença entre a representação do VPCE sem terciário e com terciário. Esta pequena diferença deve-se ao facto de com este tipo de carga o enrolamento terciário estar a desempenhar o papel de compensar os fluxos homopolares criados pela carga, circulando através do mesmo uma corrente homopolar, contudo são diferenças insignificantes.

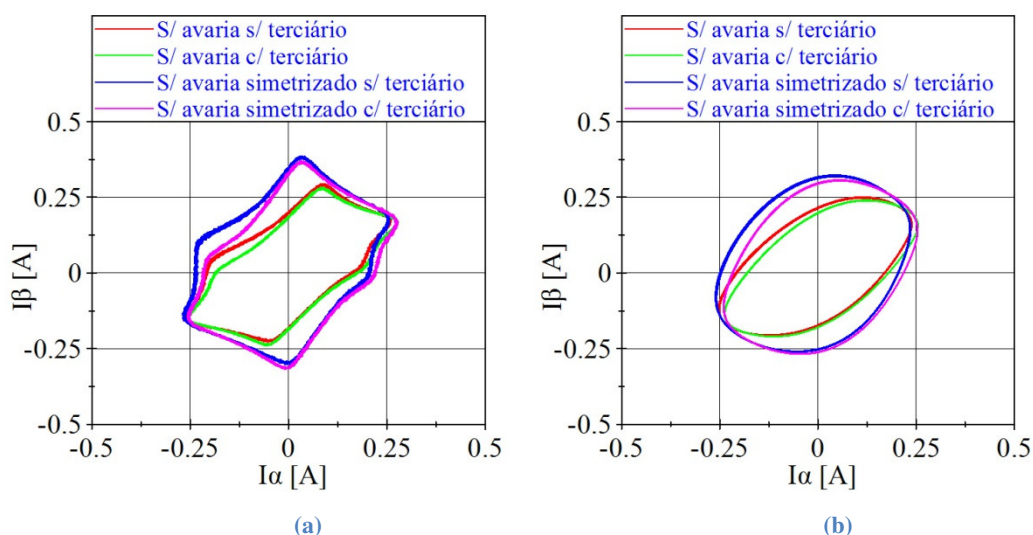


Fig. 5.3 – Representação do VPCE quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

Calculando posteriormente o EPVA das correntes de excitação, do transformador, Fig. 5.4, mais uma vez com e sem enrolamento terciário obtiveram-se os fatores de severidade representados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Representação dos fatores de severidade do ensaio sem avaria no transformador com carga resistiva entre fase e neutro.

		I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
Sem matriz de simetriação	Sem terciário	0.232	0.071	30.60 %
	Com terciário	0.230	0.076	32.91 %
Com matriz de simetriação	Sem terciário	0.266	0.056	21.09 %
	Com terciário	0.262	0.063	24.12 %

Também neste ensaio se verificam as mesmas conclusões retiradas em 5.1.1.1, verificando-se mais uma vez que a existência ou não do enrolamento terciário, não provoca alterações de relevo nas representações tanto do VPCE, como do EPVA. Verifica-se, tal como seria de esperar, o decréscimo dos fatores de severidade, ao aplicar a matriz de simetriação.

Pode então reafirmar-se que este método de diagnóstico baseado nas correntes de excitação é extremamente robusto, mesmo com cargas desequilibradas.

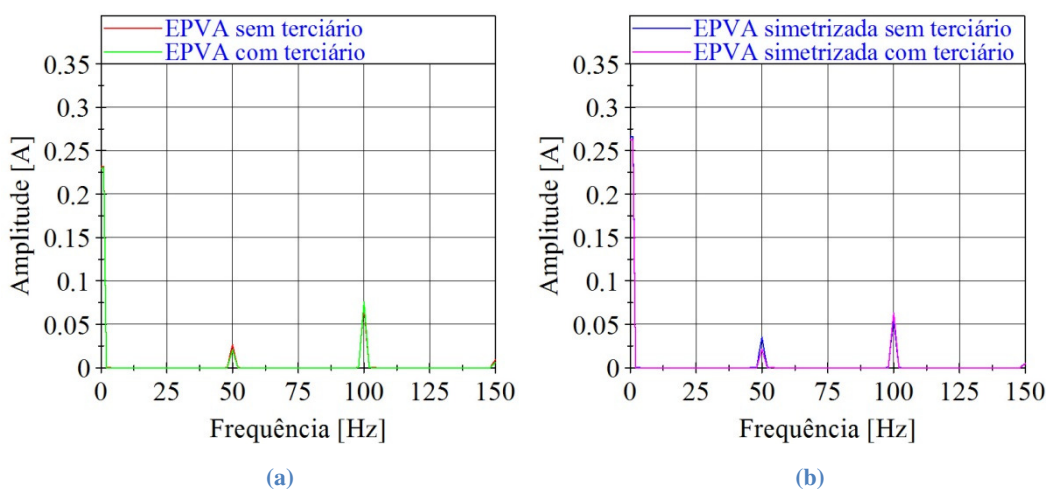


Fig. 5.4 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetriasadas.

5.1.2 Curto-circuito entre espiras no enrolamento primário

Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos por intermédio de ensaios ao transformador em situação de avaria no enrolamento primário. A alimentação foi mantida, e os tipos de ligações utilizados são, $Yyn0$ e $Yyn0d$.

Utilizou-se uma resistência variável por forma a executar os curto-circuitos entre espiras de uma forma controlada. Foram portanto curto-circuitadas 5 % das espiras do enrolamento primário, e a resistência variável foi ajustada para um valor $R_{cc}=1.2 \Omega$, para que a corrente de curto-circuito fosse perto da corrente nominal do enrolamento primário (enrolamento de 220 V).

Uma vez que em [10] os ensaios realizados com presença de avarias foram executados com uma carga resistiva trifásica simétrica, e tendo em conta que já foi demonstrado que o regime de carga é indiferente neste tipo de diagnóstico, optou-se por uma carga resistiva entre fase e neutro.

5.1.2.1 Fase R

Na Fig. 5.5, encontra-se ilustrado o VPCE no caso em que existe um curto-circuito entre espiras no enrolamento primário da fase R do transformador. Como se pode verificar em 5.1.1.2, na ausência de avaria, a forma do VPCE era aproximadamente circular, após normalização. Neste caso, em que existe uma avaria na fase R do enrolamento primário do transformador, o VPCE passa a ter a forma de uma elipse com o seu eixo maior orientado segundo a fase em que se encontra a avaria [9], neste caso a fase R. Tal como seria de esperar, a introdução da simetrização das correntes de excitação provocam uma diminuição da elipticidade do VPCE e consequente deslocamento no sentido horário, tal como já se tinha verificado em [10]. Tal comportamento é visível quer tenhamos enrolamento terciário quer não.

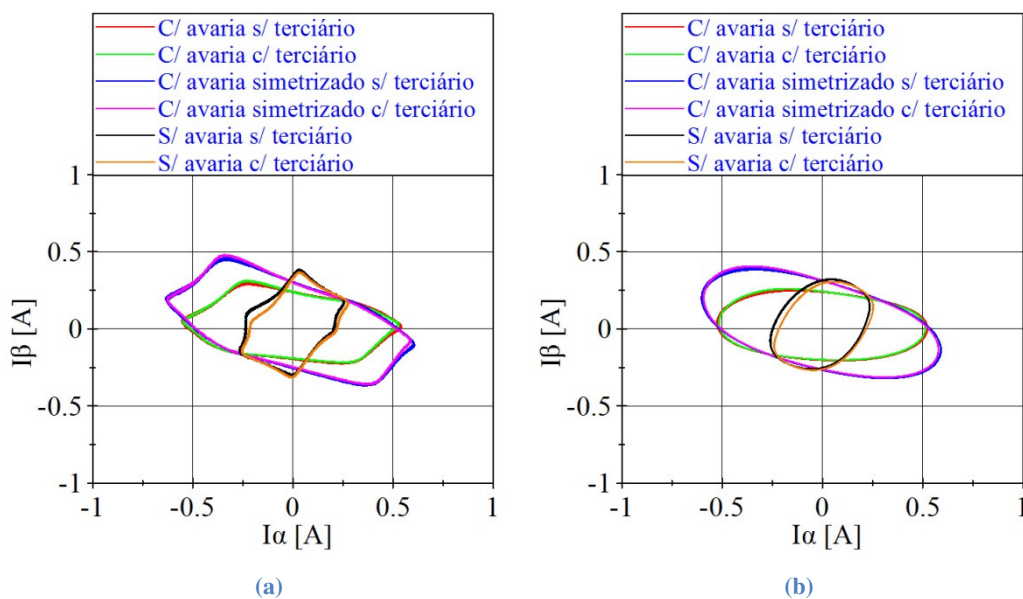


Fig. 5.5 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase R em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

A Fig. 5.6, ilustra o EPVA das correntes de excitação do transformador, na presença de uma avaria no enrolamento primário da fase R e pode constatar-se que a componente DC do EPVA aumentou quase para o dobro, assim como a componente ao dobro da frequência fundamental, o que se traduziu num aumento, como já seria de esperar, dos fatores de severidade da avaria, quando comparados com o ensaio sem avaria, como se pode constatar na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Representação dos fatores de severidade do ensaio com 5 % das espiras na fase R do enrolamento primário do transformador em curto-circuito e com carga resistiva entre fase e neutro.

		I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.393	0.140	35.62 %
	Com terciário	0.389	0.136	34.96 %
Com matriz de simetrização	Sem terciário	0.474	0.163	34.39 %
	Com terciário	0.471	0.159	33.76 %

Quanto à diminuição da elipticidade do VPCE, provocada pela simetrização das correntes de excitação, esta provoca por sua vez uma ligeira diminuição do fator de severidade. Mais uma vez é possível verificar, tanto pela representação do VPCE, como do EPVA, que a existência do enrolamento terciário, em nada altera os resultados obtidos no diagnóstico.

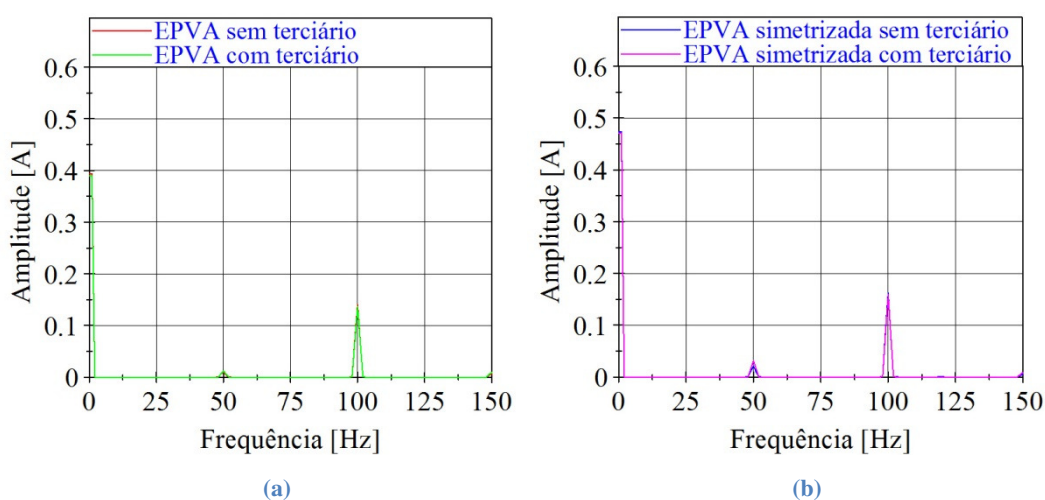


Fig. 5.6 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase R curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

No Anexo C encontram-se os resultados obtidos nos ensaios com curto-circuito entre espiras nas fases S e T do enrolamento primário. A Tabela 5.4 apresenta os fatores de severidade da avaria evidenciando as diferenças nas fases R, S e T.

No caso de a avaria ser na fase S, pode verificar-se que a elipse se encontra orientada segundo um eixo que se encontra a mais ou menos 120° em relação ao eixo horizontal, orientação esta que nos dá informação da fase com avaria, neste caso a fase S. Após a simetrização das correntes de excitação, verifica-se que existe uma reorientação do VPCE no sentido anti-horário assim como um aumento do seu eixo maior.

Se a avaria for na fase T, o VPCE apresenta mais uma vez uma forma elíptica, e desta vez o seu eixo maior encontra-se orientado segundo um eixo a -120° do eixo horizontal, indicando precisamente que a fase com avaria é a fase T. Pode constatar-se também que ao aplicar a

simetrização das correntes de excitação, acontece uma reorientação do VPCE no sentido anti-horário, assim como existe uma ligeira diminuição da sua elipticidade.

Tabela 5.4 – Representação dos fatores de severidade do ensaio com 5 % das espiras nas fases R, S e T do enrolamento primário do transformador em curto-circuito e com carga resistiva entre fase e neutro.

Fase			I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
	Fase R	Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.393	0.140
Com terciário			0.389	0.136	34.96 %
Com matriz de simetrização		Sem terciário	0.474	0.163	34.39 %
		Com terciário	0.471	0.159	33.76 %
Fase S	Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.397	0.196	49.37 %
		Com terciário	0.392	0.191	48.72 %
	Com matriz de simetrização	Sem terciário	0.545	0.311	57.06 %
		Com terciário	0.535	0.304	56.82 %
Fase T	Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.416	0.226	54.33 %
		Com terciário	0.427	0.233	54.57 %
	Com matriz de simetrização	Sem terciário	0.452	0.220	48.67 %
		Com terciário	0.463	0.227	49.03 %

Olhando para a Tabela 5.4, fase S, pode concluir-se que depois da simetrização das correntes de excitação, existe um aumento tanto da componente DC como da componente a 100 Hz, provocando assim um aumento do fator de severidade em quase 10 %, ao contrário do que acontecia quando a avaria se encontrava na fase R.

No caso da avaria se encontrar na fase T, pode constatar-se, que a componente sinusoidal a 100 Hz, que é sinónimo de uma assimetria, passou para mais do dobro, quando comparada com a mesma componente no ensaio sem avaria.

Fruto também da diminuição da elipticidade do VPCE, devido à simetrização das correntes de excitação, pode observar-se que a componente $2f$ diminui ligeiramente, e a componente DC aumentou, resultando assim numa diminuição do fator de severidade da avaria.

Posto isto, a análise da Tabela 5.4 e do Anexo C, demonstra que embora existam algumas diferenças nos resultados obtidos nas diferentes fases, os resultados são concordantes e reforçam a ideia de que o método de diagnóstico de avarias baseado na representação do vetor de Park das correntes de excitação do transformador, é um método fiável e robusto, quando aplicado em transformadores com ligação estrela-estrela e com enrolamento terciário.

No Anexo C encontram-se também os resultados obtidos para os casos de avaria nas fases R, S e T no enrolamento secundário (enrolamento de 127 V) do transformador, quando este alimenta uma carga monofásica resistiva entre fase e neutro e com as ligações $Yyn0$ e $Yyn0d$.

Pode concluir-se que os resultados obtidos são em tudo idênticos aos obtidos nos ensaios com avaria no enrolamento primário.

5.2 Ensaios com alimentação desequilibrada

Neste subcapítulo aborda-se um cenário extremamente importante e que pode acontecer no mundo real, no que diz respeito ao funcionamento de transformadores de potência. Os ensaios realizados, foram portanto executados tendo em conta um sistema de alimentação desequilibrado e em que o regime de carga utilizado foi o vazio, na medida em que este tipo de diagnóstico de avarias, que tem como base a representação do vetor de Park das correntes de excitação, não depende do nível de carga a que está sujeito o transformador. Os tipos de ligações utilizados foram $Yy0$ e $Yy0d$.

A grande dificuldade na execução deste tipo de diagnóstico, num cenário como este, prende-se com a determinação das correntes de excitação. Pois embora estas sejam as correntes que circulam no enrolamento primário do transformador, tendo em conta que este se encontra em vazio, acontece que devido ao desequilíbrio de tensões no sistema de alimentação, existirá uma componente direta, inversa e homopolar presente nestas correntes.

Foi portanto necessário determinar as componentes direta, inversa e homopolar totais da correntes de excitação. Seguidamente determinou-se a amplitude da componente inversa da corrente devido ao desequilíbrio de tensões e subtraiu-se essa parcela à componente inversa total, para que reste simplesmente a parcela da componente inversa da corrente, provocada pela avaria, permitindo assim obter-se resultados de diagnóstico o mais robustos e fidedignos possível.

Para o efeito, foi desenvolvido um código em Simulink que permite calcular o valor exato das componentes direta, inversa e homopolar de cada harmónico das correntes de excitação e seguidamente retirar a parcela da componente inversa provocada pelo desequilíbrio na alimentação.

Seguidamente a Fig. 5.7 e Fig. 5.8, ilustram de uma forma geral o programa criado para o tratamento de dados descrito em cima.

Os sinais de tensão e corrente obtidos no domínio do tempo são decompostos nos seus vários harmónicos e passados para o domínio fasorial através do bloco representado na Fig. 5.7. Posto isto, os sinais encontram-se em condições de serem processados no bloco representado na Fig. 5.8, no qual a componente inversa das correntes de excitação, provocada pelo desequilíbrio de tensões, é eliminada. Por fim cada harmónico é passado para o domínio do tempo novamente, e os sinais das correntes de excitação são reconstruídos através da soma dos vários harmónicos.

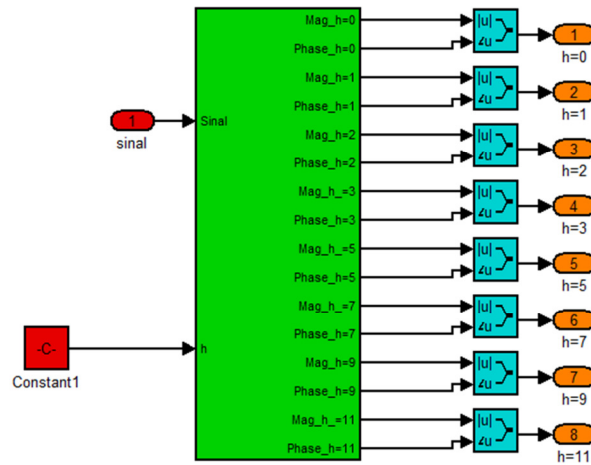


Fig. 5.7 – Representação do bloco que decompõe os sinais de tensão e corrente nos seus vários harmônicos no domínio do tempo e os passa para o domínio fasorial.

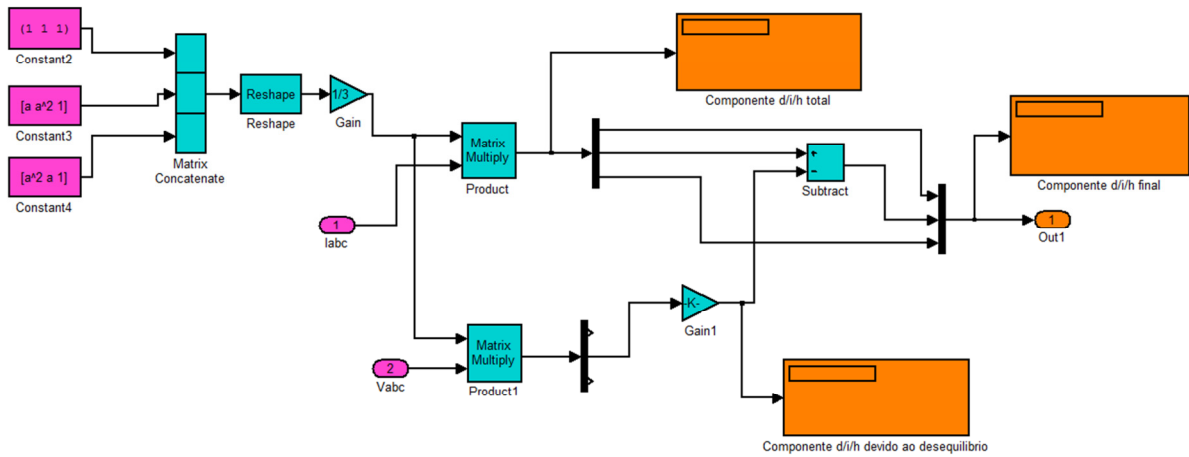


Fig. 5.8– Representação do bloco que determina as componentes direta, inversa e homopolar da corrente de excitação, assim como a componente inversa provocada pelo desequilíbrio na alimentação e a elimina das correntes de excitação.

5.2.1 Resultados obtidos sem avaria

O enrolamento alimentado foi mais uma vez o enrolamento de 220 V sendo o de 127 V o enrolamento secundário.

Neste ensaio, com o auxílio de uma resistência externa auxiliar, provocou-se uma queda de tensão na tensão simples da fase *R* de cerca de 40 V em relação às fases *S* e *T*, que continuaram a ser alimentadas por uma tensão simples de 220 V, 50 Hz. Quanto aos resultados apresentados neste subcapítulo, já foram sujeitos a normalização.

Na Fig. 5.9 encontra-se a representação do vetor de Park das correntes de excitação, após estas terem sido tratadas pelo código apresentado acima com vista à remoção da sua componente inversa provocada pelo desequilíbrio de tensões. Como se pode constatar, o processo de tratamento dos resultados mostrou-se eficaz, na medida em que o VPCE apresenta uma forma circular, depois das correntes terem sido filtradas, Fig. 5.9 (b). Neste caso, se a componente

inversa provocada pelo desequilíbrio de tensões não tivesse sido removida, ter-se-ia uma representação do VPCE elíptica, dando uma informação errada de que existiria avaria.

Comparando os resultados obtidos com alimentação equilibrada e com alimentação desequilibrada, pode constatar-se que o tratamento dos dados no caso da alimentação desequilibrada foi bem feito, uma vez que tanto num caso como no outro, os resultados são idênticos, tal como se pode observar na Fig. 5.9 (a) e (b).

É também importante referir mais uma vez que quer o transformador contenha enrolamento terciário quer não, a representação do VPCE não se altera, apresentando-se as curvas praticamente coincidentes.

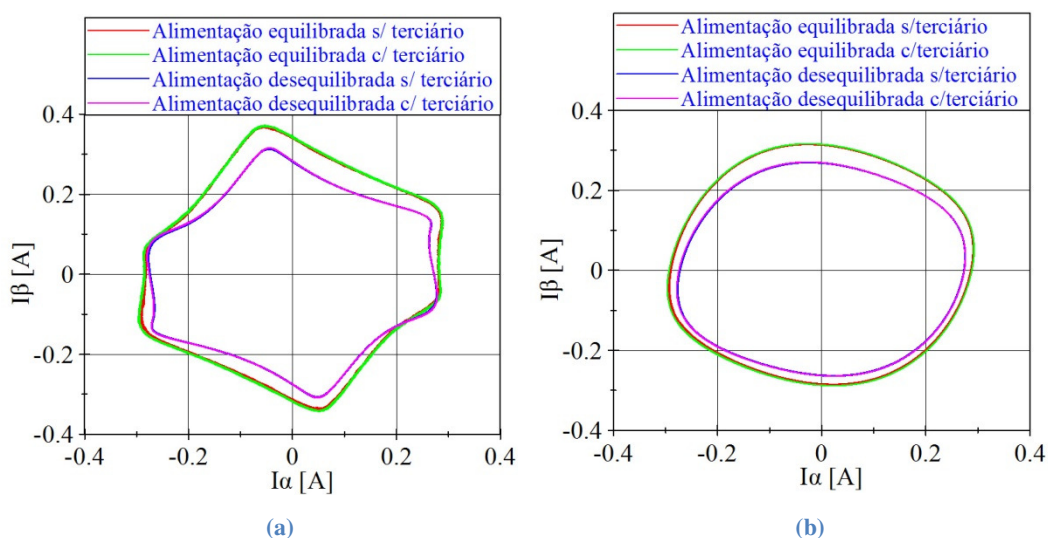


Fig. 5.9 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, sem avaria e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.

A Fig. 5.10 ilustra o EPVA das correntes de excitação do ensaio sem avaria, com alimentação equilibrada e desequilibrada, podendo observar-se que para o caso de existir enrolamento terciário ou não, o EPVA é coincidente. Como se pode verificar, a componente espectral ao dobro da frequência fundamental apresenta valores muito reduzidos, tanto num caso como no outro, revelando uma boa concordância entre os resultados. Pode assim dizer-se que o método de análise das correntes de excitação em caso de alimentação desequilibrada é eficaz.

Os fatores de severidade tanto para o cenário de alimentação equilibrada como para o de alimentação desequilibrada encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, sem avaria com alimentação equilibrada e desequilibrada.

		I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
Alimentação desequilibrada	Sem terciário	0.272	0.005	1.90 %
	Com terciário	0.273	0.005	1.80 %
Alimentação equilibrada	Sem terciário	0.296	0.021	7.13 %
	Com terciário	0.298	0.021	7.18 %

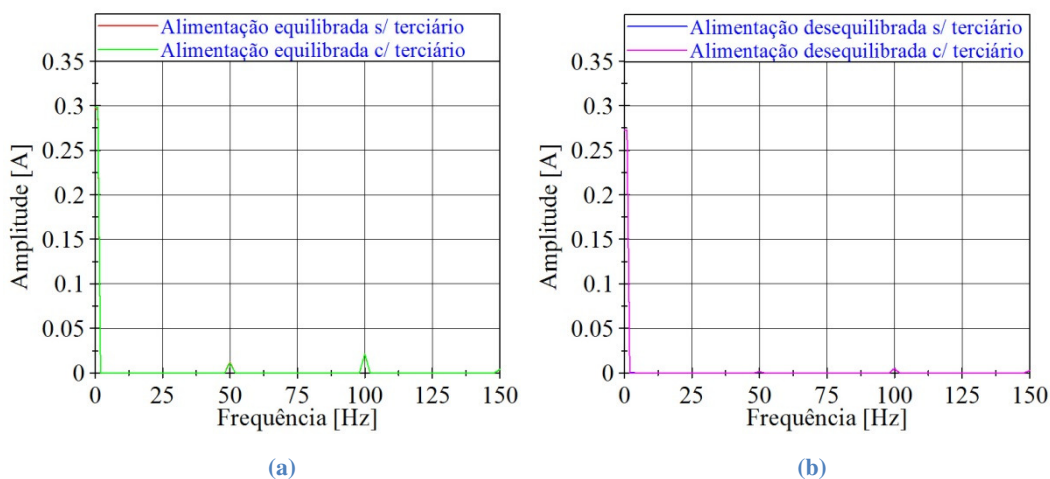


Fig. 5.10 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, sem avaria: (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.

5.2.2 Resultados obtidos com curto-circuito na fase R

Neste ensaio, mais uma vez provocou-se uma queda da tensão na tensão simples da fase *R* do enrolamento de 220 V, de mais ou menos 43 V em relação às fases *S* e *T*, com o auxílio de uma resistência auxiliar. Recorrendo a outra resistência auxiliar com valor $R_{cc}=1.2 \Omega$, tal como já tinha sido feito em 5.1.2, provocou-se um curto-circuito em 5 % das espiras do enrolamento primário (enrolamento de 220 V) da fase *R*.

Após tratamento das correntes de excitação no programa descrito em 5.3, procedeu-se mais uma vez à determinação dos respetivos vetores de Park, ilustrados na Fig. 5.11, e tal como se pode verificar, estes apresentam uma forma elíptica com o eixo maior orientado segundo o eixo horizontal, dando a informação de que a fase *R* se encontra com uma avaria. Os resultados obtidos com o sistema de alimentação desequilibrado e equilibrado apresentam uma grande conformidade como se pode constatar na análise da Fig. 5.11.

Mais uma vez os resultados obtidos sem enrolamento terciário são idênticos aos obtidos com este enrolamento, o que permite afirmar de forma categórica que o método de diagnóstico é aplicável a transformadores detentores deste tipo de enrolamento.

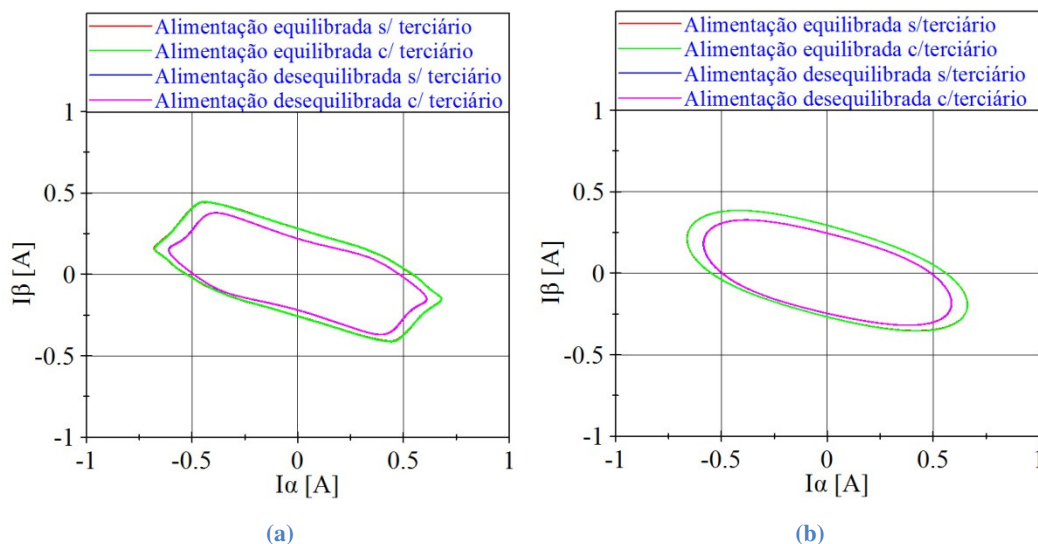


Fig. 5.11 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase R e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados c/ filtrados.

Observando a Fig. 5.12 pode verificar-se tal como seria esperado, uma componente ao dobro da frequência fundamental muito superior aquela existente no ensaio sem avaria. Pode ainda concluir-se que tanto no cenário de alimentação equilibrada como no de alimentação desequilibrada os resultados são concordantes, demonstrando mais uma vez que o processamento das correntes de excitação no ensaio com alimentação desequilibrada foi executado de uma forma eficaz.

Na Tabela 5.6 encontram-se representados os fatores de severidade de avaria nos casos em que a alimentação é equilibrada e desequilibrada, e pode constatar-se que em ambos os casos os valores são muito idênticos, provando mais uma vez a eficácia do método de análise das correntes de excitação utilizado.

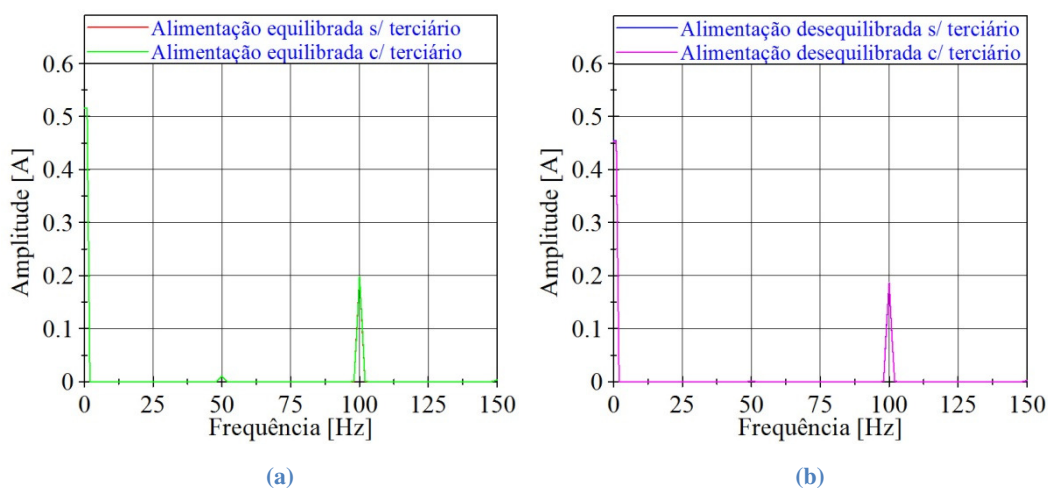


Fig. 5.12 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase R: (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.

Tabela 5.6 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, com 5 % das espiras na fase R do enrolamento primário com alimentação equilibrada e desequilibrada.

		I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
Alimentação desequilibrada	Sem terciário	0.454	0.187	41.19 %
	Com terciário	0.453	0.186	41.06 %
Alimentação equilibrada	Sem terciário	0.516	0.199	38.57 %
	Com terciário	0.516	0.198	38.37 %

Posto isto e em jeito de conclusão já se torna perceptível que o comportamento das grandezas em questão no tipo de diagnóstico de avarias utilizado é exatamente o mesmo que se observou nos ensaios frisados em 5.2. A grande diferença existente na aplicação deste método de diagnóstico num cenário de alimentação desequilibrada prende-se essencialmente com o facto das correntes de excitação terem de ser sujeitas a um processamento específico, através de um código expressamente desenvolvido para o efeito, por forma a que a sua componente inversa seja apenas a componente inversa provocada pela avaria e possamos assim ter resultados fidedignos.

Tabela 5.7 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, com 5 % das espiras nas fases R, S e T do enrolamento primário com alimentação equilibrada e desequilibrada.

		I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)	
Fase R	Alimentação desequilibrada	Sem terciário	0.454	0.187	41.19 %
		Com terciário	0.453	0.186	41.06 %
	Alimentação equilibrada	Sem terciário	0.516	0.199	38.57 %
		Com terciário	0.516	0.198	38.37 %
Fase S	Alimentação desequilibrada	Sem terciário	0.534	0.273	51.12 %
		Com terciário	0.535	0.273	51.03 %
	Alimentação equilibrada	Sem terciário	0.567	0.297	52.38 %
		Com terciário	0.568	0.297	52.29 %
Fase T	Alimentação desequilibrada	Sem terciário	0.459	0.197	42.92 %
		Com terciário	0.458	0.197	43.01 %
	Alimentação equilibrada	Sem terciário	0.488	0.204	41.80 %
		Com terciário	0.487	0.204	41.89 %

No Anexo C, encontram-se os resultados obtidos nos ensaios com curto-circuito entre espiras nas fases S e T, para o mesmo nível de desequilíbrio da tensão simples da fase R. Por outro lado na Tabela 5.7 estão apresentados os fatores de severidade da avaria, quando esta se encontra nas fases R, S e T e pode concluir-se que quer a alimentação seja equilibrada, quer seja desequilibrada, os valores são idênticos independentemente do transformador possuir enrolamento terciário ou não.

Capítulo 6 – Conclusões

Com este trabalho pode constatar-se que o enrolamento terciário desempenha um papel crucial no que diz respeito à estabilização do ponto neutro, na presença de cargas desequilibradas, em especial se a carga estiver conectada entre uma fase e o neutro, evitando assim sobretensões e elevadas saturações dos transformadores. Por outro lado, pode ainda observar-se que o enrolamento terciário desempenha um papel secundário, na supressão dos terceiros harmónicos das tensões simples dos transformadores, contudo, tanto uma função como a outra é muito mais evidente e de maior relevância, em transformadores de fases dissociadas ou em transformadores de cinco colunas, como se pode verificar ao longo deste trabalho, podendo-se constatar que tais transformadores facilitam a circulação dos fluxos homopolares. Concluiu-se portanto que estes dois tipos de transformadores trifásicos são muito mais suscetíveis a perturbações provocadas pelos fluxos homopolares, daí que a incorporação de um enrolamento terciário seja muito mais importante nestes transformadores do que em transformadores trifásicos de três colunas magnéticas.

Quanto ao diagnóstico de avarias, foi possível concluir que o método utilizado, com base na representação do vetor de Park das correntes de excitação, revelou ser um método bastante eficaz quando aplicado em transformadores trifásicos com enrolamento terciário. Pode portanto constatar-se que a representação do VPCE em nada se altera, na presença deste tipo de enrolamento, apresentando conformidade nos resultados tanto em caso de avaria, como no caso em que o transformador se encontra sem qualquer dano curto-circuito nos seus enrolamentos.

O mesmo se passa com os fatores de severidade, que se apresentam muito idênticos com e sem terciário, quer o transformador possua uma alimentação equilibrada, quer apresente uma alimentação desequilibrada.

Foi também realizada uma pequena correção na dedução da matriz de simetriação das correntes de excitação e pode concluir-se através da análise dos resultados experimentais que os fatores de severidade, na ausência de avaria, diminuem quando esta matriz é aplicada às correntes de excitação, eliminando as assimetrias do circuito magnético. Tais resultados encontram-se em absoluta concordância, uma vez que o objetivo desta matriz é precisamente o de permitir que tenhamos um fator de severidade da avaria o mais fidedigno possível por forma a obtermos um diagnóstico fiável.

Portanto ficou perceptível que o método de diagnóstico baseado no VPCE é extremamente robusto, independentemente do nível de carga e do sistema de alimentação aplicado ao transformador, quer este possua enrolamento terciário ou não.

Desta forma obtém-se assim uma ferramenta de diagnóstico extremamente poderosa e que permitirá zelar pelo bom funcionamento dos transformadores do sistema elétrico apostando na prevenção de possíveis avarias que poderão levar à completa destruição das máquinas.

6.1 Propostas de trabalho futuro

Tendo em conta a existência de um elevado número de transformadores trifásicos do tipo Shell (couchado-imbricado), existe uma enorme necessidade de estudar os transformadores, com este tipo de núcleo. Uma vez que no que diz respeito ao desenvolvimento de um modelo de simulação que possa representar de uma forma fiável este tipo de transformadores, já foram dados os primeiros passos, é necessário agora que seja projetado e concebido um transformador de laboratório deste tipo para que se possam realizar testes experimentais com o objetivo de validar a eficiência do modelo.

Um outro ponto que será interessante estudar será a aplicação das técnicas de diagnóstico de avarias desenvolvidas até ao momento a transformadores desfasadores, utilizados nas linhas de transmissão para controlo de fluxos de potência entre duas linhas ou sistemas independentes. Com este estudo poder-se-á portanto alargar o leque de máquinas para as quais será possível realizar uma prevenção eficaz de potenciais avarias.

Seguidamente, uma outra proposta será o estudo do impacto do enrolamento terciário em transformadores de potência com ligação estrela-zigue-zague.

Por último será importante tentar desenvolver técnicas de deteção de furtos de energia, por forma a minimizar estes casos, tendo em vista a diminuição de prejuízos para as entidades produtoras e comercializadoras de energia.

Referências Bibliográficas

- [1] H. Patricia and B. William, "Large Power Transformers And The U.S. Electric Grid," Infrastructure Security and Energy Restoration Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, U.S. Department of Energy, 2009.
- [2] J. John and J. Winders, *Power Transformers - Principles and Applications*, vol 17, New York, 2002, pp. 27-153.
- [3] O. Enrique Ras, *Transformadores de potencia, de medida e de proteção*, vol 3, 1977.
- [4] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis, A. D. Theocharis, and M. Madrigal, "Experimental Investigation of Parameters Influencing Transformer Excitation Current," in *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Agia Napa, Cyprus, pp. 1-6, 7-10 November, 2010.
- [5] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, *Electric Machines*, First edition, New Delhi, 1985, pp. 39-113.
- [6] M. A. S. Masoum and E. F. Fuchs, "Transformer magnetizing current and iron-core losses in harmonic power flow," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 10-20, 1994.
- [7] P. Penabad-Duran, X. M. Lopez-Fernandez, and C. Alvarez-Marino, "Transformer Tertiary Stabilizing Windings. Part I: Apparent power rating," in *XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM) Marseille*, pp. 2362-2368, 2-5 Sept. 2012.
- [8] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering (Design and Practice)*, Indian Institute of Technology, Bombay Mumbai, India, 2004, pp. 7, 45-46.
- [9] L. M. R. Oliveira, "Desenvolvimento e implementação de um modelo computacional para o estudo de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2001.
- [10] D. Morgado, "Desenvolvimento e aplicação de novas estratégias de manutenção de transformadores de potência numa central hidroelétrica," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2011.
- [11] M. V. Guedes, "Corrente Alternada - Sistemas polifásicos assimétrico," ed, 2005, pp. 1-23.
- [12] F. Kelemen, L. Strac, and S. Berberovic, "Influence of a delta-connected winding on magnetizing currents of a five-limb core power transformer," in *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1-5, 6-8 Sept. 2010.
- [13] A. D. Ashkezari, M. Hui, C. Ekanayake, and T. K. Saha, "Multivariate analysis for correlations among different transformer oil parameters to determine transformer health index," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pp. 1-7, 22-26 July 2012.

- [14] L. M. R. Oliveira, A. J. M. Cardoso, and S. M. A. Cruz, "Power transformers winding fault diagnosis by the on-load exciting current Extended Park's Vector Approach," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1206–1214, 2011.
- [15] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 18, pp. 12-25, 2002.
- [16] X. Zhang and E. Gockenbach, "Asset-Management of Transformers Based on Condition Monitoring and Standard Diagnosis [Feature Article]," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 24, pp. 26-40, 2008.
- [17] IEC Standard 60599, "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service -Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis," ed, 1999.
- [18] A. J. M. Cardoso and L. M. R. Oliveira, "Condition monitoring and diagnostics of power transformers," *International Journal of COMADEM*, vol. vol. 2, pp. 5-11, 1999.
- [19] H. H. Sinaga, B. T. Phung, and T. R. Blackburn, "Neuro fuzzy recognition of ultra-high frequency partial discharges in transformers," in *IPEC, 2010 Conference Proceedings*, Singapore, pp. 346-351, 27-29 Oct. 2010.
- [20] B. Garcia, J. C. Burgos, and A. M. Alonso, "Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part I: theoretical foundation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 157-163, 2006.
- [21] B. Garcia, J. C. Burgos, and A. M. Alonso, "Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part II: experimental verification," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 164-169, 2006.
- [22] M. F. Lachman and Y. N. Shafir, "Influence of single-phase excitation and magnetizing reactance on transformer leakage reactance measurement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 1538-1546, 1997.
- [23] M. F. Cabanas, M. G. Melero, C. H. Rojas, G. A. Orcajo, J. M. Cano, F. P. Gonzalez, *et al.*, "Detection of insulation faults on disc-type winding transformers by means of leakage flux analysis," in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, pp. 1-6, 31 Aug. 2009 - 3 Sept. 2009.
- [24] S. S. Patil and S. E. Chaudhari, "An Attempt to Investigate the Transformer Failure by using DGA and SFRA Analysis," in *IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, pp. 1-4, 24-28 July 2012.
- [25] C. Bengtsson, "Status and trends in transformer monitoring," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 1379-1384, 1996.
- [26] L. M. R. Oliveira, A. J. M. Cardoso, and S. M. A. Cruz, "Transformers on-load exciting current Park's Vector Approach as a tool for winding faults diagnostics," presented at the

Conference Record of the 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2002), 2002.

- [27] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference*, Rome, pp. 395-401 vol.1, October 8–12, 2000.
- [28] L. M. R. Oliveira and A. J. M. Cardoso, "Intermittent turn-to-turn winding faults diagnosis in power transformers by the on-load exciting current Park's Vector Approach," in *18th International Conference on Electrical Machines (ICEM)* pp. 1-6,6-9 Sept. 2008.

Anexo A – Caracterização dos transformadores

A.1 Caracterização do transformador trifásico em estudo

Um dos transformadores no qual foram realizados os ensaios, trata-se de um transformador trifásico de três colunas, do tipo *core*, Fig. A.1, de 6 KVA de potência nominal, sem qualquer cuba envolvente. Possui quatro enrolamentos por coluna, com tensões nominais 220/220/127/127 V. Para que se possa proceder ao estudo de curto-circuitos entre espiras, este transformador é dotado de dois enrolamentos por coluna, de classe de tensão distintas, nos quais existem 7 tomadas intermédias, como podemos ver na Fig. A.2.

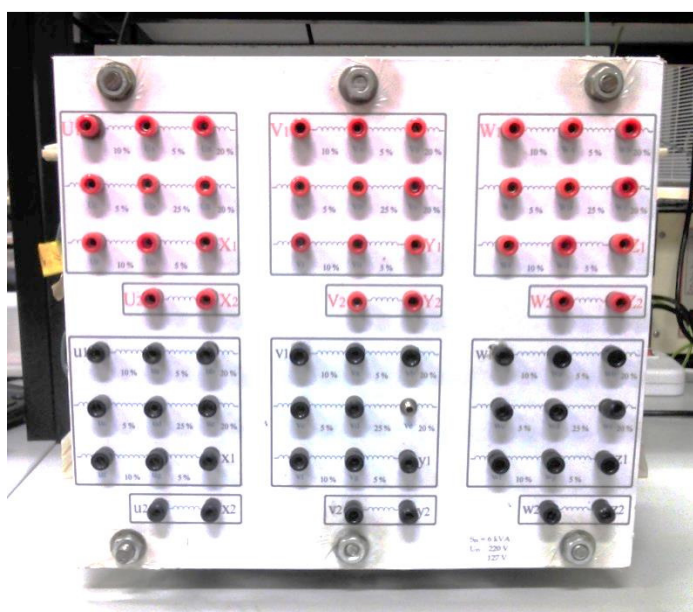


Fig. A.1. – Transformador trifásico em análise.

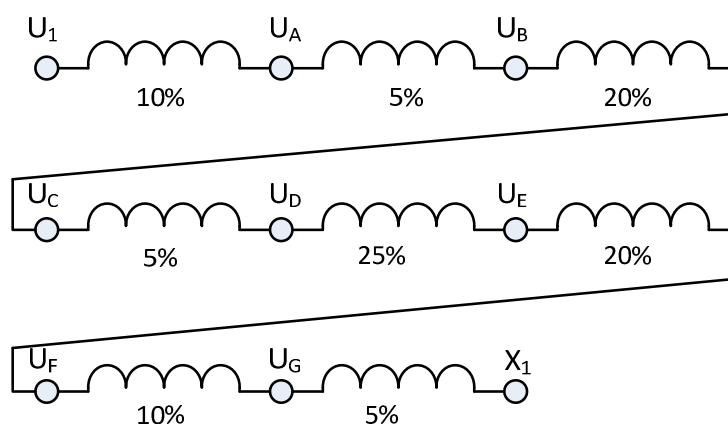


Fig. A.2 – Enrolamento de 220 V e respectivas tomadas.

Impedância de curto-circuito e resistência dos enrolamentos

A impedância de curto-circuito e a resistência dos enrolamentos foi determinada através do ensaio em curto-circuito convencional. Os dados medidos no ensaio em curto-circuito são os representados na Tabela A.1.

Os valores obtidos para a impedância de curto-circuito e para as resistências dos enrolamentos estão representados na Tabela A.2.

Tabela A.1 – Grandezas medidas no ensaio em curto-circuito.

Ensaio em curto-circuito	
P_{cc}	143.98 W
V_{cc}	19.28 V
I_{cc}	7.97 A

Tabela A.2 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador trifásico de três colunas referidos ao enrolamento de 220 V.

Ensaio em curto-circuito	
R_{cc}	2.270 Ω
X_{cc}	0.836 Ω
Z_{cc}	2.270+j0.836 Ω 2.42 \angle 20.22° Ω
R_p	1.135 Ω
R'_s	1.134 Ω

Impedância de magnetização e resistência de perdas no ferro

Quanto à impedância de magnetização e resistência de perdas no ferro, estas foram calculadas recorrendo a um ensaio em circuito aberto convencional. Os valores das grandezas medidas no ensaio em circuito aberto, encontram-se na Tabela A.3, e os valores obtidos tanto para a reatância de magnetização como para a resistência de perdas no ferro, estão apresentados na Tabela A.4

Tabela A.3 – Grandezas medidas no ensaio em circuito aberto.

Ensaio em circuito aberto	
P_{ca}	27.690 W
V_{ca}	225.470 V
I_{ac}	0.189 A
Desfasamento entre a tensão e a corrente	46.5°

Tabela A.4 – Parâmetros do núcleo do transformador trifásico de três colunas referidos ao enrolamento de 220 V

Ensaio em circuito aberto	
R_{Fe}	1.834 k Ω
X_m	1.614 k Ω
Z_m	0.8+j0.910 k Ω 1.21 \angle 48.67° k Ω

Impedância homopolar na ligação $Yyn0$

A impedância homopolar neste tipo de ligação corresponde à impedância que a corrente homopolar provocada pela carga ligada entre uma fase e o neutro do secundário, tem de enfrentar, e é calculada realizando o ensaio apresentado na Fig. A.3. Neste tipo de ensaio colocaram-se os enrolamentos de 127 V do transformador em paralelo e alimentaram-se através de uma fonte de tensão alternada, para que por eles passasse uma corrente com características de uma corrente homopolar. Mediu-se a tensão aplicada e a corrente tal como se pode observar na Fig. A.3.

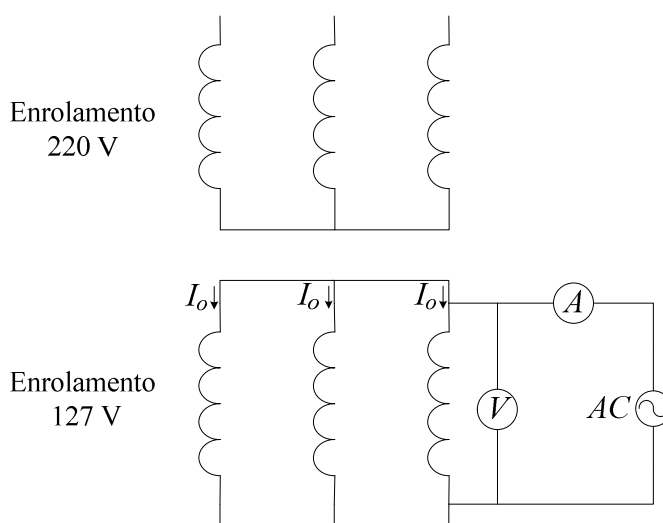


Fig. A.3 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo na ligação $Yyn0$.

O valor da impedância homopolar por fase, vista do lado do enrolamento de 127 V, para a ligação $Yyn0$, está representada na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Impedância homopolar para a ligação $Yyn0$ referida ao enrolamento de 127 V.

Ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo	
Z_o com ligação $Yyn0$	0.50+j2.12 Ω 2.17 \angle 76.73° Ω

Impedância homopolar na ligação *Yyn0d*

O esquema elétrico do ensaio para calcular a impedância homopolar neste tipo de ligação é representado na Fig. A.4. Mais uma vez foi curto-circuitado o enrolamento de 127 V e alimentou-se o mesmo com uma fonte de tensão alternada por forma a que circulasse por cada fase uma corrente homopolar. Seguidamente mediu-se a tensão aplicada ao enrolamento de 127 V e a corrente que circulava no enrolamento terciário. Com o valor da tensão e da corrente pode então calcular-se o valor da impedância homopolar, que será idêntica à impedância de curto-circuito do transformador.

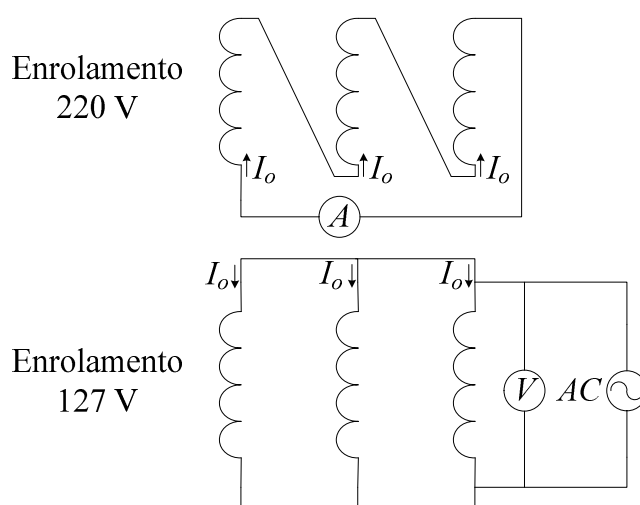


Fig. A.4 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo, na ligação *Yyn0d*.

Quanto ao valor das impedância homopolar por fase, vista do lado do enrolamento de 220 V (enrolamento terciário), na ligação *Yyn0d*, estão representados na Tabela A.6.

Tabela A.6 – Impedâncias homopolares para a ligação *Yyn0d* referida ao enrolamento de 220 V.

Ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo	
Z_o com ligação <i>Yyn0d</i>	$1.07+j2.36 \Omega$ $2.59 \angle 65.61^\circ \Omega$

Curva de magnetização do transformador trifásico de três colunas

Para determinar a curva de magnetização do transformador é necessário que os níveis de saturação de todos os segmentos do circuito magnético do núcleo apresentem valores aproximadamente semelhantes, ou seja, o mesmo valor de fluxo magnético. Para que tal fosse possível foram efetuadas as ligações representadas na Fig. A.5.

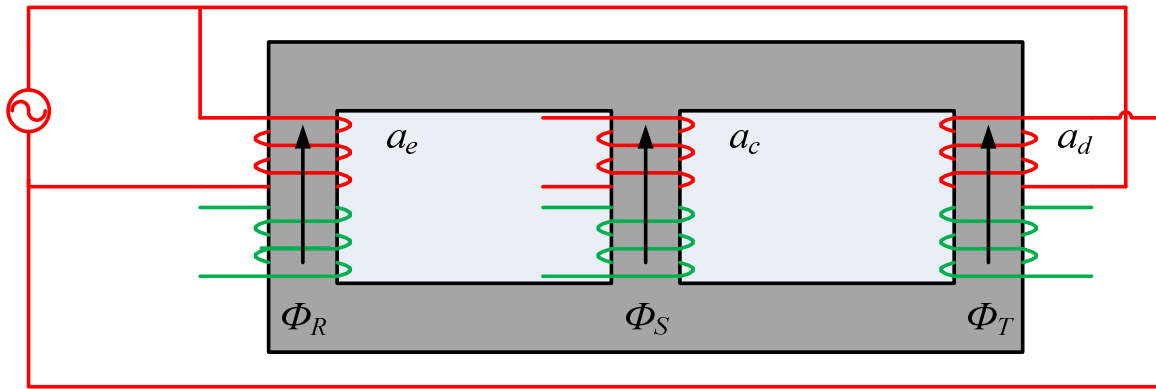


Fig. A.5 – Esquema de ligação para a obtenção da curva de magnetização do transformador.

Com este tipo de ligações o fluxo na coluna central a_c , será aproximadamente nulo, e o fluxo nas colunas laterais e nas travessas serão aproximadamente iguais e uniformes, para qualquer nível de saturação [10]. Portanto, para a obtenção da curva foi medida a corrente, a potência e o desfasamento entre a tensão e a corrente, no circuito representado na Fig. A.5, para vários níveis de tensão até levar o transformador à saturação. Procedeu-se ao cálculo da corrente de magnetização e da indutância de magnetização, a partir destes dados, e posteriormente obteve-se a curva $L_m=f(I_m)$, representada na Fig. A.6.

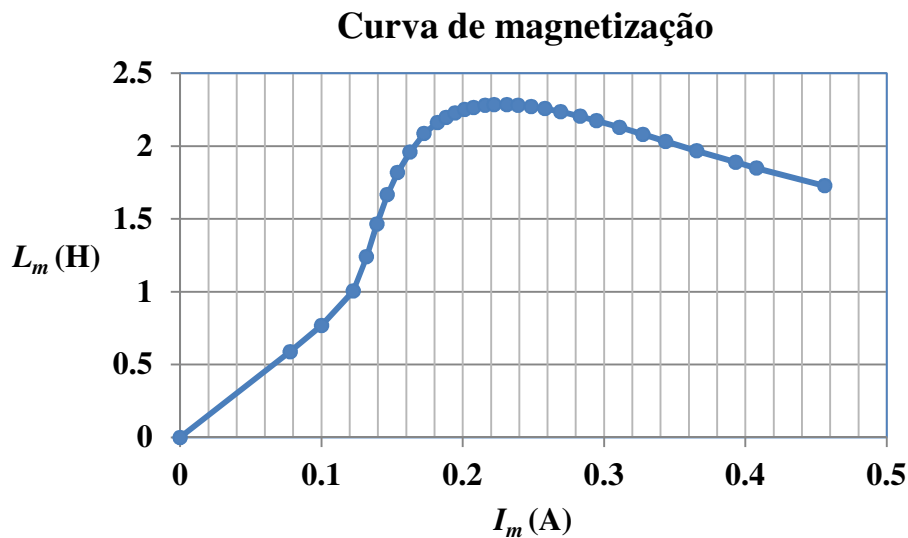


Fig. A.6 – Curva de magnetização do transformador.

Seguidamente aplicou-se um circuito integrador, utilizando o mesmo esquema elétrico da Fig. A.5 com o objetivo de construir o ciclo histerético do material magnético do transformador, encontrando-se esse ciclo histerético representado na Fig. A.7. Foi medida a tensão aos terminais do condensador e a corrente do circuito e utilizaram-se as seguintes equações para determinar a curva $B-H$,

$$\Phi = B \cdot A \quad (\text{Wb}), \quad (\text{A.1})$$

e

$$H = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (\text{A/m}). \quad (\text{A.2})$$

em que A representa a área, B representa a densidade de campo magnético e H , representa o campo magnético.

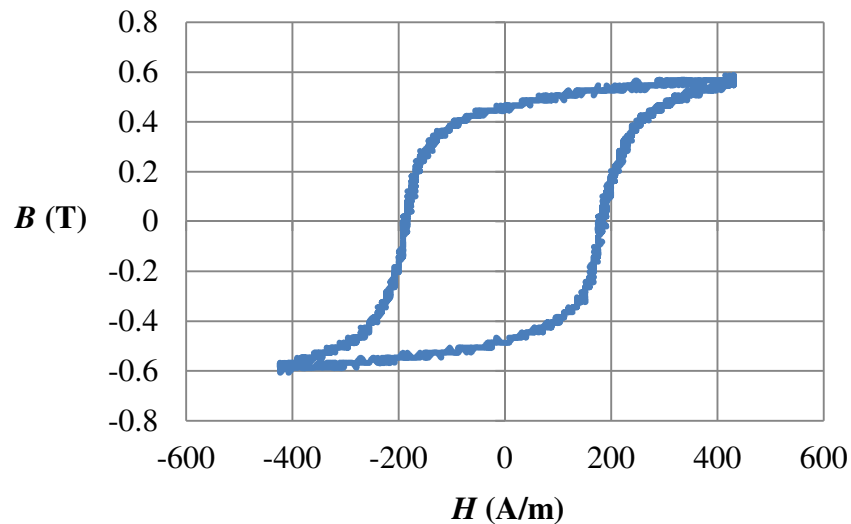


Fig. A.7 – Curva B - H do transformador de 6 KVA do laboratório.

A.2 Caracterização do banco trifásico de três transformadores monofásicos

O segundo transformador utilizado na realização de ensaios experimentais, trata-se de um banco trifásico de transformadores monofásicos, transformadores esses de 25 VA de potência nominal e cada um é dotado de três enrolamentos com tensões nominais de 230 V/15 V/15 V.

A fotografia representativa do banco de transformadores e o esquema do circuito magnético e respectivos enrolamentos de cada transformador estão representados a seguir, na Fig. A.8 e na Fig. A.9, respectivamente.

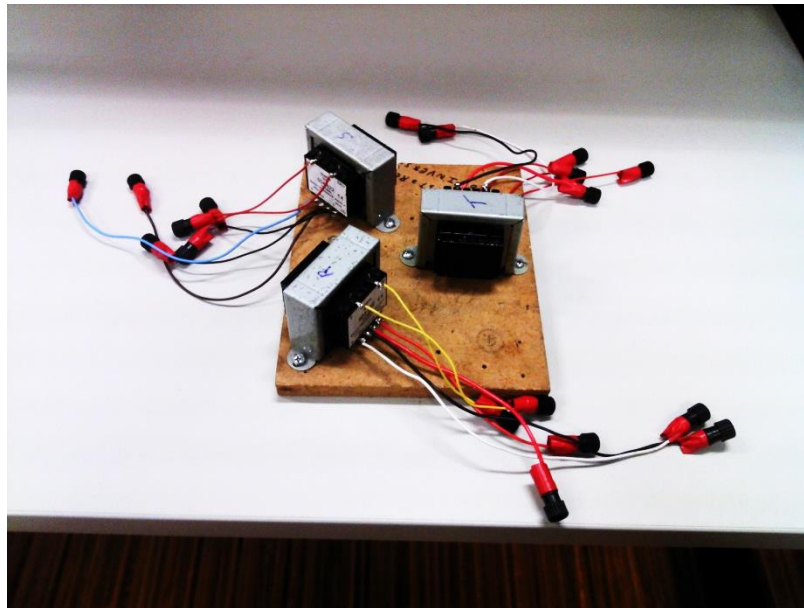


Fig. A.8 – Banco trifásico de três transformadores monofásicos.

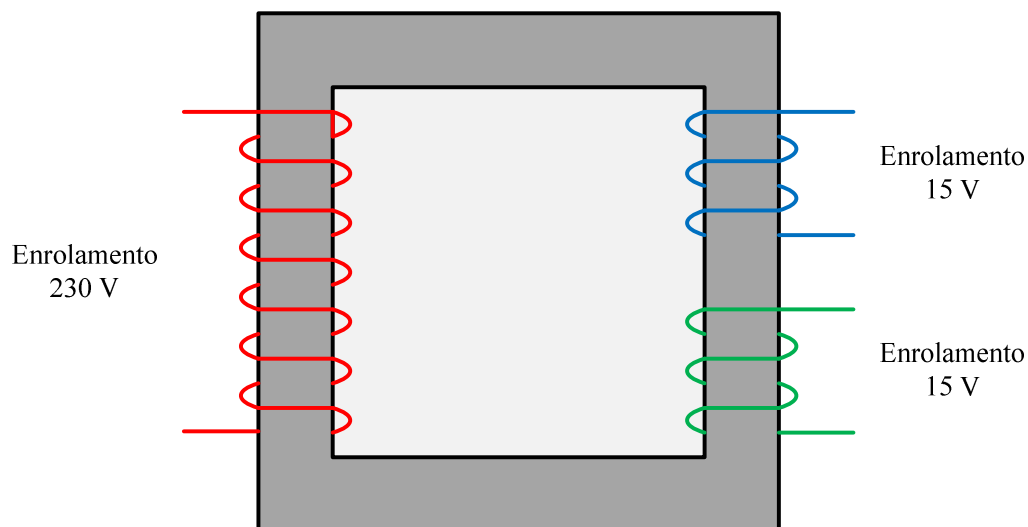


Fig. A.9 – Esquema do circuito magnético e respectivos enrolamentos do transformador de 25 VA.

Impedância de curto-circuito e resistência dos enrolamentos

A impedância de curto-circuito foi calculada através do ensaio em curto-circuito convencional, todavia no que diz respeito às resistências do primário e secundário, como se tratam de transformadores monofásicos muito pequenos, optou-se por considerar os valores medidos, na medida em que não é fácil obter através do ensaio em curto-circuito os valores das resistências dos enrolamentos com a precisão desejada. A Tabela A.7, representa as grandezas medidas nos ensaios em curto-circuito.

Na Tabela A.8, Tabela A.9 e Tabela A.10 estão representados todos os valores dos parâmetros referentes aos enrolamentos de cada transformador monofásico utilizado no banco trifásico.

Tabela A.7 – Grandezas medidas no ensaio em curto-circuito em cada transformador.

	Transformador <i>R</i>	Transformador <i>S</i>	Transformador <i>T</i>
P_{cc}	1.521 W	P_{cc} 1.491 W	P_{cc} 1.520 W
I_{cc}	0.110 A	I_{cc} 0.109 A	I_{cc} 0.110 A
V_{cc}	15.890 V	V_{cc} 15.699 V	V_{cc} 15.738 V

Tabela A.8 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador monofásico *R* referidos ao enrolamento de 230 V.

Ensaio em curto-circuito – Transformador <i>R</i>	
R_{cc}	126.40 Ω
X_{cc}	70.74 Ω
Z_{cc}	126.40+j70.74 Ω 144.85 \angle 29.23° Ω
R_p	45.32 Ω
R'_s	73.75 Ω

Tabela A.9 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador monofásico *S* referidos ao enrolamento de 230 V.

Ensaio em curto-circuito – Transformador <i>S</i>	
R_{cc}	125.45 Ω
X_{cc}	70.70 Ω
Z_{cc}	125.45+j70.70 Ω 144.00 \angle 29.40° Ω
R_p	44.99 Ω
R'_s	75.84 Ω

Tabela A.10 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador monofásico *T* referidos ao enrolamento de 230 V.

Ensaio em curto-circuito – Transformador <i>T</i>	
R_{cc}	125.62 Ω
X_{cc}	68.48 Ω
Z_{cc}	125.62+j68.48 Ω 143.07 \angle 28.60° Ω
R_p	44.78 Ω
R'_s	73.66 Ω

Impedância de magnetização e resistência de perdas no ferro

Quanto à impedância de magnetização e resistência de perdas no ferro, estas foram calculadas recorrendo a um ensaio em circuito aberto convencional, estando as grandezas medidas registadas na Tabela A.11.

Tal como se procedeu para o transformador trifásico de três colunas, estando os respetivos valores representados na Tabela A.12, Tabela A.13 e Tabela A.14.

Tabela A.11 – Grandezas medidas no ensaio em circuito aberto em cada transformador.

Transformador R		Transformador S		Transformador T	
P_{ca}	2.950 W	P_{ca}	3.150 W	P_{ca}	3.37 W
I_{ca}	0.039 A	I_{ca}	0.045 A	I_{ca}	0.05 A
V_{ca}	225.350 V	V_{ca}	229.870 V	V_{ca}	224.50 V
Desfasamento	68.80°	Desfasamento	72.19°	Desfasamento	72.70°

Tabela A.12 – Parâmetros do núcleo do transformador R referidos ao enrolamento de 230 V.

Ensaio em circuito aberto – Transformador R	
R_{Fe}	17.33 k Ω
X_m	6.06 k Ω
Z_m	1.89+j5.40 k Ω 5.72 \angle 70.71° k Ω

Tabela A.13 – Parâmetros do núcleo do transformador S referidos ao enrolamento de 230 V.

Ensaio em circuito aberto – Transformador S	
R_{Fe}	16.95 k Ω
X_m	5.34 k Ω
Z_m	1.53+j4.86 k Ω 5.10 \angle 72.53° k Ω

Tabela A.14 – Parâmetros do núcleo do transformador T referidos ao enrolamento de 230 V.

Ensaio em circuito aberto – Transformador T	
R_{Fe}	15.26 k Ω
X_m	4.057 k Ω
Z_m	1.01+j3.79 k Ω 3.92 \angle 75.08° k Ω

Impedância homopolar na ligação *Yyn0*

A impedância homopolar neste tipo de ligação, tal como no caso do transformador trifásico de três colunas, corresponde à impedância do circuito percorrido pela corrente homopolar, e é calculada realizando o ensaio apresentado na Fig. A.10. Neste tipo de ensaio colocaram-se os enrolamentos de 15 V do transformador em paralelo e alimentaram-se através de uma fonte de tensão alternada, para que por eles passasse uma corrente com características de uma corrente homopolar. Mediu-se a tensão aplicada e a corrente, tal como se pode observar na Fig. A.10.

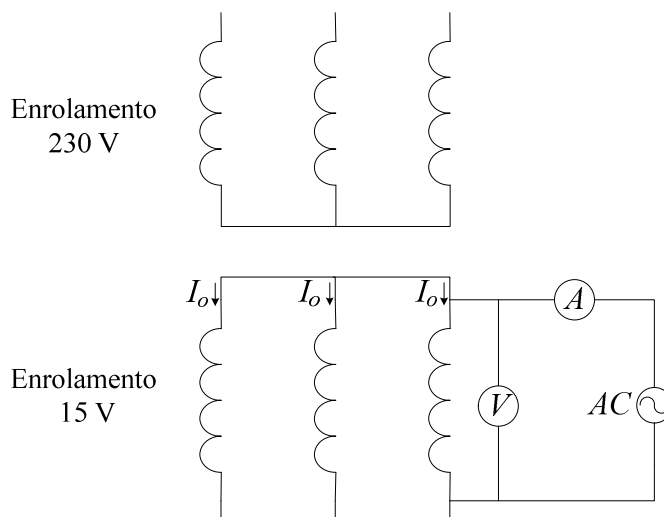


Fig. A.10 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo (ligação $Yyn0$).

O valor da impedância homopolar por fase, vista do lado do enrolamento de 15 V, para a ligação $Yyn0$, está apresentada na Tabela A.15

Tabela A.15 – Impedância homopolar para a ligação $Yyn0$ referida ao enrolamento de 15 V.

Ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo	
Z_o com ligação $Yyn0$	$0.41+j51.33 \Omega$ $51.54 \angle 89.54^\circ \Omega$

Impedância homopolar na ligação $Yyn0d$

O esquema elétrico do ensaio para calcular a impedância homopolar neste tipo de ligação é representado na Fig. A.11. Mais uma vez foi curto-circuitado o enrolamento de 15 V e alimentou-se o mesmo com uma fonte de tensão alternada, por forma a que circule por cada fase uma corrente homopolar. Seguidamente mediu-se a tensão aplicada ao enrolamento de 15 V e a corrente que circula no enrolamento terciário (ligações do terciário executadas usando o segundo enrolamento de 15 V de cada transformador). Com o valor da tensão e da corrente pode então calcular-se o valor da impedância homopolar, que será idêntica à impedância de curto-circuito do transformador.

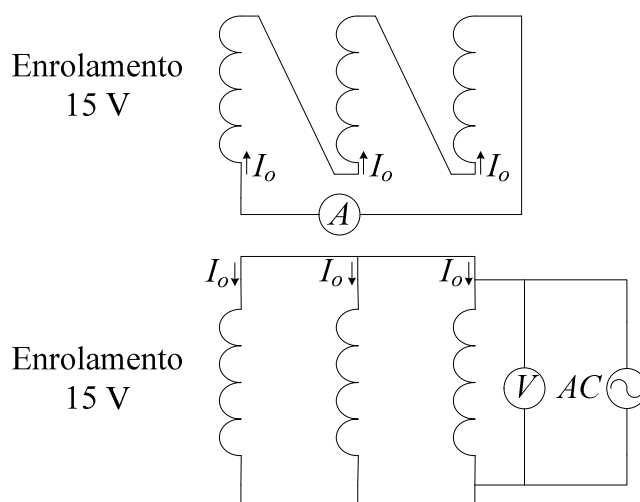


Fig. A.11 – Esquema equivalente do ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo, na ligação *Yyn0d*.

Quanto aos valores das impedâncias homopolares por fase, vista do lado do enrolamento de 15 V, na ligação *Yyn0d*, estão apresentados na Tabela A.16.

Tabela A.16 – Impedância homopolar para a ligação *Yyn0d* referida ao enrolamento de 15 V.

Ensaio homopolar com os enrolamentos em paralelo	
Z_o com ligação <i>Yyn0d</i>	$0.41 + j0.96 \Omega$ $1.045 \angle 66.67^\circ \Omega$

Anexo B – Resultados anexos à validação experimental do papel do enrolamento terciário

B.1 Transformador trifásico de três colunas em vazio

No presente anexo encontram-se representados os espectrogramas das correntes de excitação das fases *S* e *T* para as ligações *Yy0*, *YNy0* e *Yy0d*.

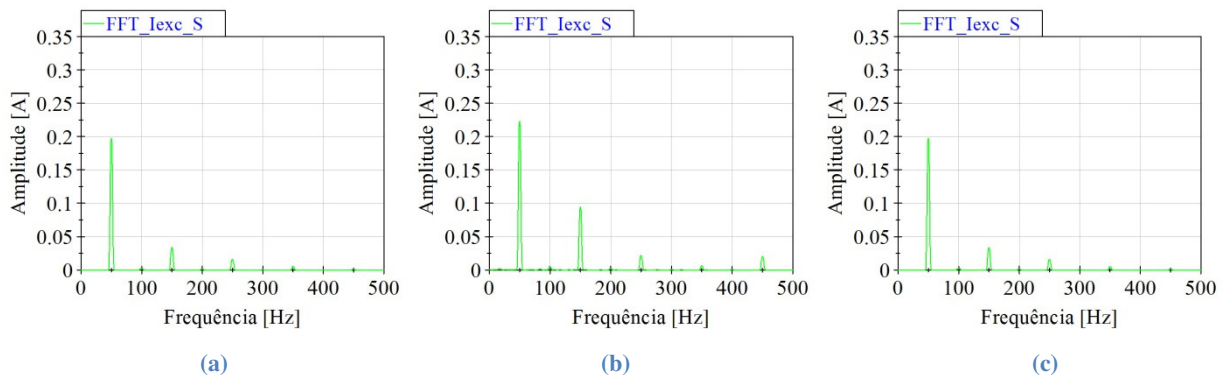


Fig. B.1 – Representação do espectrograma das correntes de excitação da fase *S* do transformador: (a) Ligação *Yy0*; (b) Ligação *YNy0*; (c) Ligação *Yy0d*.

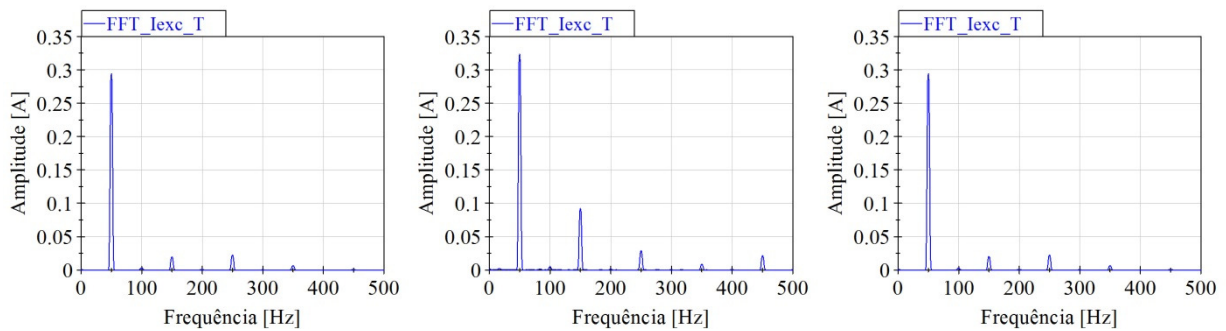


Fig. B.2 – Representação do espectrograma das correntes de excitação da fase *T* do transformador: (a) Ligação *Yy0*; (b) Ligação *YNy0*; (c) Ligação *Yy0d*.

B.2 Banco trifásico de três transformadores monofásicos em vazio

No presente anexo encontram-se representados os espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM, das fases *S* e *T* para as ligações *Yy0*, *YNy0* e *Yy0d*.

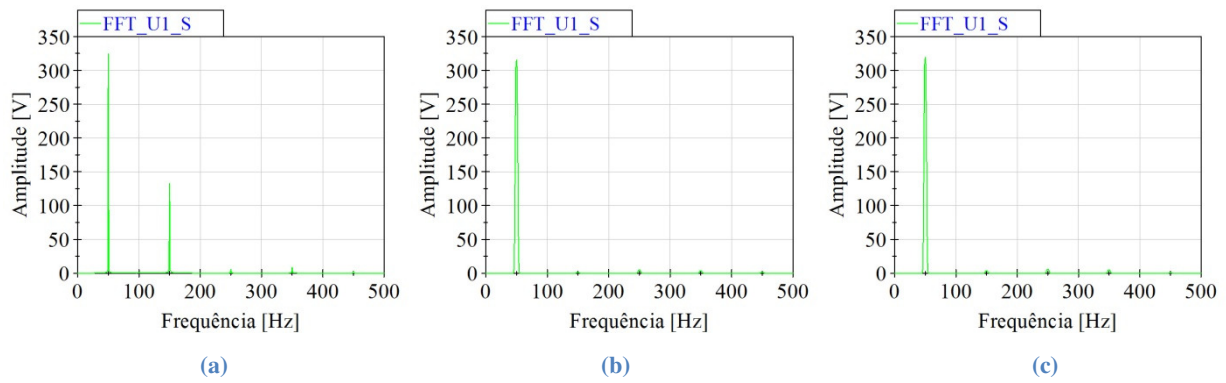


Fig. B.3 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase *S*: (a) Ligação *Yy0*; (b) Ligação *YNy0*; (c) Ligação *Yy0d*.

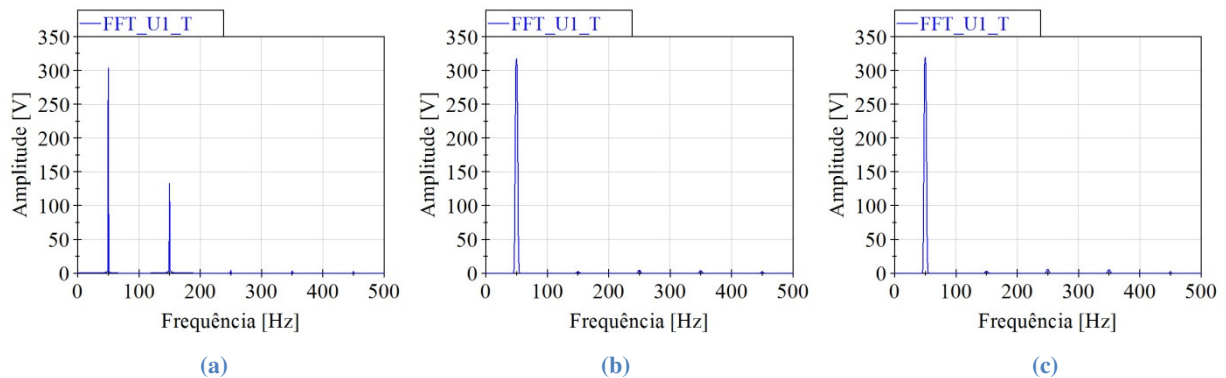


Fig. B.4 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase *T*: (a) Ligação *Yy0*; (b) Ligação *YNy0*; (c) Ligação *Yy0d*.

B.3 Banco trifásico de três transformadores monofásicos com carga monofásica entre fase e neutro

No presente anexo encontram-se representados os espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM, das fases *S* e *T* para as ligações *Yyn0* e *Yyn0d*.

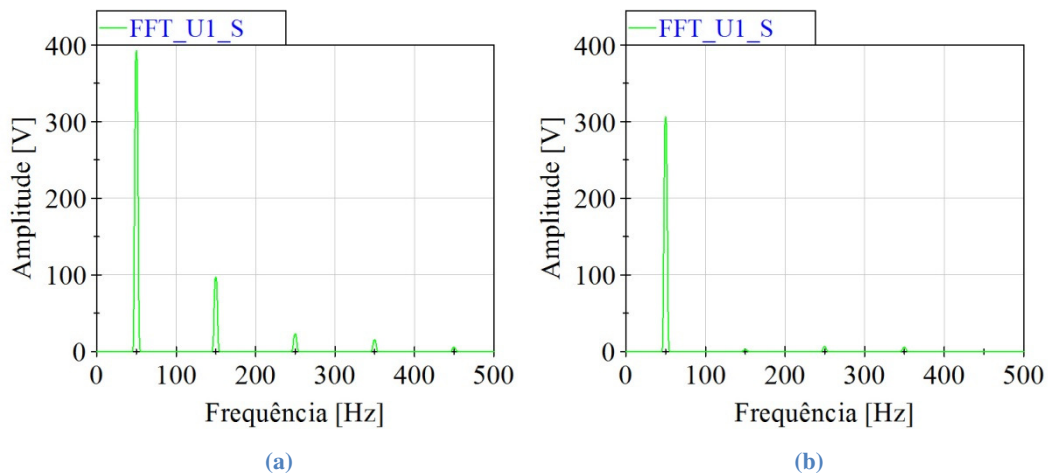


Fig. B.5 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase *S*: (a) Ligação *Yyn0*; (b) Ligação *Yyn0d*.

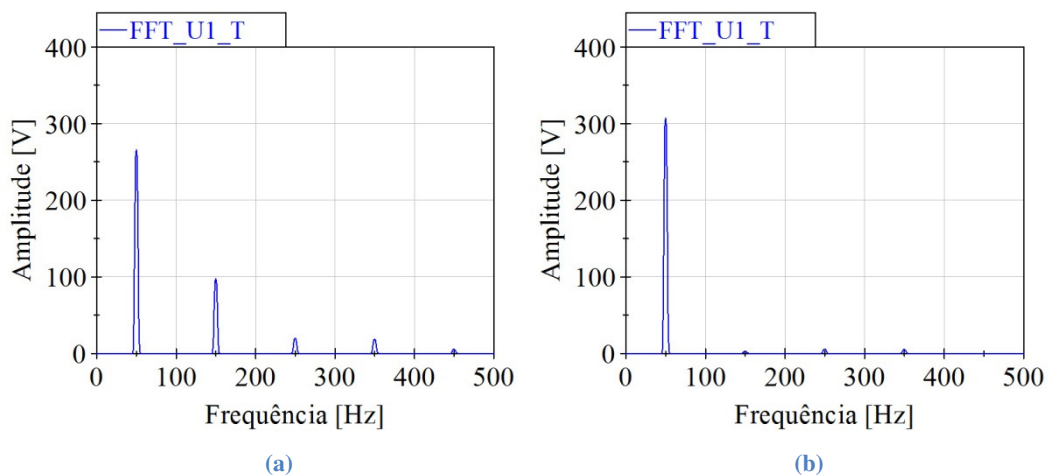


Fig. B.6 – Representação dos espectrogramas das tensões simples do enrolamento primário do BTTM da fase *T*: (a) Ligação *Yyn0*; (b) Ligação *Yyn0d*.

Anexo C – Resultados anexos aos ensaios do diagnóstico de avarias

C.1 Ensaios sem avaria

Vazio com e sem terciário

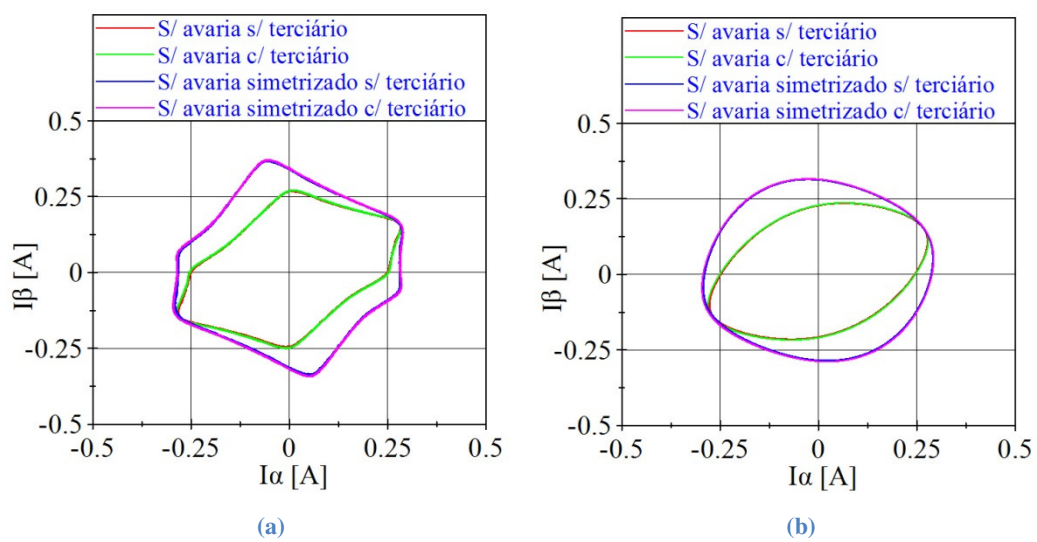


Fig. C.1 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador se encontra em vazio: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.

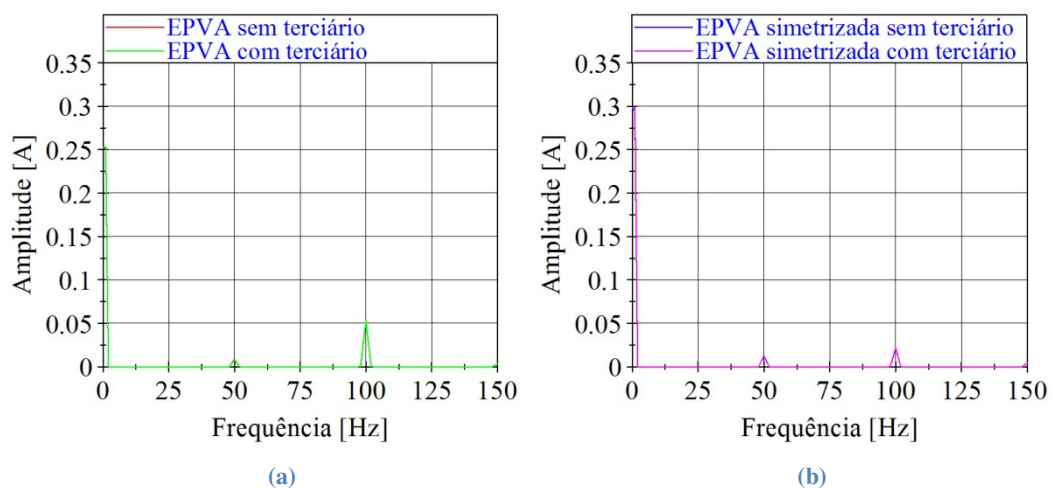


Fig. C.2 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Carga monofásica resistiva entre fase e neutro com e sem terciário

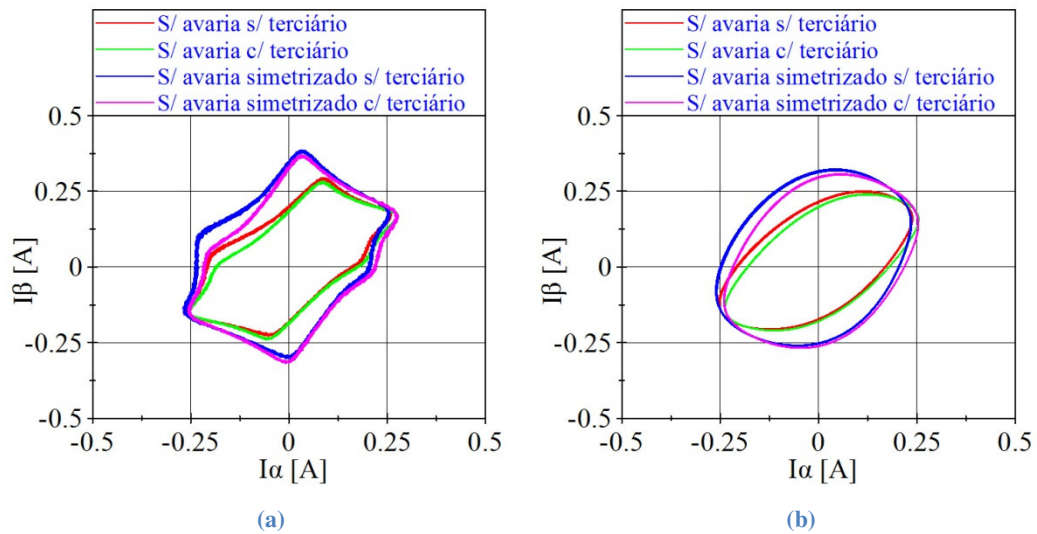


Fig. C.3 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador alimenta uma carga monofásica resistiva entre fase e neutro: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.

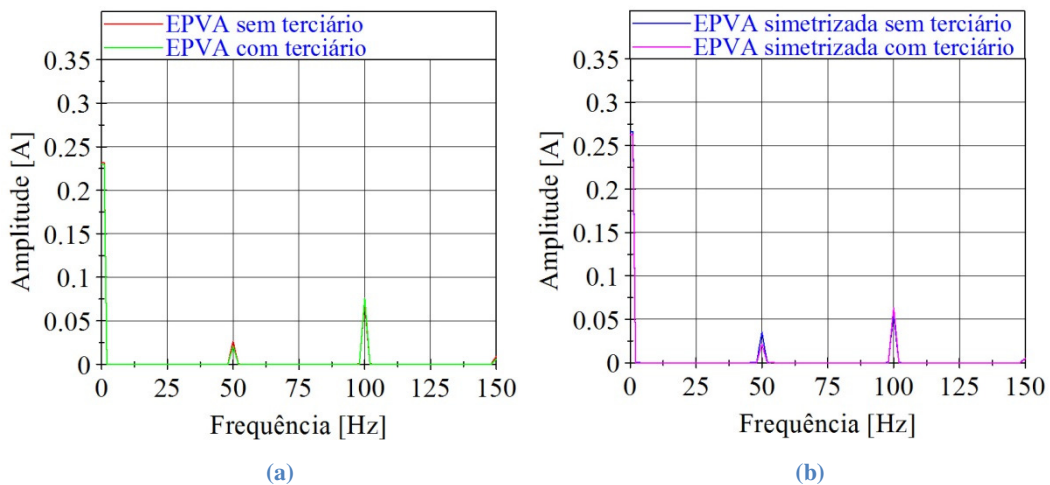


Fig. C.4 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga monofásica resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Carga monofásica indutiva entre fase e neutro com e sem terciário

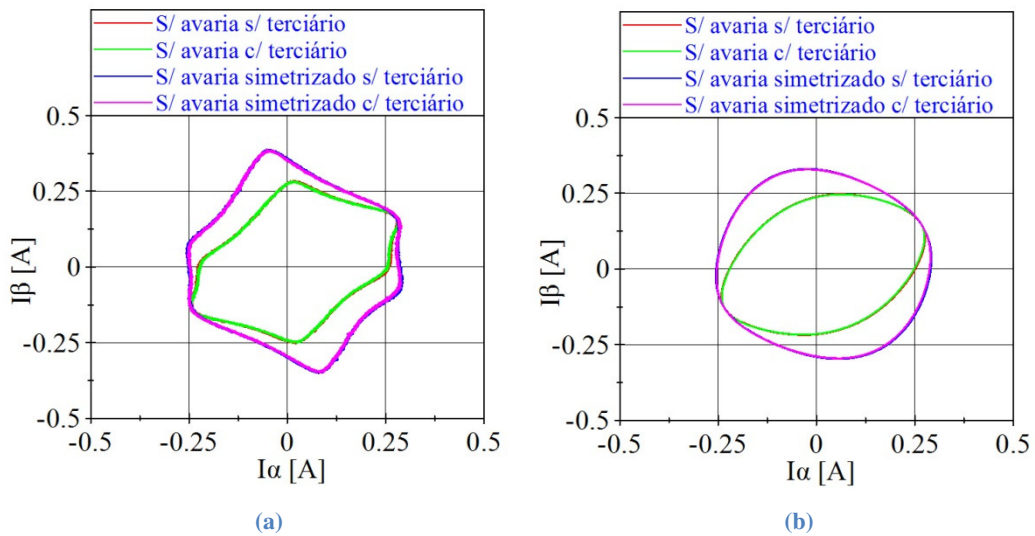


Fig. C.5 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador alimenta uma carga monofásica indutiva entre fase e neutro: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.

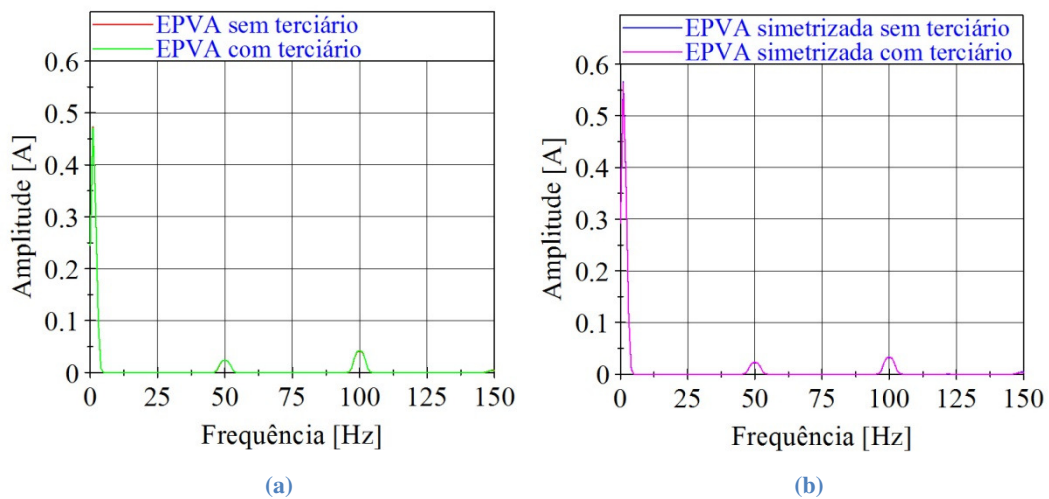


Fig. C.6 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga monofásica indutiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Carga trifásica equilibrada com e sem terciário

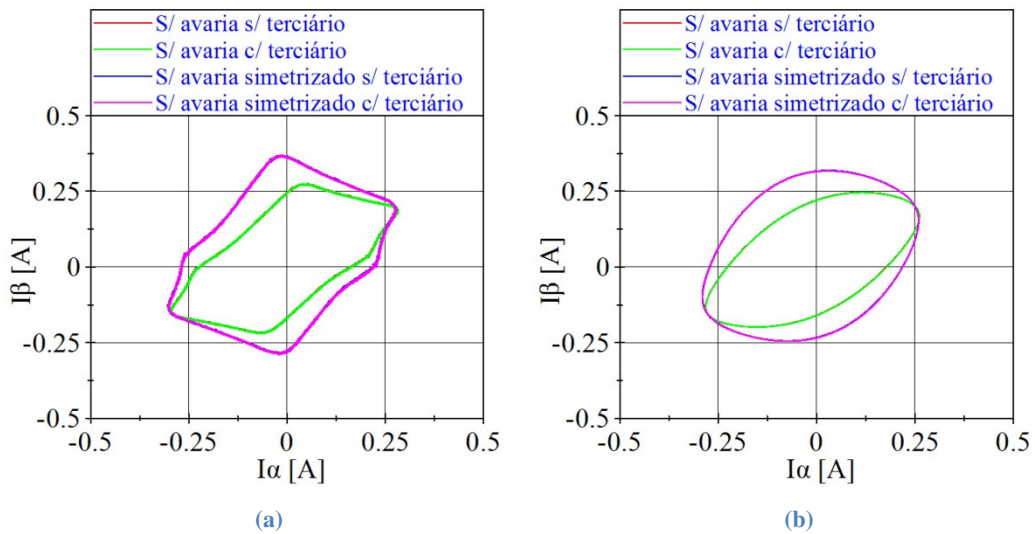


Fig. C.7 – Representação do vetor de Park das correntes de excitação quando o transformador alimenta uma carga trifásica e equilibrada: (a) resultados experimentais; (b) resultados experimentais filtrados.

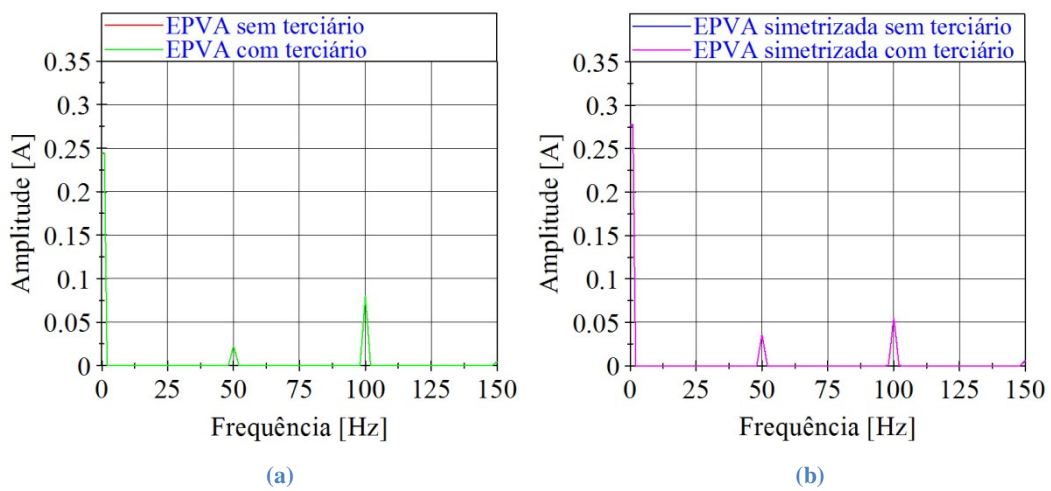


Fig. C.8 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com carga trifásica e equilibrada: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

C.2 Ensaio na presença de curto-circuito entre espiras do enrolamento primário

Fase S

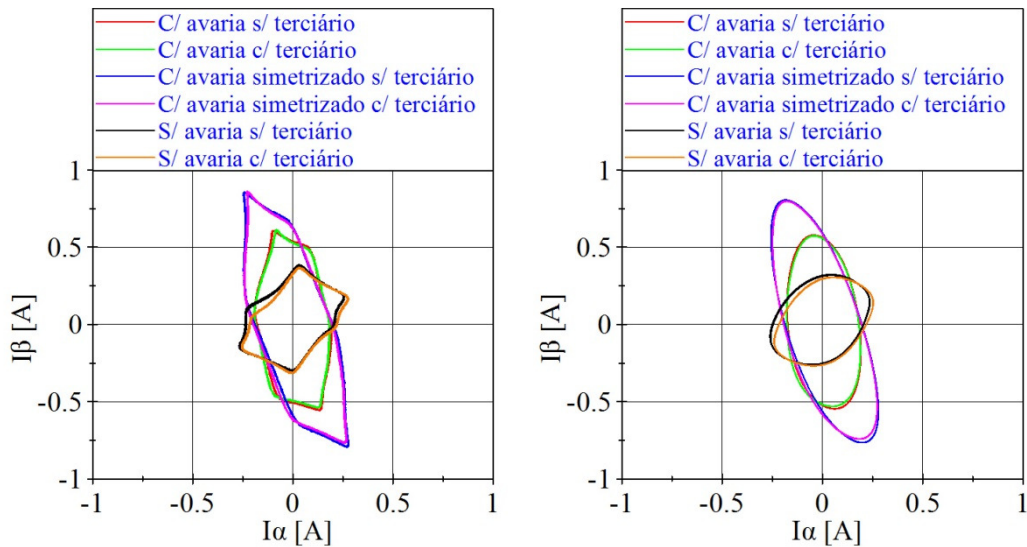


Fig. C.9 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase S em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

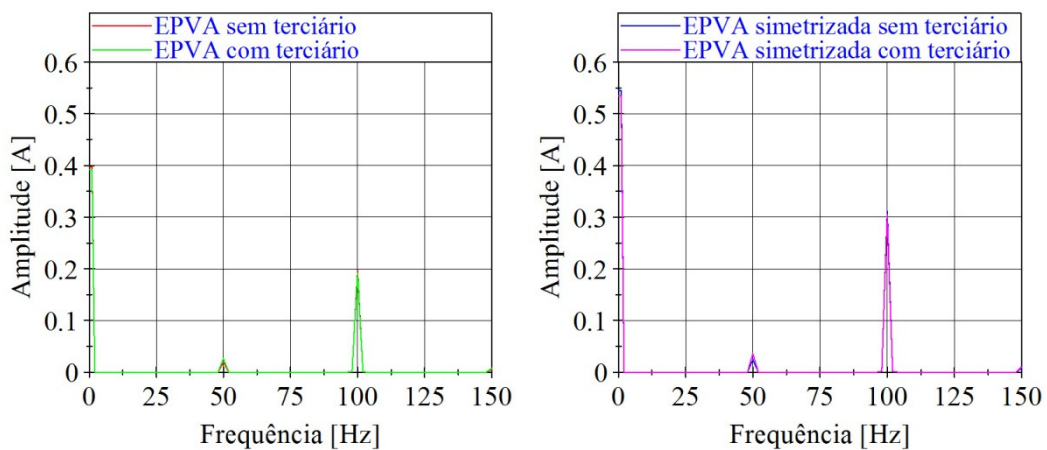


Fig. C.10 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase S curto-circuitadas e alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Fase T

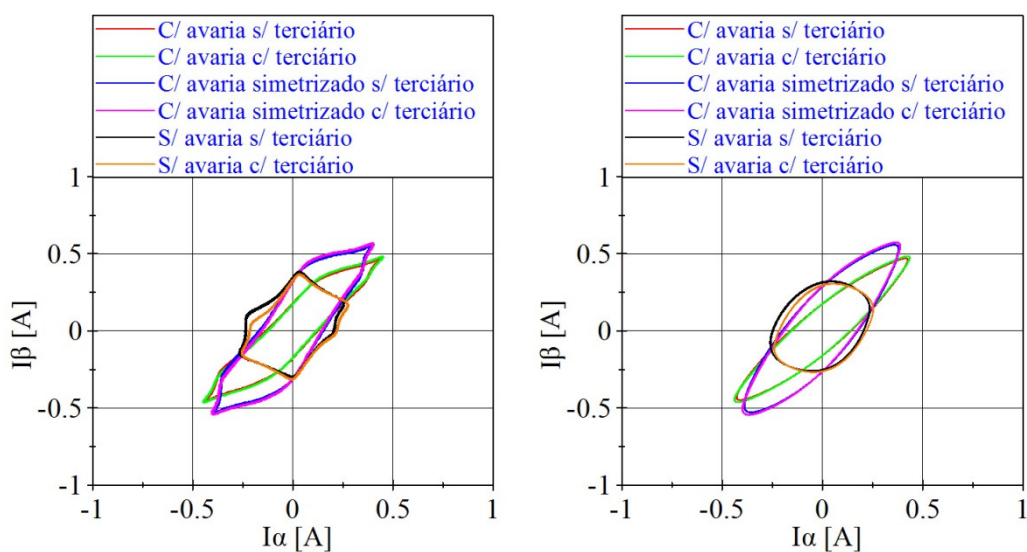


Fig. C.11 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase T em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

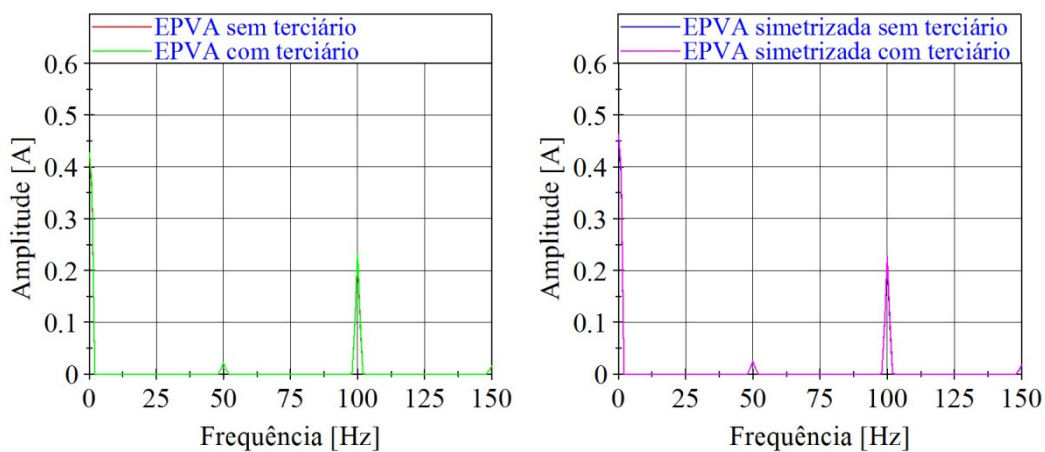


Fig. C.12 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento primário da fase T curto-circuitadas e alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

C.3 Ensaio na presença de curto-circuito entre espiras do enrolamento secundário

Fase R

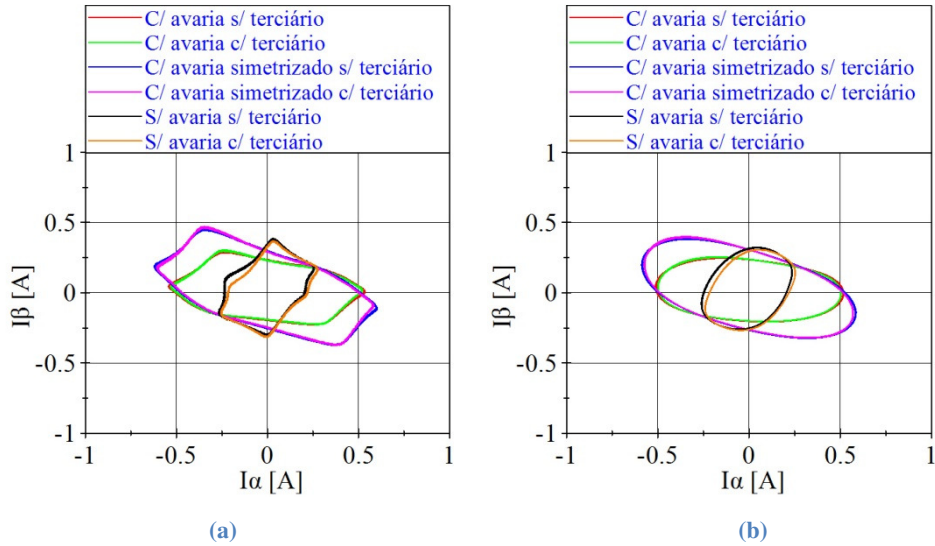


Fig. C.13 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase R em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

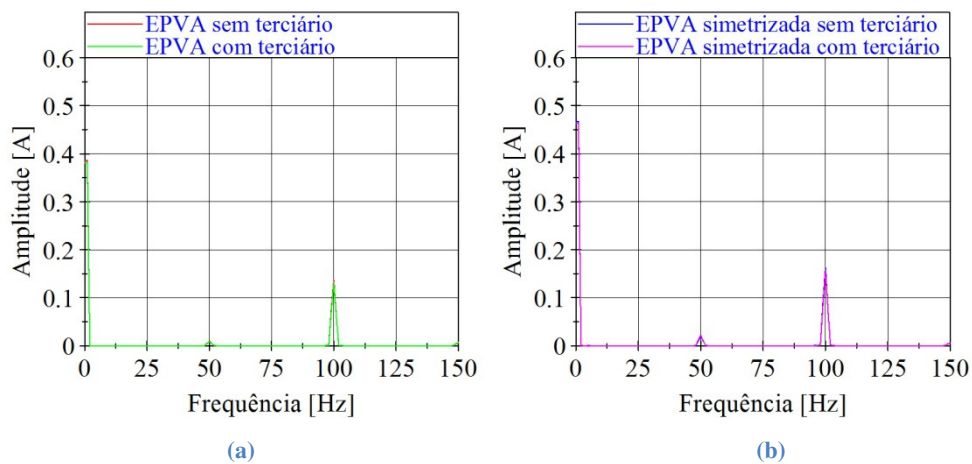


Fig. C.14 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase R curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Fase S

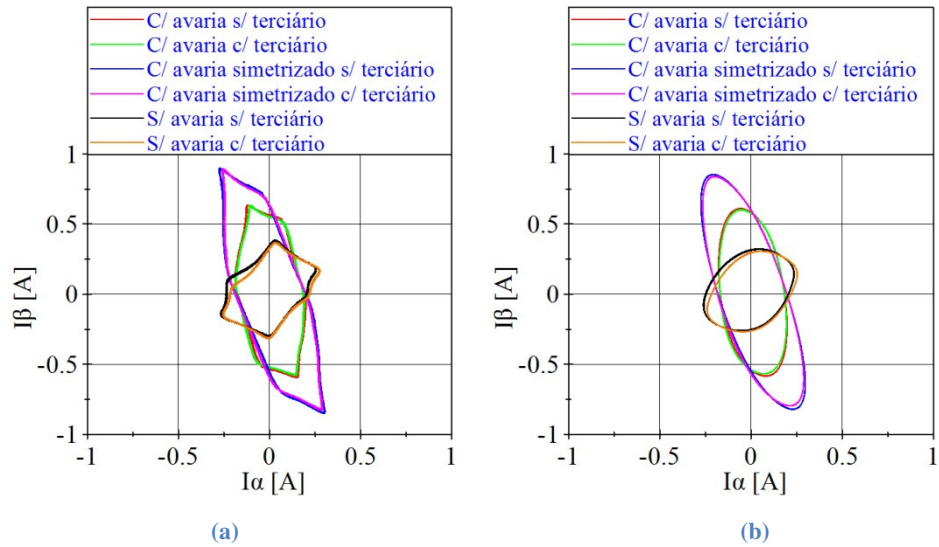


Fig. C.15 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase S em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

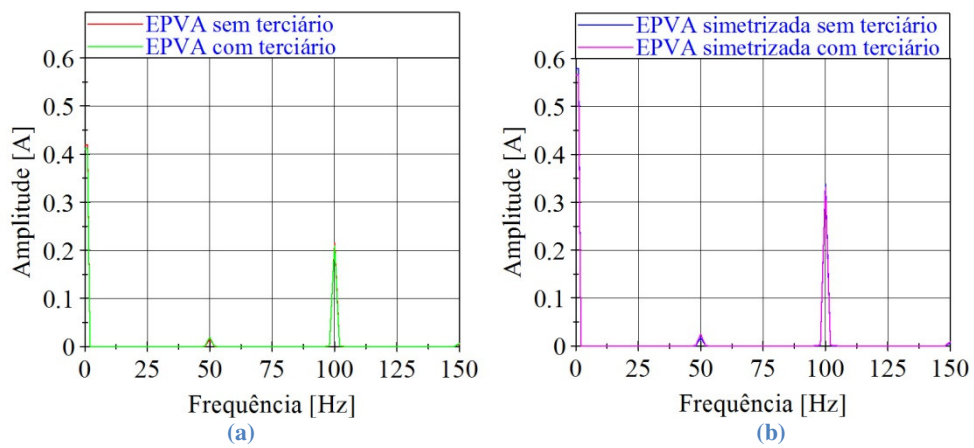


Fig. C.16 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase S curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Fase T

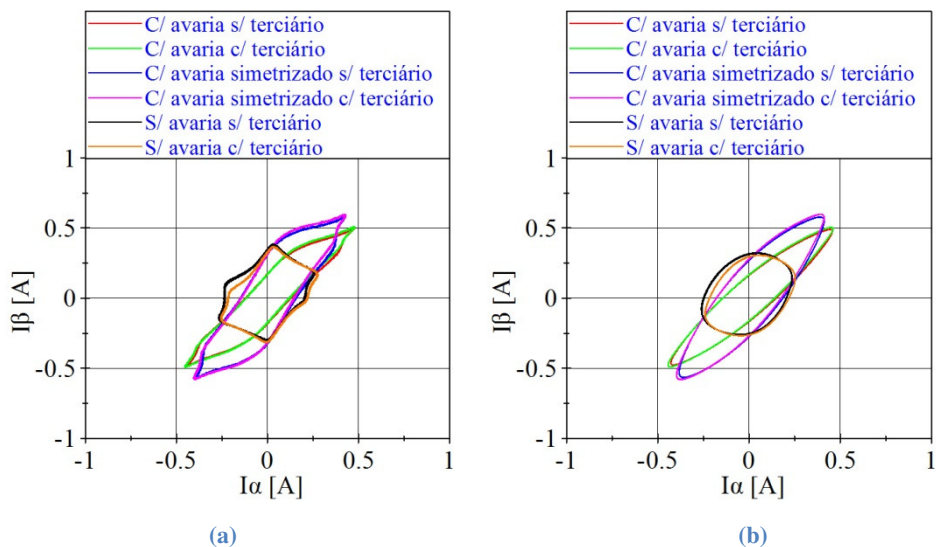


Fig. C.17 – Representação do VPCE no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase T em curto-circuito e quando o transformador alimenta uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) resultado experimental; (b) resultado experimental filtrado.

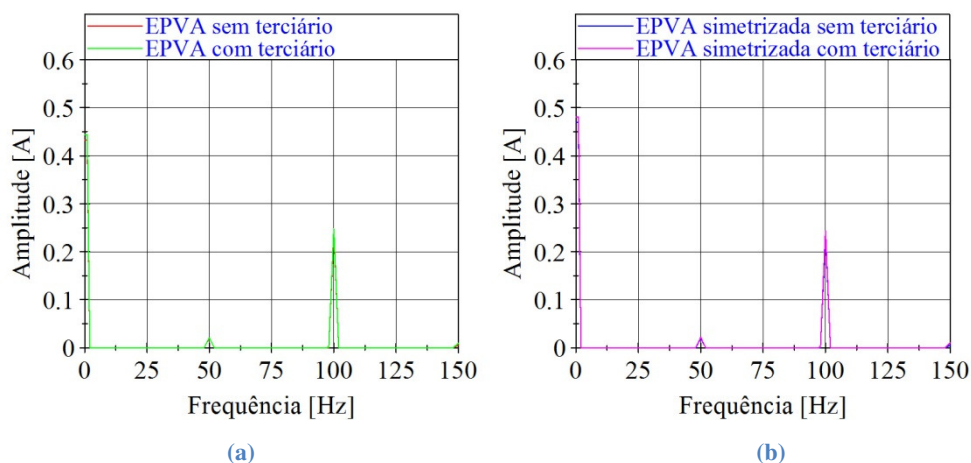


Fig. C.18 – EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio com 5 % das espiras do enrolamento secundário da fase T curto-circuitadas, alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro: (a) correntes de excitação reais; (b) correntes de excitação simetrizadas.

Tabela C.1 – Representação dos fatores de severidade no ensaio em vazio, com 5 % das espiras nas fases R, S e T do enrolamento secundário alimentando uma carga resistiva entre fase e neutro.

			I_{DC} (A)	I_{2f} (A)	FS (%)
Fase R	Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.386	0.137	35.49 %
		Com terciário	0.381	0.131	34.38 %
	Com matriz de simetrização	Sem terciário	0.467	0.163	34.90 %
		Com terciário	0.463	0.156	33.69 %
Fase S	Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.419	0.211	50.36 %
		Com terciário	0.411	0.209	50.85 %
	Com matriz de simetrização	Sem terciário	0.579	0.338	58.38 %
		Com terciário	0.566	0.331	58.48 %
Fase T	Sem matriz de simetrização	Sem terciário	0.433	0.241	55.66 %
		Com terciário	0.444	0.247	55.63 %
	Com matriz de simetrização	Sem terciário	0.469	0.236	50.32 %
		Com terciário	0.481	0.244	50.73 %

C.4 Ensaios na presença de curto-circuito entre espiras do enrolamento primário com alimentação desequilibrada

Curto-circuito na fase S

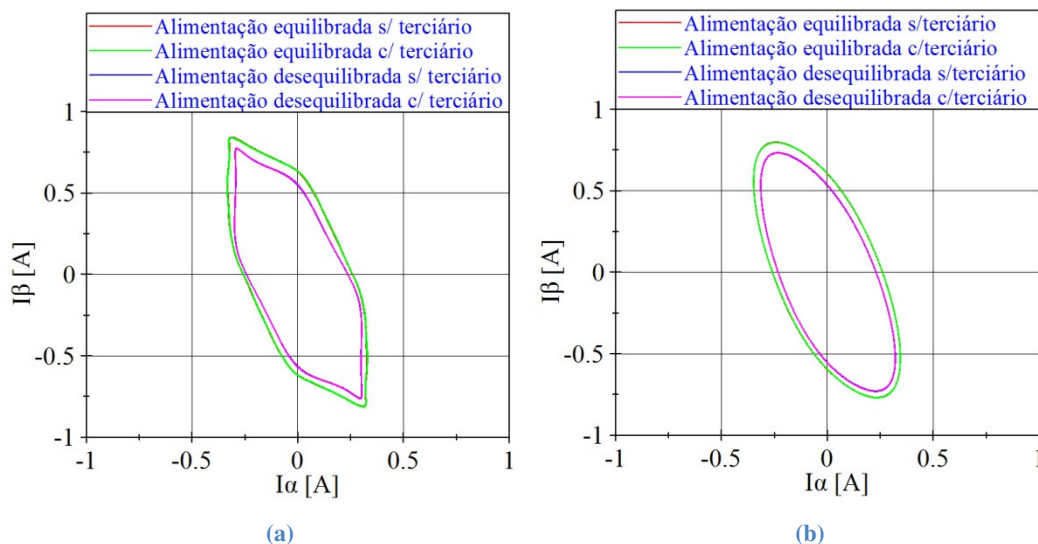


Fig. C.19 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase S e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.

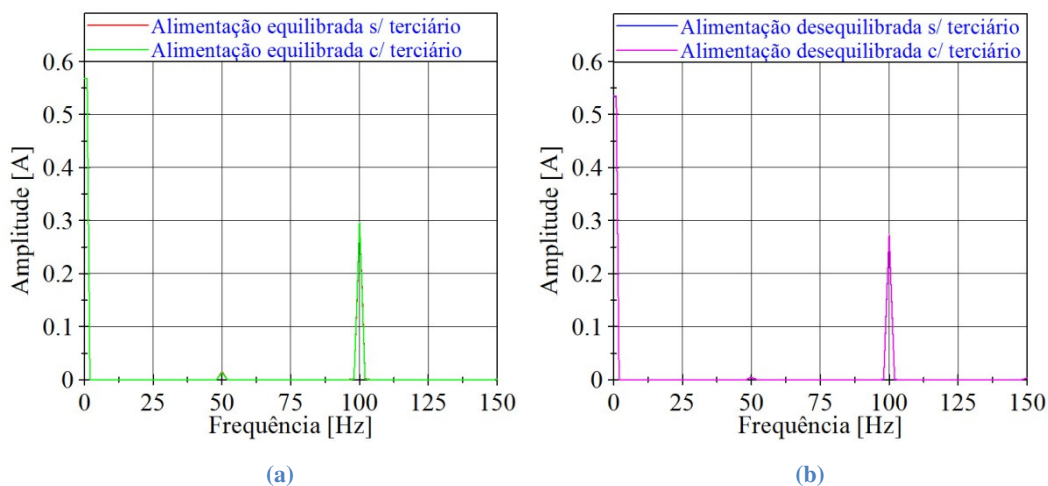


Fig. C.20 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase S: (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.

Curto-circuito na fase T

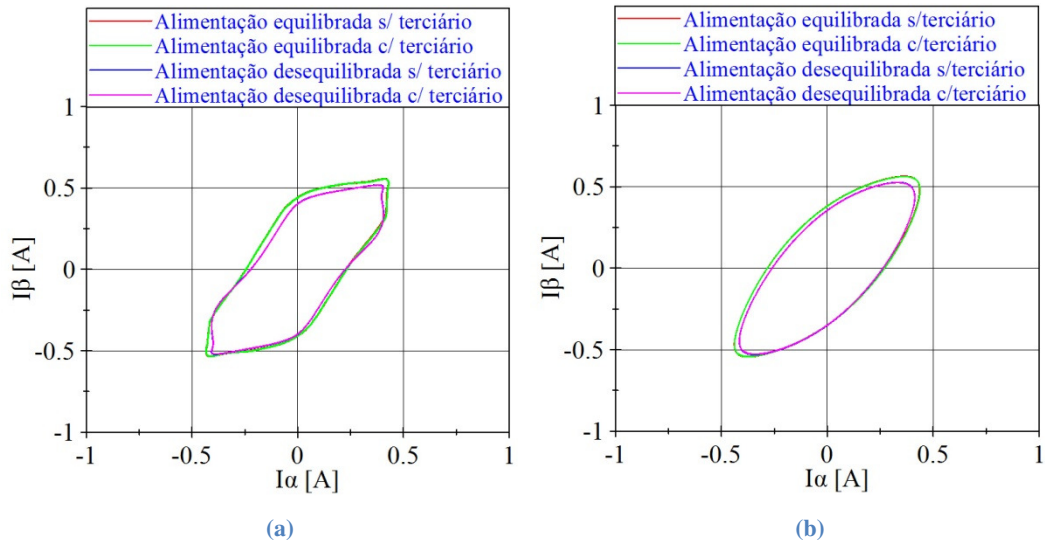


Fig. C.21 – Representação do VPCE no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase T e com alimentação equilibrada e desequilibrada: (a) Resultados reais; (b) Resultados filtrados.

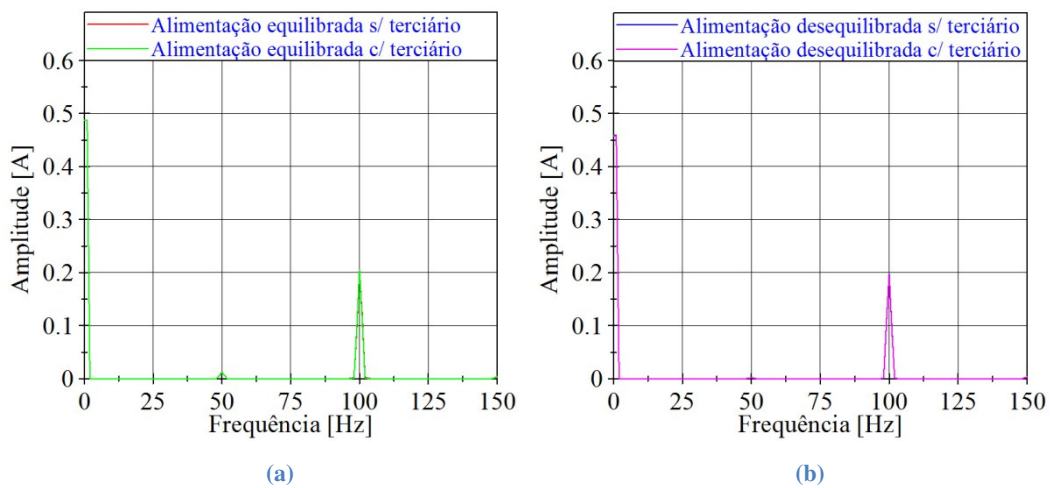


Fig. C.22 – Representação do EPVA das correntes de excitação do transformador no ensaio em vazio, com curto-circuito de 5 % das espiras do enrolamento primário da fase T : (a) Alimentação equilibrada; (b) Alimentação desequilibrada.

Anexo D – Instrumentação utilizada

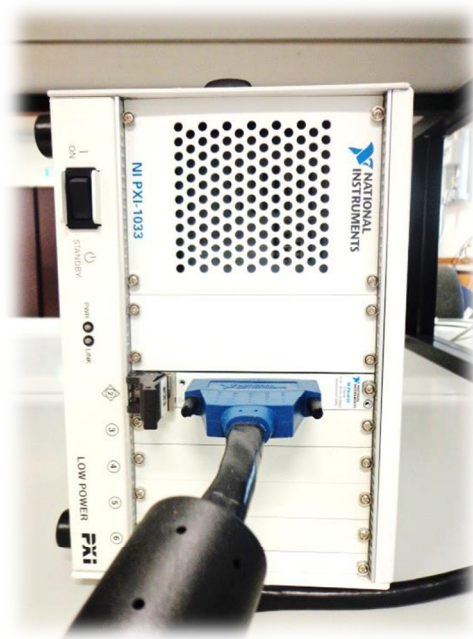


Fig. D.1 – Sistema PXI-1033 com a carta PXI-6133 incorporada usada nos ensaios laboratoriais.

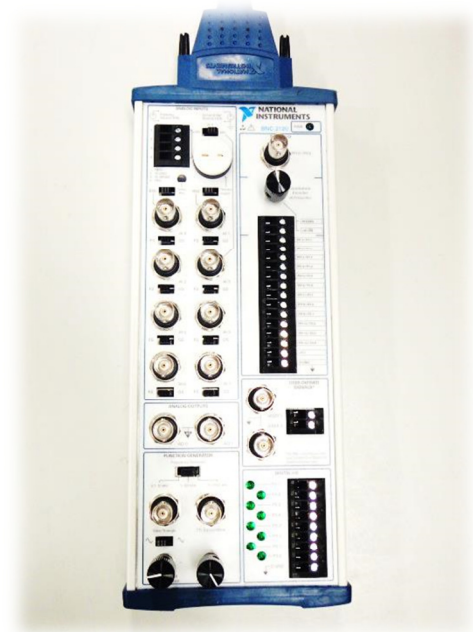


Fig. D.2 – Caixa de terminais ligada ao PXI usada nos ensaios laboratoriais.



Fig. D.3 – Fotografia da caixa de medida utilizada na obtenção dos dados nos ensaios laboratoriais.



Fig. D.4 – Yokogawa WT3000, utilizado nos ensaios laboratoriais.