

JOÃO FILIPE DE BRITO BENTO

**UTILIZAÇÃO DE BOBINAS DE TESTE PARA ANÁLISE DO FLUXO
HOMOPOLAR EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

2021

JOÃO FILIPE DE BRITO BENTO

**UTILIZAÇÃO DE BOBINAS DE TESTE PARA ANÁLISE DO FLUXO
HOMOPOLAR EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores
Especialidade em Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Prof. Luís M. R. Oliveira



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

2021

UTILIZAÇÃO DE BOBINAS DE TESTE PARA ANÁLISE DO FLUXO HOMOPOLAR EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DE TRABALHO

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

(João Filipe de Brito Bento)

Copyright © 2021 por João Filipe de Brito Bento

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, um especial agradecimento ao meu professor orientador Luís Oliveira, por me ter orientado e ajudado no desenvolvimento deste trabalho, desde o início até ao fim, pois foi incansável. Obrigado pelo seu esforço, pela sua dedicação, pela paciência, pela disponibilidade de ajudar sempre. Sem o seu apoio a realização deste trabalho não seria possível.

Agradeço também a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Universidade do Algarve, pela formação e ensinamento ao longo do meu percurso académico como estudante de licenciatura e mestrado, pois uma maneira ou de outra, forneceram-me as bases para a realização deste trabalho.

À E-Redes (anteriormente EDP Distribuição), pela cedência do transformador de potência de 50 kVA cuja cuba foi utilizada nalguns ensaios experimentais e à CME, pelo tratamento do respetivo processo de transferência e tratamento de resíduos, manifesto o meu agradecimento. Neste contexto, manifesto o meu particular agradecimento ao Eng. Luís Martins Silva e ao Eng. Ruben Guerreiro, pela ajuda prestada neste processo.

Por fim quero agradecer especialmente aos meus pais e ao meu irmão, pelo esforço, pelo incentivo, pela paciência e pela força que me deram para ultrapassar mais uma barreira e conseguir a realização de um sonho.

A todos um grande obrigado.

RESUMO

Os transformadores são dos equipamentos mais essenciais e vitais da rede elétrica, constituindo um componente fundamental nos processos de produção, transporte e distribuição de energia elétrica. Ao longo da sua vida o transformador está sujeito a esforços térmicos, mecânicos e eletromagnéticos, os quais, atuando individualmente ou em conjunto, contribuem para o envelhecimento do sistema de isolamento, podendo os danos cumulativos que ele sofre provocar a falha total do transformador. Têm sido propostos e investigados diversos métodos de monitorização contínua, que permitem detetar os defeitos, ainda em fase incipiente, e evitar a sua progressão para incidentes de dimensão catastrófica. Um dos métodos bastante promissor para verificar o estado de funcionamento do transformador, consiste na monitorização do fluxo magnético de fugas, utilizando bobinas de teste para esse efeito.

Este trabalho tem como objetivo efetuar uma análise exploratória sobre as alterações que se verificam na distribuição do fluxo homopolar nos transformadores trifásicos em função dos desequilíbrios da carga, da assimetria da tensão de alimentação e da ocorrência de defeitos internos. Pretende-se averiguar inicialmente se é possível detetar alterações na distribuição do fluxo homopolar com recurso a utilização das bobinas de teste. Esta variação, se detetável, pode servir para identificar a ocorrência de um defeito. São apresentados resultados experimentais e de simulação, onde se analisam casos de estudo com diversas condições de funcionamento, onde se inclui a influência do tipo de ligação dos enrolamentos, a presença da cuba e do enrolamento terciário.

Palavras-chave: Fluxo Homopolar, Transformadores Trifásicos, Bobinas de Teste, Monitorização.

ABSTRACT

Transformers are one of the most essential and vital pieces of equipment in the electrical network, constituting a fundamental component in the processes of generation, transport and distribution of electrical energy. Throughout its life, the transformer is subject to thermal, mechanical and electromagnetic stresses, which, acting individually or together, contribute to the aging of the insulation system, and the cumulative damage it suffers can cause the transformer to fail. Several methods of continuous monitoring have been proposed and investigated, which make it possible to detect defects, even in the incipient aspect, and prevent their progression to incidents of a catastrophic dimension. One of the very promising methods to verify the operating status of the transformer is monitoring the leakage magnetic flux, using test coils for this purpose.

This work aims to carry out an exploratory analysis of the changes that occur in the distribution of homopolar flux in three-phase transformers as a function of load imbalances, asymmetry of the supply voltage and the occurrence of internal defects. It is intended to initially investigate whether it is possible to detect changes in the homopolar flux distribution using the test coils. This variation, if detectable, can serve to identify the occurrence of a defect. Experimental and simulation results are presented, where case studies with different operating conditions are analyzed, including the influence of the type of connection of the windings, the presence of the tank and the tertiary winding.

Keywords: Zero Sequence Flux, Three-Phase Transformers, Test Coils, monitoring.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Conceitos Fundamentais.....	3
2.1 Transformador.....	3
2.1.1 Núcleo	4
2.1.2 Enrolamentos.....	6
2.1.3 Cuba	6
2.2 Princípio de funcionamento	7
2.3 Componentes de fluxo magnético	9
2.4 Sistemas Assimétricos.....	10
2.5 Fluxo Homopolar	12
2.5.1 Fluxo homopolar provocado pela característica não linear da curva de magnetização.....	13
2.5.2 Fluxo homopolar provocado pelo desequilíbrio da carga e/ou fonte.....	15
2.6 Papel do enrolamento terciário na mitigação do fluxo homopolar nos transformadores trifásicos	16
2.7 Monitorização do fluxo homopolar e princípio do método.....	17
2.8 Bobinas de Teste	19
3. Modelo Computacional do Transformador Trifásico.....	21
3.1 Análise pelo Método dos Elementos Finitos (FEM).....	21
3.2 Determinação de Parâmetros e Caracterização do Transformador	21
3.3 Ligações dos enrolamentos	23
4. Medição do Fluxo Homopolar com Bobinas de Teste.....	25
4.1 Ensaio Homopolar.....	25
4.1.1 Ensaio em curto-circuito	27
4.1.2 Ensaio em Vazio:	30
4.2 Ligação YNyn0	33
4.2.1 YNyn0: Regime equilibrado	33
4.2.2 YNyn0: carga desequilibrada (fase A-neutro)	37
4.2.3 YNyn0: alimentação desequilibrada (falta de fase A)	41
4.3 Ligação Yyn0 (sem neutro do primário).....	44
4.3.1 Yyn0: Regime equilibrado	44
4.3.2 Yyn0: carga desequilibrada (fase A-neutro)	46
4.3.3 Yyn0: alimentação desequilibrada (falta de fase A)	49
4.4 Ligação Dyn11	51
4.4.1 Dyn11: Regime equilibrado	51
4.4.2 Dyn11: carga desequilibrada (fase A-neutro)	54

4.4.3	Dyn11: alimentação desequilibrada I (interrupção no enrolamento da fase A)...	57
4.4.4	Dyn11: alimentação desequilibrada II (interrupção na linha A)	59
4.4.5	Dyn11: alimentação desequilibrada III (alimentação da fase B)	62
5.	Influência da Cuba na Análise ao Fluxo Homopolar.....	65
5.1	Influência da cuba	65
5.2	Cuba de chapas.....	65
5.3	Ensaio homopolares com a cuba de chapas	66
5.3.1	Ensaio homopolar em curto-circuito.	66
5.3.2	Ensaio homopolar em vazio	67
5.4	Ligação YNyn0 com a cuba de chapas	68
5.4.1	YNyn0: Regime equilibrado	68
5.4.2	YNyn0: alimentação desequilibrada (falta de fase A)	71
5.5	Cuba de um transformador de 50kVA	73
5.6	Ensaio homopolar com a cuba de 50kVA.....	74
5.6.1	Ensaio homopolar de curto-circuito	74
5.6.2	Ensaio homopolar em Vazio	75
5.7	Ligação YNyn0 com a cuba de 50kVA	76
5.7.1	YNyn0: Regime equilibrado	76
5.7.2	YNyn0 carga desequilibrada (fase A-neutro).....	78
6.	Influência do Enrolamento Terciário.....	81
6.1	Yyn0d carga desequilibrada (fase A-neutro)	81
7.	Ocorrência de Defeitos Internos	85
7.1	Ocorrência de curto-circuito entre espiras	85
7.1.1	Curto-circuito com 2 espiras no enrolamento primário da fase A	85
7.1.2	Curto-circuito com 74 espiras no enrolamento primário da fase A	89
7.1.3	Curto-circuito entre espiras: análise para outros níveis de severidade do defeito	91
7.2	Deformação nos Enrolamentos	93
8.	Conclusões.....	97
	Referências Bibliográficas	99

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Principais constituintes de um transformador [1].....	4
Figura 2.2-Transformador monofásico [1].....	5
Figura 2.3-Transformador colunas trifásicos de 3 colunas com enrolamentos concêntricos [1].	5
Figura 2.4-Transformador couraçado trifásico com os enrolamentos alternados [1].	6
Figura 2.5-Transformador Monofásico- princípio de funcionamento [2].....	7
Figura 2.6-Distribuição do fluxo no núcleo [3].....	9
Figura 2.7-Distribuição de fluxos no transformador trifásico [4].	10
Figura 2.8-Sistema Trifásico assimétrico: decomposição dos sistemas [5].	10
Figura 2.9-Curva de magnetização e relação entre as formas de onda da tensão, corrente e fluxo [6].	13
Figura 2.10-(a) Harmônicos da corrente de magnetização com fluxo sinusoidal; (b) harmônicos do fluxo com corrente de magnetização sinusoidal [6].	13
Figura 2.11-(a) Ligação Yyn0 em regime desequilibrado; (b) distribuição das correntes; (c) fluxos homopolares; (d) desequilíbrio das tensões simples. [6].....	15
Figura 2.12-Ligação Yynd0 em regime desequilibrado e distribuição das correntes [6].	16
Figura 2.13-Distribuição do fluxo homopolar nos transformadores trifásicos de 3 colunas. ..	18
Figura 2.14-Localização das Bobinas de Teste.	19
Figura 3.1-Dimensões e Geometria do núcleo, dos enrolamentos e das bobinas de teste.	22
Figura 3.2-Esquema elétrico YNyn0 (Adaptado de [12]).	23
Figura 3.3- Esquema elétrico Dyn11 (Adaptado de [12]).	23
Figura 4.1(a): Circuito equivalente da sequência homopolar para a ligação YNyn; (b) Circuito equivalente da sequência homopolar para a ligação Yyn ($Z_{B'}$ representa a impedância da fonte) [13].	27
Figura 4.2-Esquema para o ensaio homopolar em curto-circuito.	28
Figura 4.3-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	29
Figura 4.4- Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	29
Figura 4.5-Esquema para o ensaio homopolar em vazio.	30
Figura 4.6-Fugas entre os fluxos homopolares gerados no núcleo e os fluxos que se fecham pelas bobinas de teste.	32

Figura 4.7-Localização alternativa das bobinas de teste para medição do fluxo homopolar...	32
Figura 4.8-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal da corrente no primário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	33
Figura 4.9- Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.....	33
Figura 4.10-Esquema de ligação YNyn0 em regime equilibrado.	34
Figura 4.11-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.....	35
Figura 4.12-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das correntes no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.....	35
Figura 4.13-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.	35
Figura 4.14-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste(a) experimental;(b) simulação.....	36
Figura 4.15-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.	37
Figura 4.16-Esquema de ligação YNyn0 com carga desequilibrada.	37
Figura 4.17-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário a) experimental; b) simulação.	38
Figura 4.18-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.....	38
Figura 4.19-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.	39
Figura 4.20-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior, resultado experimental.	39
Figura 4.21-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada (fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).....	40
Figura 4.22-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada (fase C): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).....	40
Figura 4.23-Esquema de ligação YNyn0 com alimentação desequilibrada.....	41
Figura 4.24-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.	42
Figura 4.25- Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.....	43
Figura 4.26-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.....	43

Figura 4.27-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada (sem fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).....	44
Figura 4.28-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada (sem fase C): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).....	44
Figura 4.29-Esquema de ligação Yyn0 em regime equilibrado.	45
Figura 4.30-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.....	45
Figura 4.31-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.	46
Figura 4.32-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.	46
Figura 4.33-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior, resultado experimental.	46
Figura 4.34-Esquema de ligação Yyn0 com carga desequilibrada.	47
Figura 4.35-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.	47
Figura 4.36-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.....	48
Figura 4.37-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada: Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.	48
Figura 4.38-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada (fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).....	49
Figura 4.39-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada (fase C): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).....	49
Figura 4.40-Esquema de ligação Yyn0 com alimentação desequilibrada.....	50
Figura 4.41- Ensaio Yyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.	50
Figura 4.42-Ensaio Yyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.....	51
Figura 4.43-Ensaio Yyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.....	51
Figura 4.44-Esquema de ligação Dyn11 em regime equilibrado.	52
Figura 4.45-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões simples de alimentação: (a) experimental;(b) simulação.	53
Figura 4.46-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).....	53

Figura 4.47-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.....	53
Figura 4.48-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.	54
Figura 4.49-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.....	54
Figura 4.50-Esquema de ligação Dyn11 com carga desequilibrada.	55
Figura 4.51-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).....	55
Figura 4.52-Ensaio Dyn11 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes de linha no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.	56
Figura 4.53-Ensaio Dyn11 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.....	56
Figura 4.54-Ensaio Dyn11 com carga desequilibrada: Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.	56
Figura 4.55-Esquema de ligação Dyn11 com alimentação desequilibrada: interrupção da fase A.....	57
Figura 4.56-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação)....	58
Figura 4.57-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.....	58
Figura 4.58-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.....	58
Figura 4.59-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.....	59
Figura 4.60-Esquema de ligação Dyn11 com alimentação desequilibrada: interrupção da linha A.....	60
Figura 4.61-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).	60
Figura 4.62-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.....	61
Figura 4.63-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.	61

Figura 4.64-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.	61
Figura 4.65-Esquema de ligação Dyn11 com alimentação desequilibrada: apenas alimentação da fase B.	62
Figura 4.66-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).....	63
Figura 4.67-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação. 63	
Figura 4.68-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.	64
Figura 4.69-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.	64
Figura 5.1-Cuba construída com chapas de ferro.....	65
Figura 5.2.-Dimensões e característica da cuba de chapas.	65
Figura 5.3-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	66
Figura 5.4-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	67
Figura 5.5-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal da corrente no primário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	68
Figura 5.6-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.....	68
Figura 5.7-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.....	69
Figura 5.8-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das correntes no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.....	69
Figura 5.9-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.	70
Figura 5.10-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.	70
Figura 5.11-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.	71
Figura 5.12-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.	72

Figura 5.13-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.	72
Figura 5.14-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.	72
Figura 5.15-Ensaio experimental com cuba de 50kVA.	73
Figura 5.16-Dimensões e característica da cuba de 50kVA.	73
Figura 5.17-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	74
Figura 5.18-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	75
Figura 5.19-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	75
Figura 5.20-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.	76
Figura 5.21-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.	77
Figura 5.22-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das Correntes no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.	77
Figura 5.23-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.	77
Figura 5.24-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste(a) experimental;(b) simulação.	78
Figura 5.25-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.	78
Figura 5.26-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário a) experimental; b) simulação.	79
Figura 5.27-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.	79
Figura 5.28-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.	79
Figura 6.1-Geometria do transformador trifásico com o enrolamento terciário.	81
Figura 6.2-Esquema de ligação Yyn0d com carga desequilibrada.	82
Figura 6.3-Evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) Sem terciário; b) Com terciário.	82
Figura 6.4-Evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) Sem terciário; b) Com terciário.	83

Figura 6.5-Evolução temporal das correntes no enrolamento terciário.	83
Figura 6.6-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) Sem terciário; b) Com terciário.....	84
Figura 7.1- Esquema de ligação YNyn0 para estudo dos curtos-circuitos na fase A.	86
Figura 7.2-Modelo trifásico para estudo dos curtos-circuitos na fase A.....	86
Figura 7.3- Evolução temporal das correntes no enrolamento primário para o caso da ocorrência de 2 espiras em curto-circuito na fase A do primário do transformador: (a) experimental;(b) simulação; (Ligação YNyn0, carga resistiva equilibrada 16 Ω).	87
Figura 7.4-Ensaio YNyn0 em: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário (mesmas condições da figura 7.3): (a) experimental;(b) simulação.....	87
Figura 7.5- Evolução temporal das correntes associadas ao defeito (mesmas condições da figura 7.3): (a) experimental;(b) simulação.	88
Figura 7.6-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (mesmas condições da figura 7.3) a) experimental;(b) simulação.	88
Figura 7.7-Evolução temporal das correntes no enrolamento primário para o caso da ocorrência de 74 espiras em curto-circuito na fase A do primário do transformador: (a) experimental;(b) simulação; (Ligação YNyn0, carga resistiva equilibrada 16 Ω).	90
Figura 7.8-Evolução temporal das correntes no enrolamento secundário (mesmas condições da figura 7.7): (a) experimental;(b) simulação.....	90
Figura 7.9-Evolução temporal das correntes ao enrolamento afetado (mesmas condições da figura. 7.7): (a) experimental;(b) simulação.....	90
Figura 7.10- Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (mesmas condições da figura 7.7): (a) experimental;(b) simulação.....	91
Figura 7.11-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de curto-circuito entre espiras (simulação):(a) 5%;(b) 10%;(c) 15%;(d) 20%.....	93
Figura 7.12-Modelo trifásico para estudo da deformação ao enrolamento interior da fase A.	94
Figura 7.13- Evolução temporal das correntes no enrolamento primário para o caso de deformação da espira.....	95
Figura 7.14-Evolução temporal das correntes no enrolamento Secundário para o caso de deformação da espira.....	95
Figura 7.15-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de deformação no enrolamento em 2% (Contração).....	96
Figura 7.16-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de deformação no enrolamento em 4% (Contração).....	96
Figura 7.17-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de deformação no enrolamento em 6% (Contração).....	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros obtidos no ensaio em curto-circuito	23
Tabela 4.1-Resultados do ensaio homopolar em curto-circuito.	28
Tabela 4.2-Resultados do ensaio homopolar em vazio.	30
Tabela 4.3-Valor eficaz das tensões de alimentação.....	34
Tabela 4.4-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	34
Tabela 4.5-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	38
Tabela 4.6-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.....	40
Tabela 4.7-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	42
Tabela 4.8-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.....	43
Tabela 4.9-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	45
Tabela 4.10-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	47
Tabela 4.11-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.....	49
Tabela 4.12-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	50
Tabela 4.13-Valor eficaz das tensões simples de alimentação.....	52
Tabela 4.14-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.....	52
Tabela 4.15-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.....	52
Tabela 4.16-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.....	55
Tabela 4.17-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.....	55
Tabela 4.18-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.....	57
Tabela 4.19-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.....	57
Tabela 4.20-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.....	60
Tabela 4.21-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.....	60
Tabela 4.22-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.....	62
Tabela 4.23-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.....	63
Tabela 5.1-Resultados do ensaio homopolar em curto-circuito.	66
Tabela 5.2-Resultados do ensaio homopolar em vazio.	67
Tabela 5.3-Valor eficaz das tensões de alimentação.....	69
Tabela 5.4-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	69

Tabela 5.5-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	71
Tabela 5.6-Resultados do ensaio homopolar em curto-circuito.	74
Tabela 5.7-Resultados do ensaio homopolar em vazio.	75
Tabela 5.8-Valor eficaz das tensões de alimentação.	76
Tabela 5.9-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	77
Tabela 5.10-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	79
Tabela 6.1-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	82
Tabela 6.2-Comparação entre os valores teóricos simplificados e resultados de simulação. ...	84
Tabela 7.1-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	87
Tabela 7.2-Comparação do valor eficaz das tensões nas bobinas de teste com e sem defeito.	88
Tabela 7.3-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.	89
Tabela 7.4-Valor da resistência de curto-circuito para a condição de $I_{cc}=2I_n$	91
Tabela 7.5-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.	92
Tabela 7.6-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste para o caso de uma deformação no enrolamento em 2%.	94
Tabela 7.7-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.	95

LISTA DE SÍMBOLOS

f - Frequência (Hz);

I_{cc} - Corrente de curto-circuito (A);

I_{0P} - Corrente homopolar no enrolamento primário (A);

I_{0S} - Corrente homopolar no enrolamento secundário (A);

I_{PA} - Valor eficaz da corrente no primário do enrolamento da fase A, (A);

I_{PB} - Valor eficaz da corrente no primário do enrolamento da fase B, (A);

I_{PC} - Valor eficaz da corrente no primário no enrolamento da fase C, (A);

I_{Rcc} - Corrente na resistência de curto-circuito (A);

I_{SA} - Valor eficaz da corrente no secundário do enrolamento da fase A, (A);

I_{SB} - Valor eficaz da corrente no secundário do enrolamento da fase B, (A);

I_{SC} - Valor eficaz da corrente no secundário do enrolamento da fase C, (A);

N_1 - Número de espiras no enrolamento primário

N_2 - Número de espiras no enrolamento secundário

N_{BT} - Número de espiras na bobina de teste

R_1 - Resistência do enrolamento primário (Ω);

R_2 - Resistência do enrolamento secundário (Ω);

R_{cc} - Resistência de curto-circuito (Ω);

S - Potência aparente, (VA);

t - Tempo (s);

V_1 - Tensão no enrolamento primário (V);

V_2 - Tensão no enrolamento secundário (V);

V_{0P} - Tensão homopolar no enrolamento primário (V);

V_{0S} - Tensão homopolar no enrolamento secundário (V);

V_{BT} - Tensão induzida na bobina de teste (V);

V_{BTT} - Tensão induzida na bobina de teste de topo (V);

V_{BTB} - Tensão induzida na bobina de teste de base (V);

V_{PA} - Valor eficaz da tensão no primário do enrolamento da fase A, (V);

V_{PB} - Valor eficaz da tensão no primário do enrolamento da fase B, (V);

V_{PC} - Valor eficaz da tensão no primário no enrolamento da fase C, (V);

X_{CC} - Reactância de curto-circuito (Ω);

Z_{AB} - Impedância de curto-circuito (Ω);

Z_B - Impedância da fonte (Ω);

Z_M - Impedância de magnetização (Ω);

Z_{0cc} - Impedância homopolar de curto-circuito (Ω);

Z_{0m} - Impedância homopolar em vazio (Ω);

Z_{cc} - Impedância de curto-circuito (Ω);

ϕ - Fluxo magnético (Wb);

$\hat{\Phi}_{0BTT}$ - Fluxo homopolar detetado pela bobina de teste (Wb);

$\hat{\Phi}_{02}$ - Fluxo homopolar gerado no núcleo (Wb);

$\bar{\Phi}_A$ - Fluxo magnético da coluna da fase A (Wb);

$\bar{\Phi}_B$ - Fluxo magnético da coluna da fase B (Wb);

$\bar{\Phi}_C$ - Fluxo magnético da coluna da fase C (Wb);

ω - Velocidade angular (rad/s);

1. Introdução

O transformador foi um equipamento que revolucionou o setor elétrico, pois permitiu o transporte de energia a longas distâncias e a redução de perdas nas linhas. Anteriormente à sua utilização, a geração de energia era produzida em tensões reduzidas, inicialmente em DC, sendo entregue ao consumidor com o mesmo nível de tensão. O transporte de energia só poderia ser feito a distâncias muito reduzidas, devido às perdas que provocava na rede.

Com a introdução do transformador tornou-se possível elevar e/ou reduzir tensões, mitigar as perdas das linhas e garantir, com elevada eficiência e fiabilidade, o abastecimento de energia elétrica aos equipamentos elétricos, habitações e máquinas que conhecemos atualmente. Assim, desde a origem do sector elétrico, os transformadores constituem um dos equipamentos mais essenciais e vitais dos sistemas de transporte e distribuição de energia.

O sistema elétrico de energia pode ser afetado por anomalias, que poderão ocorrer nos vários componentes da rede elétrica. Devido á sua importância estratégica, uma falha num transformador poderá causar transtornos e indisponibilidade da rede elétrica, numa vasta região, podendo resultar em avultados prejuízos para a operadora de energia.

Ao longo da sua vida o transformador está sujeito a esforços térmicos, mecânicos e eletromagnéticos, os quais, atuando individualmente ou em conjunto, contribuem para o envelhecimento do sistema de isolamento, podendo resultar na falha total do transformador e retirá-lo de serviço. Certas anomalias podem ser indetetáveis pelos dispositivos de proteção do transformador, provocando a degradação do seu estado de funcionamento, podendo conduzir a uma avaria terminal.

Portanto, para garantir o bom funcionamento e a prolongar a vida útil deste equipamento, deve-se realizar manutenção preventiva e a deteção de anomalias que possam ocorrer. Para isso, existem métodos que permitem avaliar o estado de funcionamento do transformador, tais como, a análise dos gases no óleo, análise da resposta em frequência, a medição da indutância de fugas, a análise do fluxo de fugas, a medição das vibrações ou a medição das descargas parciais, entre outros. Recentemente têm sido propostos diversos métodos de monitorização contínua, que permitem detetar muitas avarias ainda em fase incipiente e assim evitar a sua progressão para incidentes de dimensão catastrófica.

Esta dissertação tem como principal objetivo analisar a viabilidade da utilização de bobinas de teste para caracterizar a distribuição do fluxo homopolar em transformadores trifásicos, possibilitando realizar a detecção de anomalias que possam vir a ocorrer. O fluxo homopolar é medido através da monitorização da tensão induzida nas referidas bobinas de teste.

Neste trabalho o método de medição do fluxo homopolar é aplicado a transformadores trifásicos de 3 colunas, com 2 e 3 enrolamentos por fase. É ainda analisada a influência da cuba e do enrolamento terciário. Para a realização do estudo foi desenvolvido um modelo computacional do transformador, baseado no método dos elementos finitos. Este modelo divide a estrutura geométrica do transformador em pequenos triângulos e devolve a solução de cada um deles, sendo o resultado final a soma das respostas obtidas para cada triângulo. Apesar da complexidade do modelo, este método permite habitualmente obter soluções de uma forma razoavelmente rápida e precisa.

São analisadas diversas condições de funcionamento, onde se incluem várias configurações das bobinas de teste, diversos tipos de ligação de enrolamentos, número de enrolamentos, regime de carga e de alimentação (equilibrado e desequilibrado), presença da cuba, e enrolamento terciário.

Os resultados de simulação serão validados com recurso a ensaios laboratoriais, nos quais se analisa se utiliza um transformador trifásico equipado com as bobinas de teste referidas anteriormente.

2. Conceitos Fundamentais

2.1 Transformador

Os transformadores são máquinas elétricas constituídas por dois ou mais enrolamentos bobinados em redor do núcleo ferromagnético comum. Através da indução eletromagnética, o transformador consegue transferir a energia do enrolamento que absorve a energia da rede, designado por enrolamento primário ao enrolamento que irá fornecer energia, ou enrolamento secundário, convertendo as grandezas de tensão e corrente alternada primária (associado à fonte), noutra sistema de grandezas secundárias, com diferentes amplitudes, adequadas aos diferentes tipos de carga [1]. Isto só é possível porque todos os enrolamentos estão acoplados magneticamente através de um circuito magnético, o núcleo. Normalmente nos transformadores da rede de energia, o enrolamento primário encontra-se associado ao enrolamento com tensão superior ou A.T. (Alta Tensão) e o enrolamento secundário está associado ao enrolamento com tensão inferior ou B.T (Baixa Tensão). Para poder se distinguir um transformador do seu tipo de ligação temos:

- **Transformador monofásico:** Na sua forma mais simples possui dois enrolamentos e um núcleo de duas colunas, sendo um enrolamento pertencente ao primário e o outro ao secundário.
- **Transformador trifásico:** Possui no mínimo seis enrolamentos (dois por fase) e o seu núcleo pode ser de colunas (três ou cinco) ou couraçado. Três dos enrolamentos são pertencentes ao primário e outros três ao secundário.

Como os transformadores são máquinas que sofrem aquecimento e de forma a evitar que o ar prejudique o isolamento das bobinas, coloca-se o núcleo e os enrolamentos numa cuba cheia de óleo de forma a refrigerar o transformador. A estes transformadores, são designados como transformadores em banho de óleo. Aos que não são mergulhados em óleo são chamados de transformadores secos [1].

Um transformador é constituído por:

- Circuito magnéticos ou núcleo;
- Enrolamentos;
- Isoladores de saída;
- Cuba, tampa da cuba, caso seja transformador "banho de óleo".

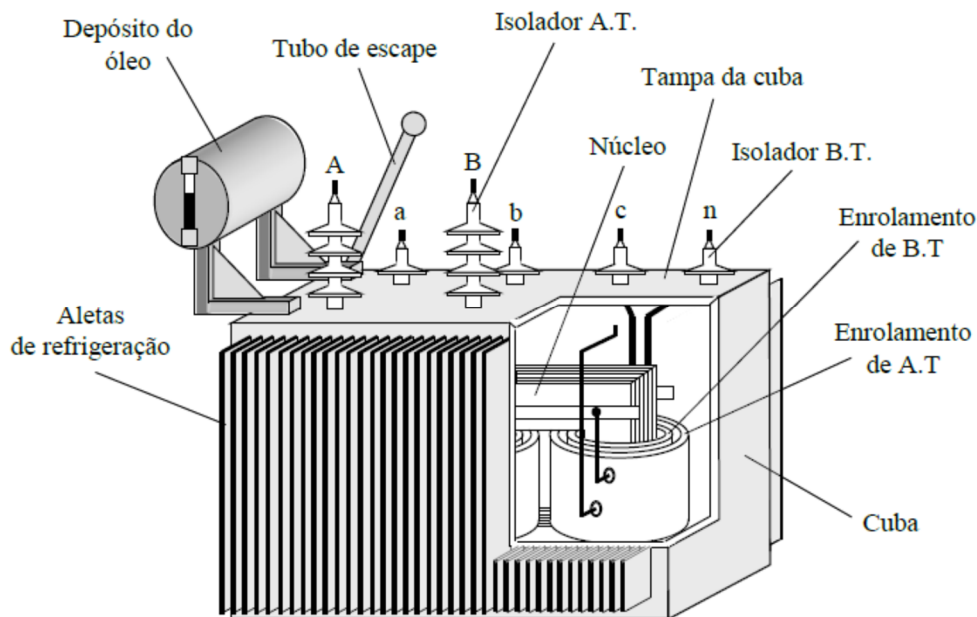


Figura 2.1- Principais constituintes de um transformador [1].

2.1.1 Núcleo

O núcleo transformador, também denominado de circuito magnético, permite que o fluxo magnético, criado pelas correntes que percorrem os enrolamentos, se feche por um percurso pré-definido, otimizando o acoplamento magnético entre os enrolamentos. O fluxo magnético ao fechar-se pelo núcleo provoca perdas no ferro (perdas por histerese e perdas por correntes de Foucault). O núcleo é composto por lâminas de aço-silício que, depois de empilhadas, formam as colunas e as culassas. Chamam-se colunas as partes do núcleo onde são colocados os enrolamentos. As culassas são os segmentos do circuito magnético que unem as colunas e fecham o circuito magnético. O espaço entre elas chama-se janela do núcleo [1].

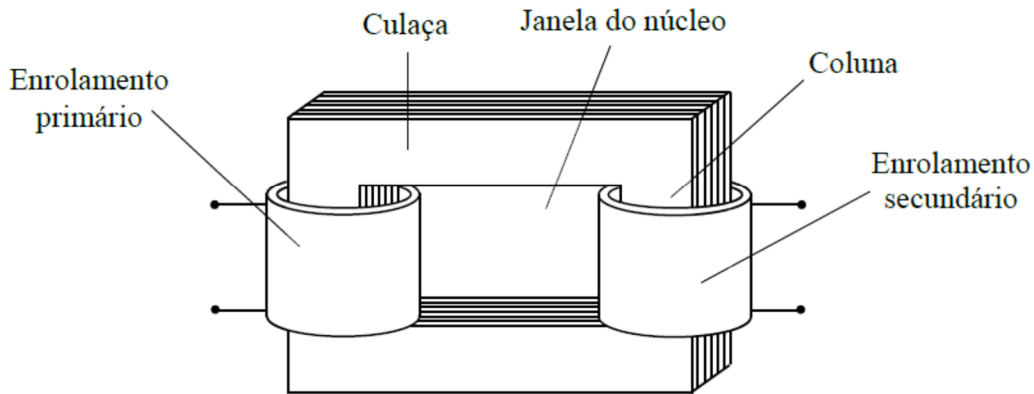


Figura 2.2-Transformador monofásico [1].

Tendo em consideração a posição dos enrolamentos, o núcleo do transformador poderá ser do tipo: coluna (envolvido) ou couraçado (envolvente). Nos transformadores de colunas os enrolamentos colocados sobre as colunas envolvem o respetivo circuito magnético (núcleo) sem serem envolvidos por este, pelo contrário, nos transformadores couraçados o circuito magnético envolve os enrolamentos. Os enrolamentos ficam quase totalmente cobertos pelo núcleo, de onde surgiu o nome de núcleo couraçado.

Na figura 2.3. está representado um transformador trifásico de três colunas com enrolamentos concêntricos. Na figura 2.4. está representado o transformador couraçado trifásico com enrolamentos alternados. Entre os transformadores de três colunas e o couraçado o mais utilizado é o de três colunas.

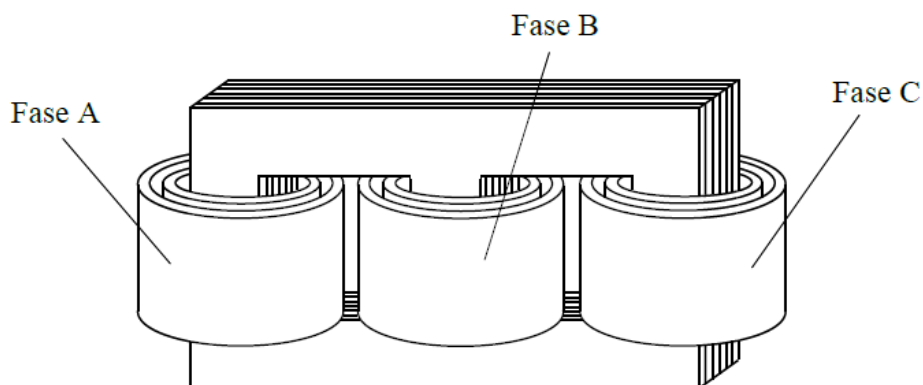


Figura 2.3-Transformador colunas trifásicos de 3 colunas com enrolamentos concêntricos [1].

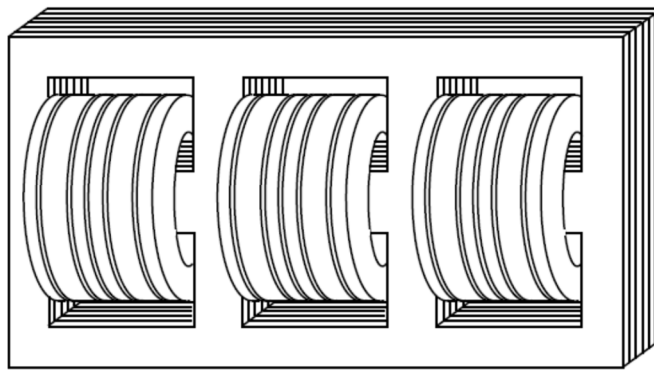


Figura 2.4-Transformador couraçado trifásico com os enrolamentos alternados [1].

2.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos são partes ativas do transformador por onde circula a corrente sendo compostos maioritariamente por cobre ou alumínio. O enrolamento com maior número de espiras é de alta tensão (A.T.) e o que tem menor espiras é de baixa tensão (B.T). Os enrolamentos podem ser do tipo concêntrico ou alternado:

- *Enrolamentos concêntricos*, quando as bobinas de alta e baixa tensão estão dispostas concêntricamente em torno das colunas. Normalmente, coloca-se a bobina do enrolamento de BT mais perto da coluna, visto ser mais fácil de a isolar do que a bobina do enrolamento de AT [1].
- *Enrolamentos alternados*, quando as bobinas dos enrolamentos de alta e baixa tensão se alternam, segundo a altura da coluna, de tal modo que as bobinas do enrolamento de BT são as que se encontram mais perto das culassas [1].

2.1.3 Cuba

Os transformadores imersos em óleo, normalmente tem perdas a nível térmico, que resultam num aumento substancial de temperatura nos seus elementos constituintes, requerendo um sistema de arrefecimento. De forma a assegurar esse arrefecimento o transformador é imerso em óleo no interior de uma cuba.

A cuba é um reservatório fechado fabricado com chapas de aço que asseguram a proteção mecânica do transformador e das suas partes ativas e contêm nível de estanquicidade de forma a evitar fugas de óleo. A "tampa" da cuba, localizada na parte superior permite a introdução ou a remoção do transformador. Ainda na tampa podem ser colocadas vários componentes, como o reservatório de óleo e os isoladores de saída dos enrolamentos AT e BT. Tipicamente as cubas podem ser lisas, ter aletas de refrigeração ou ainda terem radiadores ventilados.

O óleo, é um fluido com propriedades dielétricas e tem um grande poder isolante, pois além de permitir fazer o arrefecimento do transformador por convecção, também preenche os espaços vazios do isolamento sólido (celulose) nos enrolamentos, impregnando assim as camadas de isolamento. O aquecimento do transformador faz com que o óleo circule no interior da cuba assegurando a sua refrigeração natural.

2.2 Princípio de funcionamento

Considera-se um transformador monofásico ideal (enrolamentos, com resistência nula e circuito magnético com relutância também nula), representado na figura 2.5. Observe-se o sentido convencional das correntes, em que o enrolamento primário recebe energia de uma fonte e o secundário a entrega a uma carga.

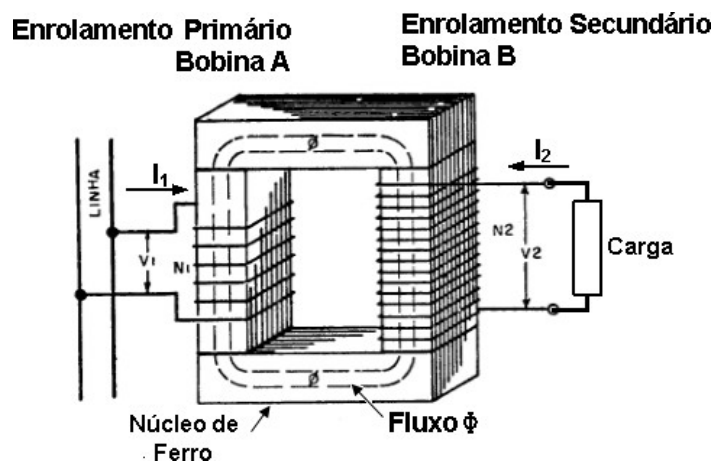


Figura 2.5-Transformador Monofásico- princípio de funcionamento [2].

No lado do enrolamento primário N_1 é ligada uma fonte de tensão alternada V_1 . A corrente I_1 ao circular pelo enrolamento primário, origina um fluxo magnético Φ no núcleo.

Segundo a lei de Faraday, o fluxo ao ser variável no tempo irá sempre induzir forças eletromotrizes (f.e.m) nos enrolamentos.

Como o fluxo magnético se fecha pelos dois enrolamentos, principalmente devido à presença do núcleo de ferro, irá ser gerada uma f.e.m. em cada enrolamento:

$$E_1 = -N_1 \times \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$E_2 = -N_2 \times \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Onde E_1 e E_2 são as f.e.m. resultantes da indução da variação do fluxo magnético ϕ , cujo valor é multiplicado pelo número de espiras induzidas dos enrolamentos, sendo N_1 e N_2 , o número de espiras de cada enrolamento.

Dividindo as duas equações anteriores chega-se a:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.3)$$

onde “a” é a razão de transformação.

Como a razão entre as f.e.m. é proporcional à razão do número de espiras dos enrolamentos correspondentes e sendo que no transformador ideal a f.e.m têm valor e sinal igual a tensão, resulta na seguinte expressão.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.4)$$

Considera-se uma carga aplicada ao transformador apresentado na figura 2.5. Uma vez o transformador é ideal, a potência é igual nos dois lados do transformador:

$$V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \quad (2.5)$$

onde

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.6)$$

ou seja:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.7)$$

Conclui-se que a razão entre os valores das correntes varia em proporção inversa com a razão de transformação. No modelo real, de facto não se verifica, pois, existe sempre corrente de excitação, fluxos de fugas, resistências dos enrolamentos e o ramo de magnetização que irá influenciar sobretudo as f.e.m. e por consequência, as tensões e as correntes.

2.3 Componentes de fluxo magnético

Quando circula corrente elétrica nos enrolamentos do transformador monofásico, figura 2.6, é produzido fluxo magnético que se pode dividir em diversas componentes:

- i) O fluxo que se fecha pelo núcleo ferromagnético: Esta componente do fluxo é predominante e envolve os dois enrolamentos, constituindo o fluxo útil, pois é responsável pela transferência de energia entre o primário e o secundário do transformador.
- ii) O fluxo que se dispersa em redor do núcleo ferromagnético, envolvendo apenas um enrolamento e não se fechando através do outro. Este fluxo é designado por fluxo de fugas ou de dispersão.

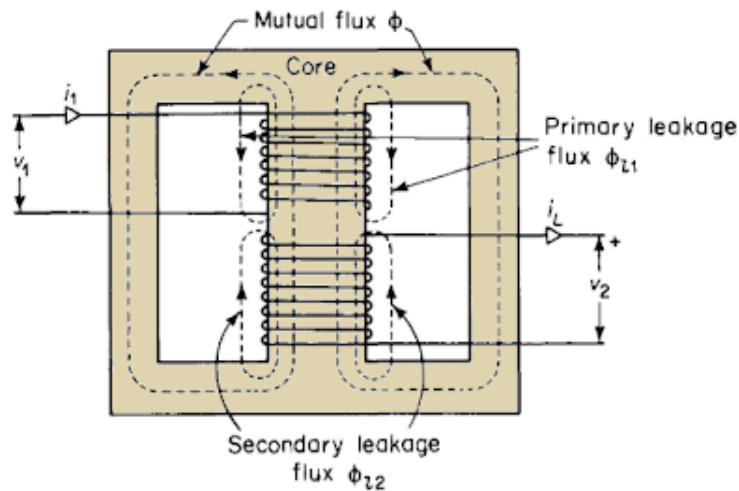


Figura 2.6-Distribuição do fluxo no núcleo [3].

Nos transformadores trifásicos pode considerar-se uma outra componente de fluxo, a qual envolve os dois enrolamentos da mesma coluna, mas fecha-se pelo exterior do núcleo, figura 2.7. Esta componente de fluxo designa-se por fluxo homopolar, devido à sua associação às componentes simétricas de sistemas trifásicos, que se definem de seguida.

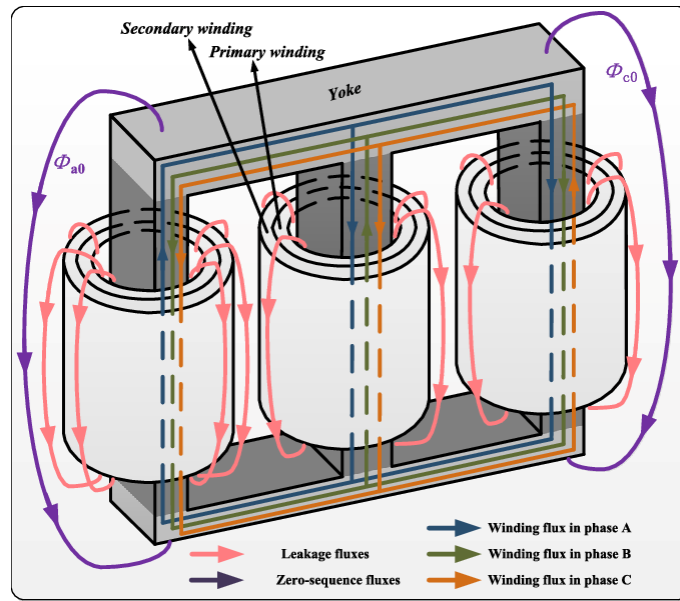


Figura 2.7-Distribuição de fluxos no transformador trifásico [4].

2.4 Sistemas Assimétricos

O método das componentes simétricas é utilizado para simplificar a análise de circuitos desequilibrados, resultantes, por exemplo, da ocorrência de defeitos na rede elétrica, tendo sido proposto e desenvolvido por Charles Fortescue entre 1918 e 1920 [5]. O teorema de Fortescue estabelece que um sistema trifásico assimétrico (figura 2.8(a)), pode ser decomposto num conjunto de três sistemas, direto, inverso e homopolar (figuras 2.8 (b), (c) e (d), respetivamente), designados por com componentes simétricas.

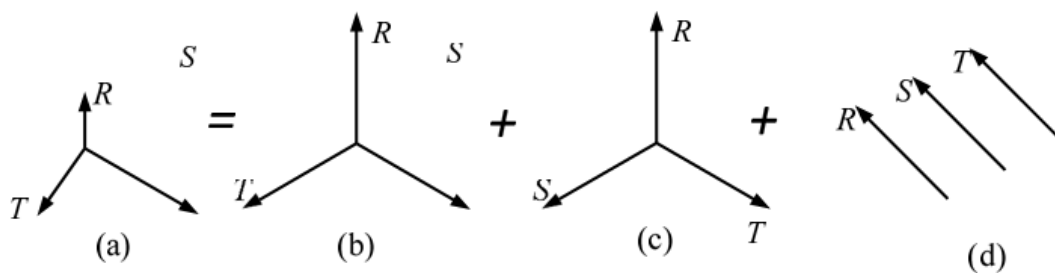


Figura 2.8-Sistema Trifásico assimétrico: decomposição dos sistemas [5].

Desta forma podem se decompor as correntes, tensões e fluxos nas componentes diretas, inversa e homopolares.

Sistema Direto:

É um sistema em que os fasores sucessivos (A, B e C) têm amplitude igual e defasamento em atraso de 120° . Para um sistema trifásico de correntes genérico I_A , I_B e I_C a sua componente simétrica direta vem expressa por:

$$\bar{I}_{Ad} = \frac{1}{3}(\bar{I}_A + a\bar{I}_B + a^2\bar{I}_C) \quad (2.8)$$

$$\bar{I}_{Bd} = \frac{1}{3}(a^2\bar{I}_A + \bar{I}_B + a\bar{I}_C) \quad (2.9)$$

$$\bar{I}_{Cd} = \frac{1}{3}(a\bar{I}_A + a^2\bar{I}_B + \bar{I}_C) \quad (2.10)$$

com

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2.11)$$

Sistema Inverso:

É um sistema em que os fasores sucessivos (A, B e C) têm amplitude igual e defasamento em avanço de 120° . Para um sistema trifásico de correntes genérico I_A , I_B e I_C a sua componente simétrica inversa vem expressa por:

$$\bar{I}_{Ai} = \frac{1}{3}(\bar{I}_A + a^2\bar{I}_B + a\bar{I}_C) \quad (2.12)$$

$$\bar{I}_{Bi} = \frac{1}{3}(a\bar{I}_A + \bar{I}_B + a^2\bar{I}_C) \quad (2.13)$$

$$\bar{I}_{Ci} = \frac{1}{3}(a^2\bar{I}_A + a\bar{I}_B + \bar{I}_C) \quad (2.14)$$

Sistema Homopolar:

É um sistema em que os fasores sucessivos (A, B e C) têm amplitude igual e defasamento nulo, ou seja, são iguais nas três fases. Para um sistema trifásico de correntes genérico I_A , I_B e I_C a sua componente simétrica homopolar vem expressa por:

$$\bar{I}_{AO} = \bar{I}_{BO} = \bar{I}_{CO} = \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C) \quad (2.15)$$

Em resultado de ser igual nas três fases a componente homopolar possui algumas características particulares:

- As tensões homopolares não podem existir nas tensões compostas, mas poderá existir nas tensões simples independentemente da ligação do neutro.[5]
- As correntes homopolares podem circular na malha de um circuito trifásico ligado em triângulo, mas não podem nas linhas de uma ligação em triângulo. [5]
- Num sistema com ligação estrela as correntes homopolares podem circular nas linhas com neutro ligado á terra, e nunca podem circular se a ligação em estrela estiver com o neutro isolado.[5]

2.5 Fluxo Homopolar

O fluxo homopolar no transformador trifásico é uma componente do fluxo magnético que possui a mesma amplitude e defasamento para as três fases. Nos transformadores com 3 colunas este fluxo fecha-se pelo exterior do núcleo ferromagnético, com um caminho de elevada relutância, tendo normalmente um valor reduzido. Nos transformadores de 5 colunas ou do tipo couraçado (ou em bancos de transformadores monofásicos) este fluxo fecha-se pelo próprio circuito magnético, podendo tomar já valores significativos.

Habitualmente a origem do fluxo homopolar está associada a duas condições de funcionamento: harmónicos devido à característica não linear da curva de magnetização e desequilíbrios na fonte e/ou carga do transformador. Estes dois fenómenos são explicados de seguida.

2.5.1 Fluxo homopolar provocado pela característica não linear da curva de magnetização

Devido à característica não linear da curva de magnetização do material ferromagnético a corrente de magnetização de um transformador monofásico possui uma forma de onda similar a um sino, conforme representado na figura 2.9 [6]. Esta característica não sinusoidal pode ser decomposta em frequência, exibindo uma componente fundamental e um terceiro harmônico, como termos mais preponderantes, figura 2.10 (a) [6].

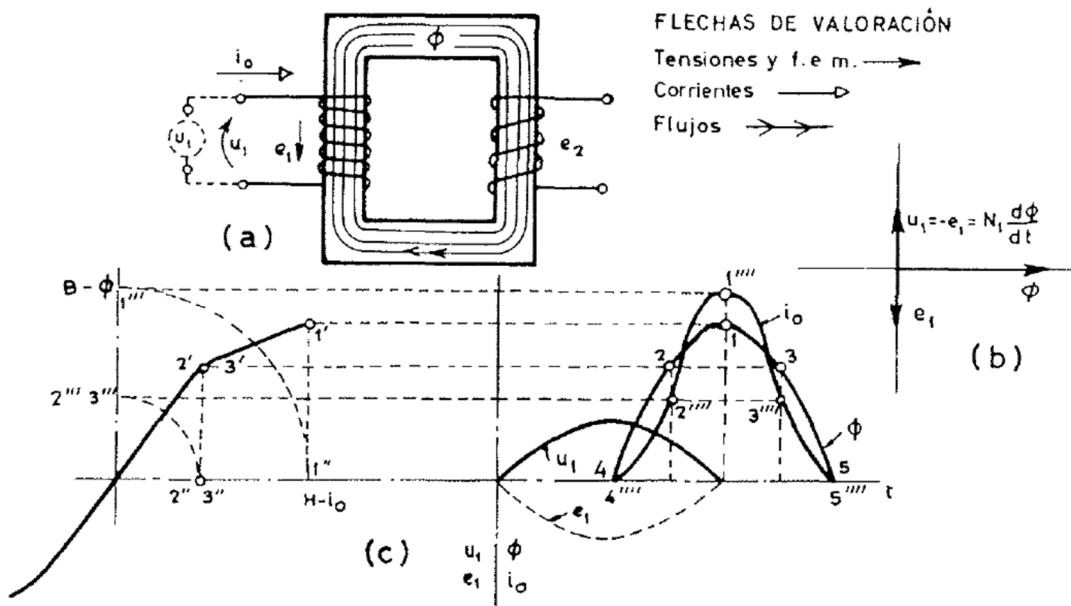


Figura 2.9-Curva de magnetização e relação entre as formas de onda da tensão, corrente e fluxo [6].

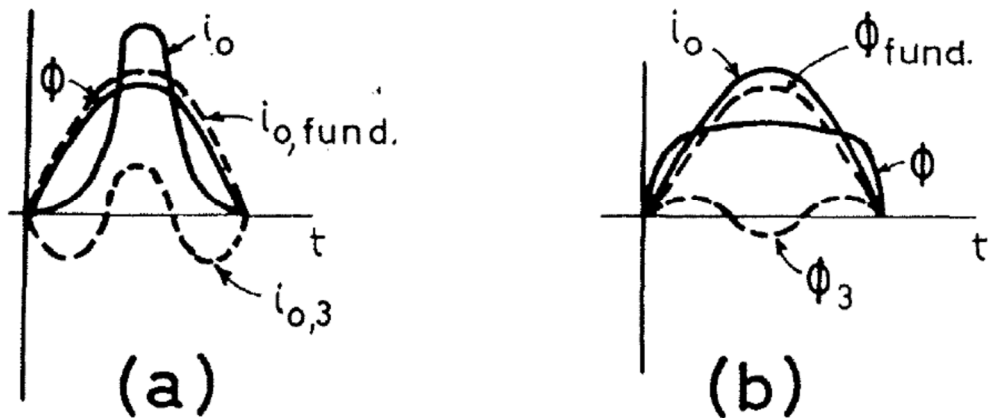


Figura 2.10-(a) Harmônicos da corrente de magnetização com fluxo sinusoidal; (b) harmônicos do fluxo com corrente de magnetização sinusoidal [6].

Num sistema trifásico os harmônicos múltiplos de 3 têm a mesma amplitude e defasamento nulo, tendo, portanto, as características de uma componente homopolar. No caso de o transformador ter os enrolamentos no lado primário ligados em estrela, com um sistema trifásico a quatro condutores, o terceiro harmônico da corrente de magnetização pode continuar a circular pelo percurso providenciado pelo condutor neutro, ocorrendo em cada uma das três fases o mesmo fenômeno ilustrado na figura 2.10(a). No entanto, caso o neutro esteja isolado, o terceiro harmônico da corrente já não pode circular, dando origem neste caso a uma distorção na onda do fluxo (onda achatada), relativamente à senoide ideal, com a presença de terceiro harmônico de fluxo, figura 2.10(b), o qual constitui uma componente homopolar de fluxo magnético. O ponto neutro no lado primário sofre um deslocamento, resultando num sistema desequilibrado de tensões, com presença de componente homopolar, desequilíbrio esse que é também transferido para as tensões do lado secundário.

A deformação nas tensões, e respetivo desequilíbrio, é particularmente problemática no caso de bancos trifásicos de transformadores monofásicos, núcleos trifásicos couraçados ou núcleos trifásicos de 5 colunas, onde existe um percurso de baixa relutância para os fluxos homopolares, podendo estes possuir valores elevados. No caso de transformadores de 3 colunas os fluxos homopolares têm de se fechar exteriormente ao núcleo, através do ar e da cuba, num percurso de elevada relutância, resultando em valores reduzidos de terceiro harmônico nos fluxos e nas tensões.

2.5.2 Fluxo homopolar provocado pelo desequilíbrio da carga e/ou fonte

A operação em regime desequilibrado, do sistema de alimentação ou da carga, provoca alterações na distribuição do fluxo magnético que circula no núcleo, podendo originar um fluxo homopolar. Assume-se como exemplo o caso da figura 2.11(a), onde se considera um transformador com ligação Yyn0 a alimentar uma carga monofásica entre a fase B e o neutro. A corrente no secundário na fase B, que possui uma componente homopolar, resulta em correntes distribuídas pelas fases no lado primário, desequilibradas, figura 2.11(b), com componente direta e inversa, mas cuja componente homopolar é nula. Em cada coluna as forças-magnetomotrices entre o primário e o secundário não se encontram compensadas, originando fluxos homopolares [6], figura 2.11 (c). Este fenómeno provoca um deslocamento do neutro do primário, figura 2.11 (d), que desequilibra as correspondentes tensões simples.

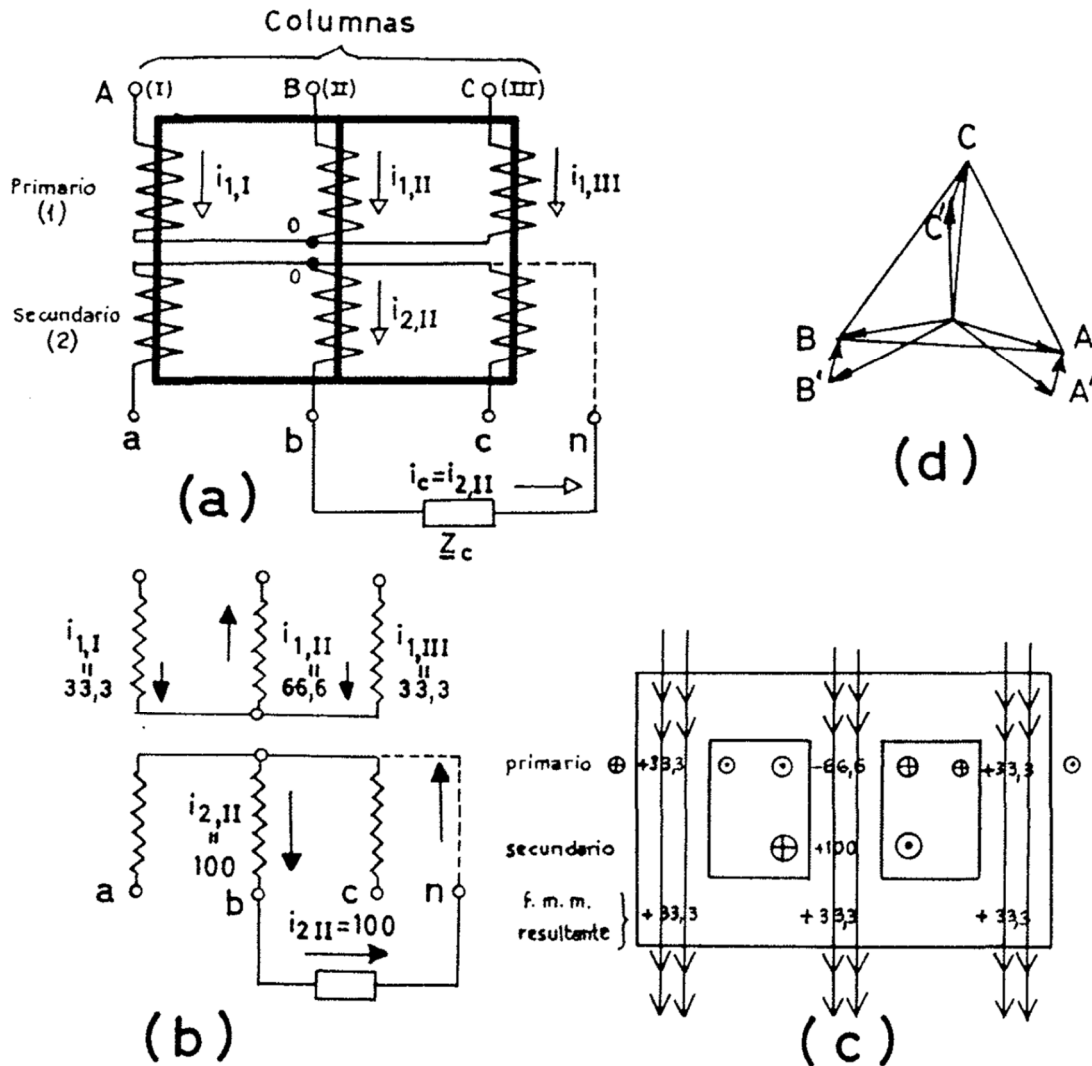


Figura 2.11-(a) Ligação Yyn0 em regime desequilibrado; (b) distribuição das correntes; (c) fluxos homopolares; (d) desequilíbrio das tensões simples. [6].

2.6 Papel do enrolamento terciário na mitigação do fluxo homopolar nos transformadores trifásicos

Nos transformadores de potência de alta tensão, com ligação Yy0 ou Yyn0, é comum utilizar-se um enrolamento adicional, ligado em triângulo, designado por enrolamento terciário ou de compensação. Em caso de desequilíbrios irá circular uma corrente induzida que terá a tendência de contrariar os fluxos homopolares, reduzindo significativamente os desequilíbrios de tensão [6]. Com a incorporação do enrolamento terciário são mitigados os seguintes problemas [7]:

- O terceiro harmónico das correntes de magnetização circula pelo triângulo fechado, permitindo que os fluxos tenham uma variação praticamente sinusoidal.
- O enrolamento terciário estabiliza o ponto neutro, pois a distribuição de forças magnetomotrices em cada coluna é agora compensada, devido à corrente no triângulo (figura 2.12).
- Existe diminuição da interferência telefónica provocado pelo terceiro harmónico de tensões e corrente nas linhas e circuitos de terra.

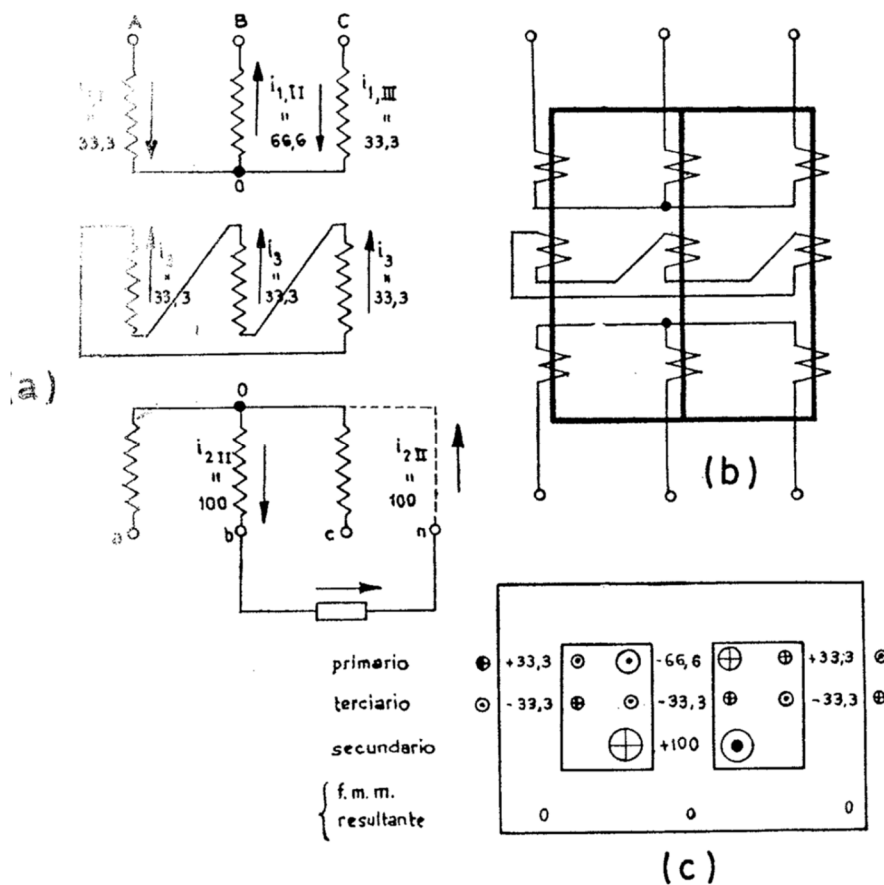


Figura 2.12-Ligação Yynd0 em regime desequilibrado e distribuição das correntes [6].

2.7 Monitorização do fluxo homopolar e princípio do método

Existem diversos métodos que permitem avaliar o estado de funcionamento do transformador, tais como a análise dos gases no óleo, análise da resposta em frequência, a medição da indutância de fugas, a análise do fluxo de fugas, a medição das vibrações ou a medição das descargas parciais, entre outros [8]. Recentemente têm sido propostos diversos métodos de monitorização contínua, que permitem detetar avarias ainda em fase incipiente e assim evitar a sua progressão para incidentes de dimensão catastrófica [9]- [10]. Neste contexto, a utilização de sensores ou bobinas de teste para medição de perturbações na distribuição do fluxo magnético, provocadas pelo defeito, constitui um dos métodos mais promissores [10]- [11]. Este trabalho propõe a medição do fluxo homopolar para efetuar a monitorização contínua do estado de funcionamento de transformadores trifásicos.

Conforme referido anteriormente, o fluxo homopolar é afetado quando ocorre um desequilíbrio no transformador. A monitorização desta grandeza poderá permitir identificar desequilíbrios internos, originados por anomalias que surjam durante o funcionamento do transformador. Por exemplo, quando ocorre um defeito que afeta a geometria dos componentes da máquina (um caso típico é o deslocamento dos enrolamentos, devido a esforços eletromagnéticos), a distribuição dos fluxos é modificada, podendo essa anomalia ser detetada pelas alterações no fluxo homopolar. De outro âmbito, um defeito de isolamento, como por exemplo um curto-circuito entre espiras, provoca habitualmente um desequilíbrio nas correntes nos enrolamentos, e correspondente alteração na distribuição de fluxos, podendo também aqui o fluxo homopolar ser um identificador fiável da ocorrência da avaria.

Para a medição do fluxo podem utilizar-se sensores de fluxo ou bobinas de teste. Se estes dispositivos forem já incluídos em fábrica, durante o processo de construção do transformador, o método de diagnóstico não requer a colocação fora de serviço do equipamento, podendo ser aplicado durante o normal funcionamento da instalação e monitorizar de forma contínua a condição de funcionamento da máquina.

Têm existindo diversos estudos sobre a aplicação de sensores ou bobinas de teste para medir o fluxo, um dos casos já investigados é a monitorização do fluxo de fugas [10]. Um dos problemas deste método é a localização das bobinas de teste, que, por poderem estar próximas dos enrolamentos, requerem níveis de isolamento muito elevado. No estudo apresentado em [11], utilizam-se sensores de fluxo para medir fluxos de fugas e fluxos homopolares.

O método é aplicado apenas a transformadores secos e requer um número significativo de sensores, cujo sistema de instrumentação pode resultar complexo.

A aplicação bobinas de teste, dependendo da sua localização, tem a possibilidade de medir de forma conjunta ou separada o fluxo que circula no núcleo, o fluxo de fugas, ou o fluxo homopolar. Na prática a medição do fluxo é feita de forma indireta, pois habitualmente utiliza-se o valor de tensão induzida aos terminais da bobina de teste. Para identificar a presença de defeitos, que resultam na alteração da distribuição de fluxo associada ao funcionamento normal, pode comparar-se os sinais das tensões induzidas nas bobinas de teste localizadas em pontos muito específicos do transformador.

Um método possível para a medição dos fluxos homopolares consiste na utilização de (pelo menos) duas bobinas de teste localizadas junto do núcleo ferromagnético, nas culassas superior e inferior. Em condições normais de funcionamento as linhas de fluxo homopolar fecham-se pelo exterior do circuito magnético, com uma distribuição simétrica, tendo um valor muito inferior ao fluxo no núcleo [6], figura 2.13. Nesta situação as tensões induzidas nas bobinas de teste são idealmente iguais, resultando a sua subtração num valor nulo. Quando ocorre uma avaria a distribuição de fluxo sofre uma perturbação (perdendo a simetria), podendo esta ser detetada, em teoria, utilizando a diferença entre os sinais de tensão nas bobinas de teste superior e inferior. Neste trabalho consideram-se apenas transformadores trifásicos com núcleo de 3 colunas.

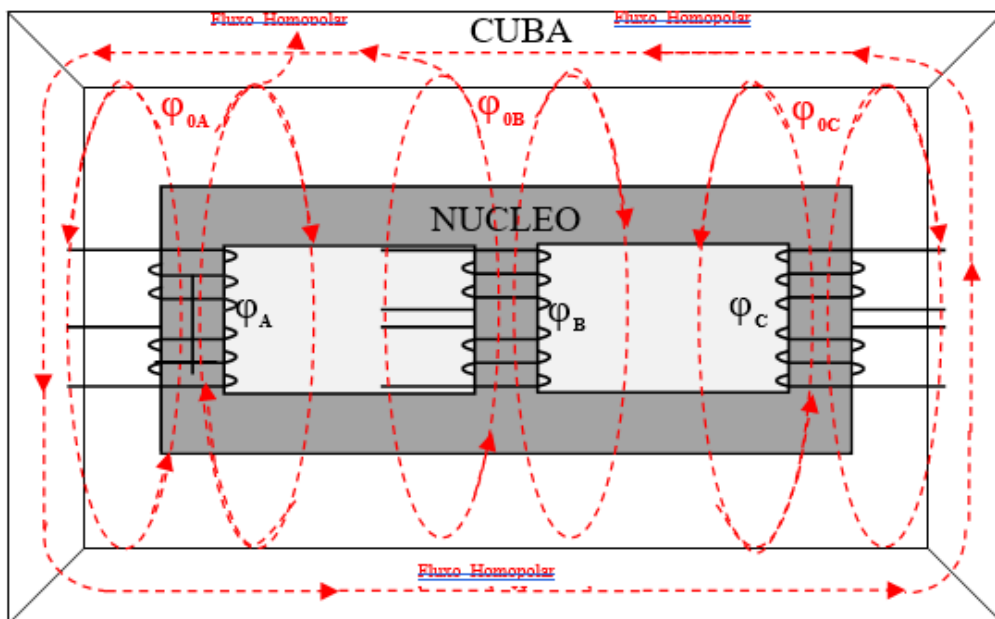


Figura 2.13-Distribuição do fluxo homopolar nos transformadores trifásicos de 3 colunas.

2.8 Bobinas de Teste

Para a medição do fluxo homopolar que se fecha entre o núcleo e a cuba, as bobinas de teste foram dispostas de forma a abranger a área superior e inferior do núcleo ferromagnético.

O valor da tensão induzida nas bobinas de teste situadas nas culassas do topo e base (v_{BTT} e v_{BTB} , respetivamente) vai ser utilizado para monitorizar e caracterizar a condição de funcionamento do transformador.

A figura 2.14 ilustra a geometria proposta para as bobinas de teste. Esta configuração das bobinas de teste tem como vantagem não exigir requisitos significativos do nível de isolamento, pois as bobinas estão junto do núcleo ferromagnético, que se encontra normalmente ligado à terra.

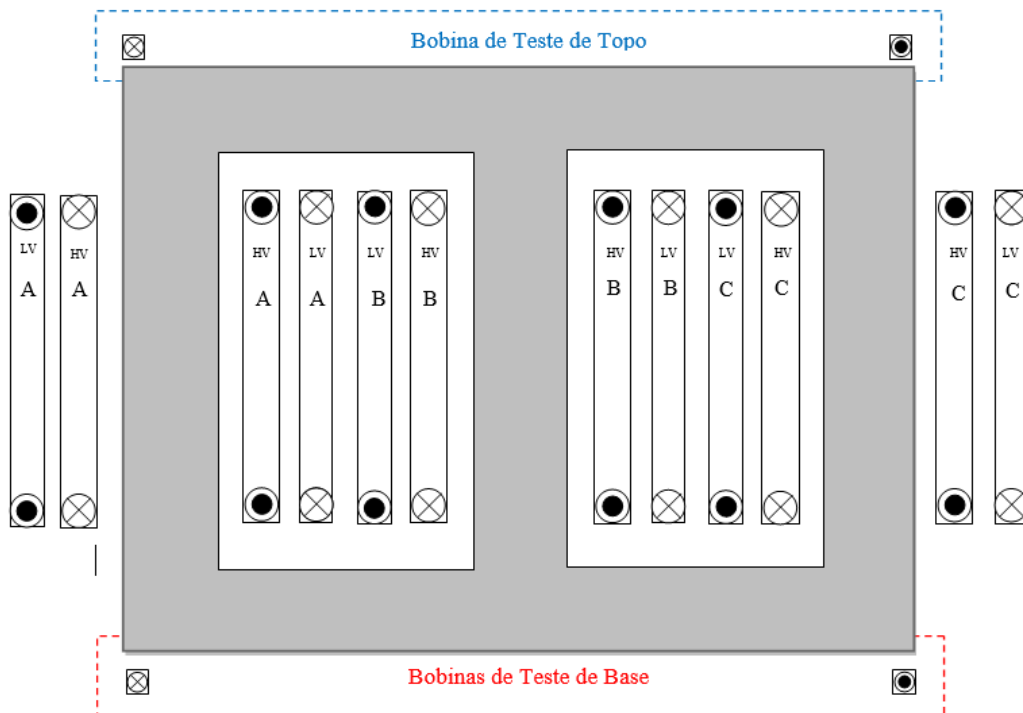


Figura 2.14-Localização das Bobinas de Teste.

3. Modelo Computacional do Transformador Trifásico

Neste capítulo descreve-se o modelo computacional do transformador trifásico, desenvolvido em ambiente FEM. Este modelo computacional permite caracterizar o funcionamento do transformador e analisar para as diferentes condições de funcionamento.

3.1 Análise pelo Método dos Elementos Finitos (FEM)

O Método de Elementos Finitos (FEM), é um modelo numérico que permite resolver equações parciais complexas, utilizando métodos de aproximação (discretização). A solução destes modelos é, em termos práticos, uma aproximação bastante real da solução, diminuindo o tempo de análise e permitindo a solução de problemas que, sem o recurso a métodos numéricos, seriam praticamente insolúveis.

Assim o método de elementos finitos aplica o modelo numérico no objeto, em que o mesmo objeto é transformado/dividido em pequenos triângulos e em processa os dados e devolve a solução do problema de forma relativamente rápida e precisa.

Neste estudo utilizou-se um modelo de elementos finitos bidimensional (2D). Apesar deste modelo não permitir uma análise tridimensional da geometria do transformador, a sua utilização constitui normalmente um bom compromisso entre a exatidão, complexidade e tempo de processamento.

3.2 Determinação de Parâmetros e Caracterização do Transformador

Neste trabalho utilizou-se um transformador trifásico com núcleo de 3 colunas disponível no laboratório. A geometria do núcleo, enrolamentos e bobinas de teste são apresentadas na figura 3.1. As características do transformador são as seguintes:

Características do transformador:

- Potência nominal: $S_n = 10$ kVA
- Tensão nominal do enrolamento no lado de maior tensão: $V_{1n} = 230$ V
- Tensão nominal do enrolamento no lado de menor tensão: $V_{2n} = 132$ V
- Frequência nominal: $f_n = 50$ Hz

- Número de espiras do enrolamento no lado de maior tensão: $n_1 = 152$ espiras
- Número de espiras do enrolamento no lado de menor tensão: $n_2 = 90$ espiras

Dimensões do circuito magnético:

- Profundidade: 110 mm; • Largura: 300 mm; • Altura: 300 mm;
- Largura da coluna lateral: 60 mm; • Largura da coluna central: 60 mm;
- Material: Assumiu-se M125-027.4.

Dimensões dos enrolamentos:

- Enrolamentos concêntricos, conforme representado na figura 3.1;
- Material: Cobre.

Dimensões das Bobinas de Teste:

- Profundidade: 110 mm; • Largura: 300 mm; • Altura: 1,5 mm;
- Material: Cobre.

A configuração do núcleo e geometria dos enrolamentos são apresentados na figura abaixo.

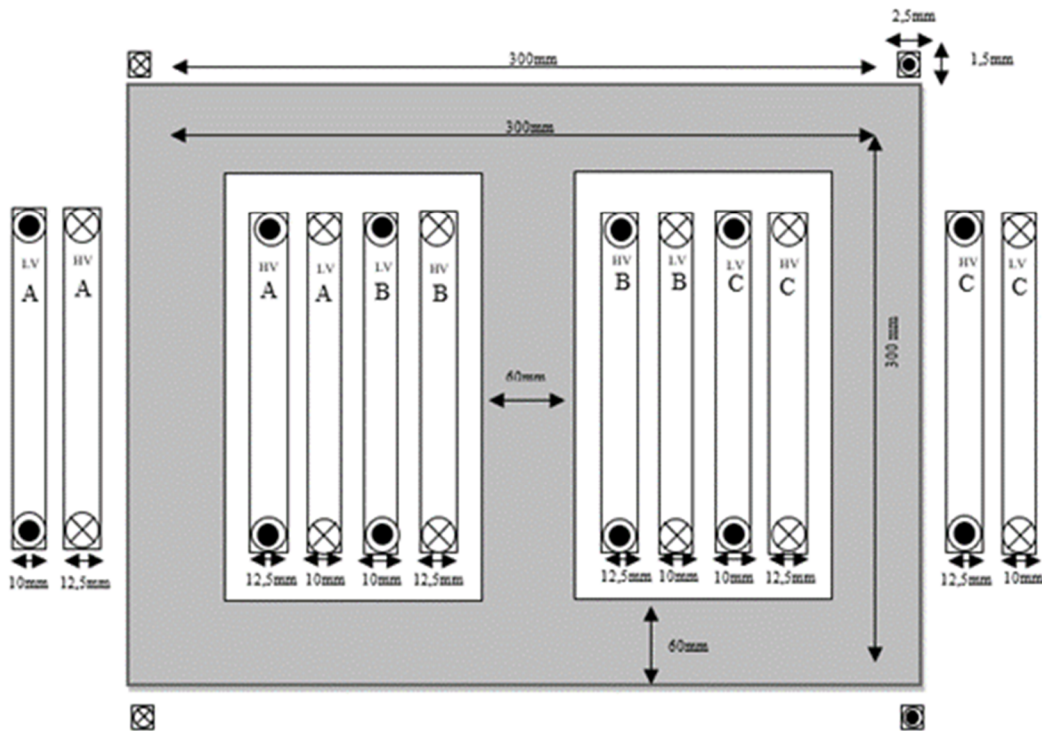


Figura 3.1-Dimensões e Geometria do núcleo, dos enrolamentos e das bobinas de teste.

Foi realizado o ensaio em curto-circuito, resultando nos parâmetros apresentados na tabela 3.1, tem sido utilizada as resistências dos enrolamentos no modelo computacional.

Tabela 3.1 - Parâmetros obtidos no ensaio em curto-circuito

Impedância de curto-circuito Z_{cc} (m Ω)	Resistência de curto-circuito R_{cc} (m Ω)	Reactância de curto-circuito X_{cc} (m Ω)	Resistência do primário R_1 (m Ω)	Resistência do secundário R_2 (m Ω)
468	416	214	208	73

3.3 Ligações dos enrolamentos

Neste estudo consideraram-se duas configurações, a ligação estrela-estrela (YNyn0, figura 3.2), que normalmente é utilizada nos transformadores integram a rede de transporte (Alta Tensão) e a ligação triângulo-estrela (Dy11, figura 3.3), comum na rede de distribuição (Media e Baixa Tensão).

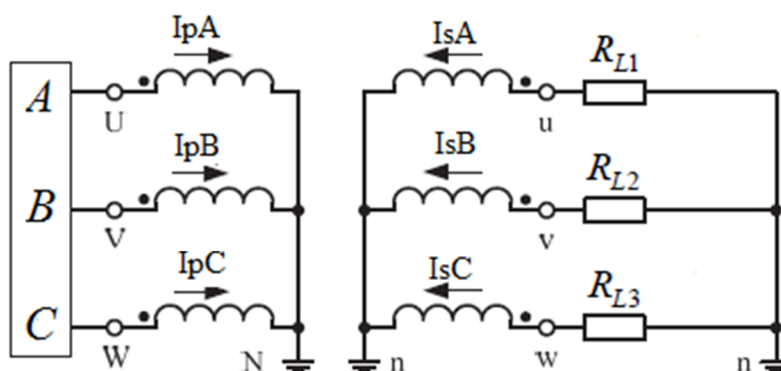


Figura 3.2-Esquema elétrico YNyn0 (Adaptado de [12]).

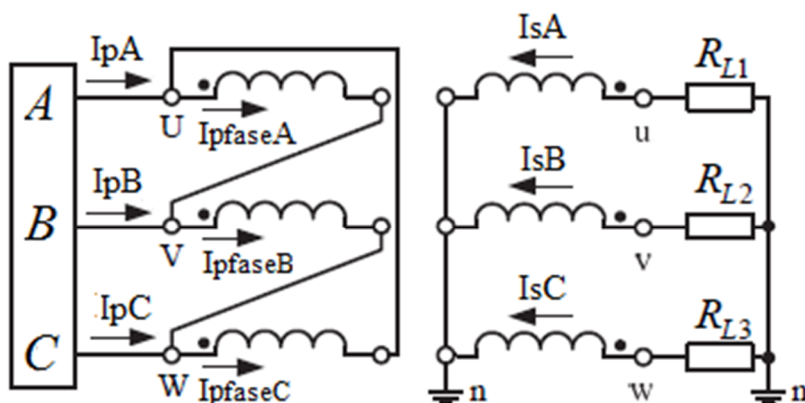


Figura 3.3- Esquema elétrico Dyn11 (Adaptado de [12]).

4. Medição do Fluxo Homopolar com Bobinas de Teste

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos com o método proposto para a medição do fluxo homopolar. Foram analisadas diversas condições de funcionamento do transformador, onde se incluem casos com desequilíbrios externos (carga e/ou fonte), anomalias internas, diferentes tipos de ligação dos enrolamentos, influência do enrolamento terciário e influência da cuba, entre outros. Sempre que possível efetua-se uma comparação entre os resultados experimentais e de simulação.

Nos ensaios experimentais foi utilizada a placa PCI-6070E da National Instruments para efetuar a aquisição digital dos sinais de tensão e corrente no transformador. A placa foi controlada através de uma aplicação em ambiente Labview. Para a medição dos sinais de tensão foi utilizado um sistema baseado em amplificadores de isolamento. Para a medição das correntes foram utilizadas pinças de corrente A622 da Tektronix, CC-65 da Hantek e PR1030 da HEME. Os sinais adquiridos foram posteriormente tratados e filtrados (em ambiente Matlab) para minorar o efeito do ruído [10].

Apresentam-se inicialmente neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios homopolares, que permitem caracterizar a impedância homopolar do transformador. De seguida analisam-se os resultados obtidos para condições normais de funcionamento do transformador (i.e., sem defeito), para regimes de carga e tensões de alimentação equilibrados e desequilibrados. Apresenta-se depois nos capítulos seguintes a influência da cuba e do enrolamento terciário nos fluxos homopolares medidos. Finalmente é efetuada uma análise introdutória a casos que envolvem deformações e defeitos de isolamento nos enrolamentos.

4.1 Ensaio Homopolar

Os ensaios homopolares permitem calcular as impedâncias homopolares de vazio e de curto-circuito. Estas impedâncias são normalmente necessárias para calcular a corrente de curto-circuito que circula quando existe um defeito entre uma fase e a terra no lado secundário, corrente esta que também depende da ligação dos enrolamentos do transformador e do regime de neutro. A impedância homopolar de curto-circuito é utilizada quando as forças magnetomotrices na mesma coluna se cancelam, ou seja, são iguais e opostas (despreze-se aqui a corrente de excitação). A impedância homopolar em vazio é utilizada quando essas forças magnetomotrices não se encontram equilibradas.

Por exemplo, no caso de uma ligação YNyn, o defeito entre uma linha do lado secundário e o neutro resulta numa corrente de defeito (igual a 3 vezes a componente homopolar) que circula apenas na fase afetada. Como o neutro do lado primário também está ligado vai ser produzida na fase correspondente no lado primário uma força magnetomotriz igual e oposta à do secundário (despreza-se neste raciocínio a corrente de excitação). Assim, as correntes no primário e secundário são inversamente proporcionais à razão do número de espiras $N1/N2$. Neste caso a corrente de defeito é limitada pela impedância homopolar de curto-circuito, a qual, por sua vez, é idêntica à impedância de curto-circuito de sequência directa (situação válida para núcleo de 3 colunas ou banco de transformadores trifásicos). O circuito equivalente para a sequência homopolar normalmente utilizado nestas condições inclui apenas esta impedância de curto-circuito, Z_{AB} , figura 4.1(a). No entanto pode-se utilizar uma representação mais detalhada, tomando em consideração a impedância homopolar de vazio (Z_M , impedância de magnetização), figura 4.1 (a), em disposição shunt [13] - [14].

Caso o neutro do lado primário estiver isolado (ligação Yyn) não pode existir componente homopolar nas correntes no lado primário (situação similar à já abordada na figura 2.11), ficando o circuito equivalente em aberto no lado primário, figura 4.1 (b). Conforme referido anteriormente não há compensação das forças magnetomotrizes em cada coluna, figura 2.11 (c). Caso se trate de um banco de trifásico de transformadores monofásicos circulará no lado primário dos transformadores associados às fases sem carga (fases A e C na figura 2.11) uma corrente superior à normal corrente de excitação, provocando desequilíbrios significativos nas tensões fase-neutro. Em consequência também os fluxos ficarão desequilibrados, incluindo uma componente homopolar, ou seja, a sua soma instantânea não será nula.

No caso de um transformador trifásico com núcleo de três colunas os fluxos homopolares têm de se fechar através do caminho de alta relutância desde a travessa superior até à travessa inferior, tomando valores reduzidos, e resultando em menores desequilíbrios nas tensões simples.

No caso neutro do lado primário estar ligado ao neutro do gerador e do neutro do lado secundário estar isolado (YNy), não existirá componente homopolar nas correntes secundárias, circulando apenas no lado primário as correntes de excitação homopolares sendo a situação equivalente ao ensaio em vazio do transformador (sendo o circuito equivalente representado pela impedância homopolar em vazio).

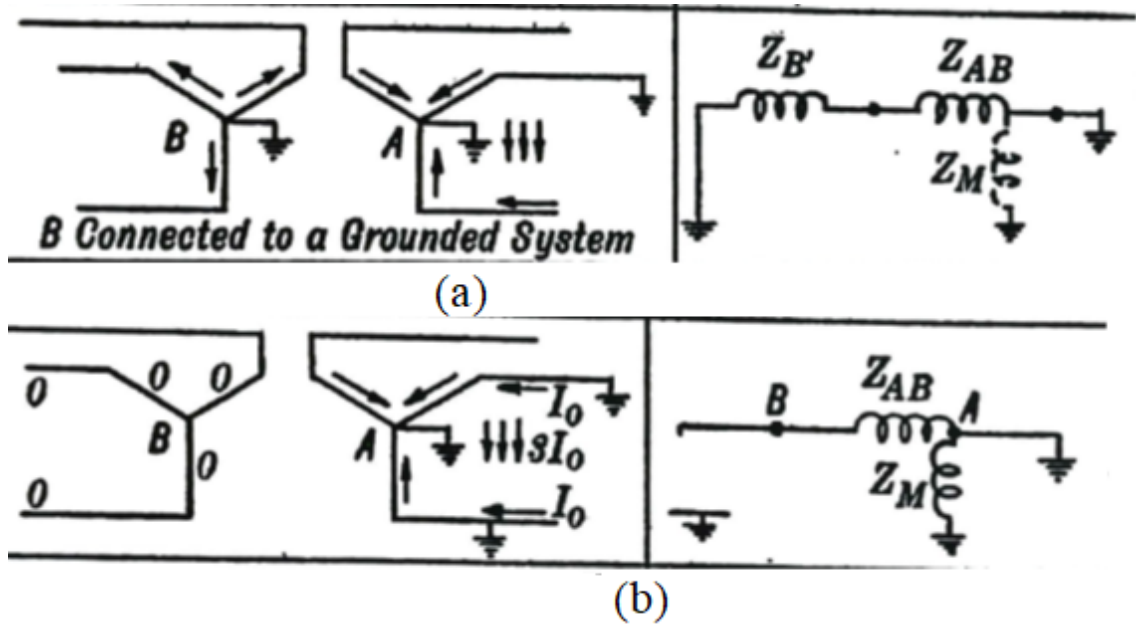


Figura 4.1(a): Circuito equivalente da seqüência homopolar para a ligação YNyn; (b) Circuito equivalente da seqüência homopolar para a ligação Yyn ($Z_{B'}$ representa a impedância da fonte) [13].

4.1.1 Ensaio em curto-circuito

Uma possibilidade para realizar o ensaio homopolar em curto-circuito consiste em alimentar as três fases do enrolamento primário ligadas em série e estando também o enrolamento secundário ligado em série, figura 4.2. A ligação em série do secundário tem o mesmo efeito de curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos, resultando em forças magnetomotrizes iguais e opostas em cada coluna. Nestas condições o fluxo no núcleo é muito reduzido, fechando-se maioritariamente pelo ar na zona envolvente ao núcleo (incluindo os próprios enrolamentos e espaços entre os enrolamentos).

A impedância homopolar de curto-circuito, Z_{0cc} , resulta:

$$Z_{0cc} = \frac{1}{3} \frac{V_{0P}}{I'_{0s}} \quad (4.1)$$

onde V_{0P} representa a tensão de alimentação e I'_{0s} a corrente no secundário referida ao lado primário. Esta impedância tem um valor muito próximo ao da impedância de curto-circuito de seqüência directa. Os valores obtidos são apresentados na tabela 4.1 (correntes e tensões expressos em valor eficaz).

Tabela 4.1-Resultados do ensaio homopolar em curto-circuito.

	V_{0P} (V)	I_{0P} (A)	I_{0s} (A)	Z_{0cc} (m Ω)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	8.70	6.16	10.10	484.9	36.21	33.40
Simulação	8.70	5.98	9.89	493.13	74.55	74.31
Erro	-	-2.92	-2.08	+1.69	+106	+123

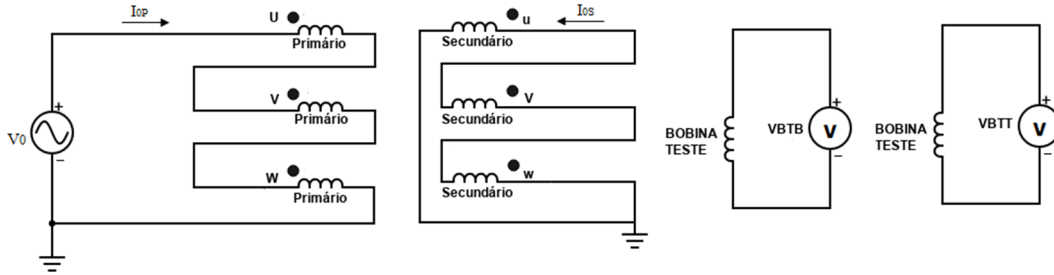


Figura 4.2-Esquema para o ensaio homopolar em curto-circuito.

As formas de onda das correntes no primário e no secundário no ensaio homopolar em curto-circuito são apresentadas na figura 4.3, podendo-se observar que os resultados de simulação e experimentais estão em boa concordância.

As formas de onda das tensões induzidas nas bobinas de teste são apresentadas na figura 4.4. Os correspondentes valores eficazes são apresentados na tabela 4.1. Verifica-se que, nestes sinais, existe um erro significativo entre a amplitude dos resultados de simulação e experimentais. Uma vez que os resultados de simulação relativos à corrente nos enrolamentos não apresentam erros relevantes pode concluir-se que a distribuição dos fluxos magnéticos na zona exterior ao núcleo não é devidamente considerada na análise pelo método dos elementos finitos a 2D, provocando os erros acima identificados. De facto, a distribuição dos fluxos na parte frontal e posterior do núcleo não é tomada em consideração na análise 2D, sendo razoável admitir que existam diferenças nos resultados obtidos. A definição da profundidade do modelo 2D origina também discrepâncias entre os resultados de simulação e experimentais: na realidade o núcleo, os enrolamentos, as bobinas de teste, e a própria zona relevante da distribuição de fluxos homopolares, entre outros, podem ter profundidades (e características) bastante distintas enquanto no modelo computacional apenas é possível definir uma profundidade única para todos os elementos (habitualmente a do núcleo). No entanto, apesar do modelo apresentar limitações sobre a distribuição de fluxos na zona exterior ao núcleo, será ainda assim possível efetuar uma análise comparativa entre as diversas condições de funcionamento.

Nos ensaios experimentais existe um ligeiro desfasamento entre a tensão induzida nas bobinas de teste superior e inferior. Esta situação também não é reproduzida pelos resultados de simulação, podendo ser originada por imperfeições no circuito magnético (por exemplo, pequenos entreferros na justaposição das lâminas do material ferromagnético), assimetria nos enrolamentos e ligeiras diferenças entre as bobinas de teste. Desprezando estes efeitos é razoável afirmar que o fluxo homopolar possui uma simetria vertical em relação ao transformador, ou seja, o fluxo homopolar tem uma distribuição idêntica no topo e na base do núcleo.

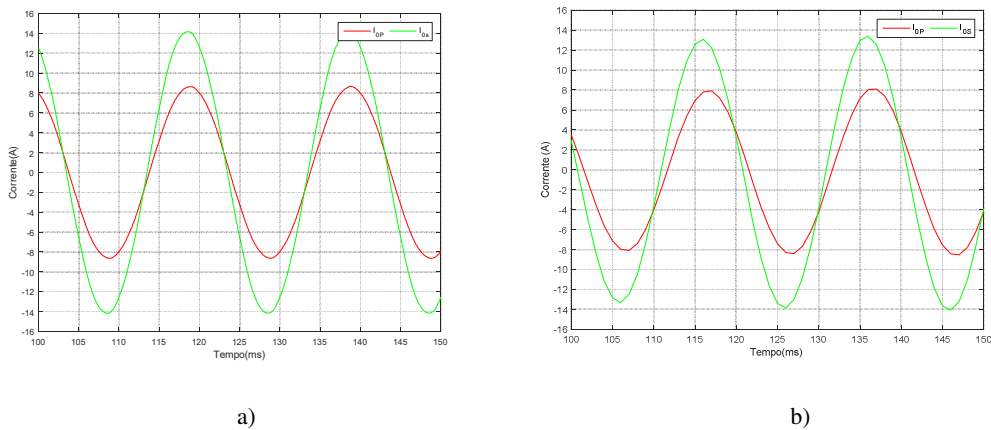


Figura 4.3-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

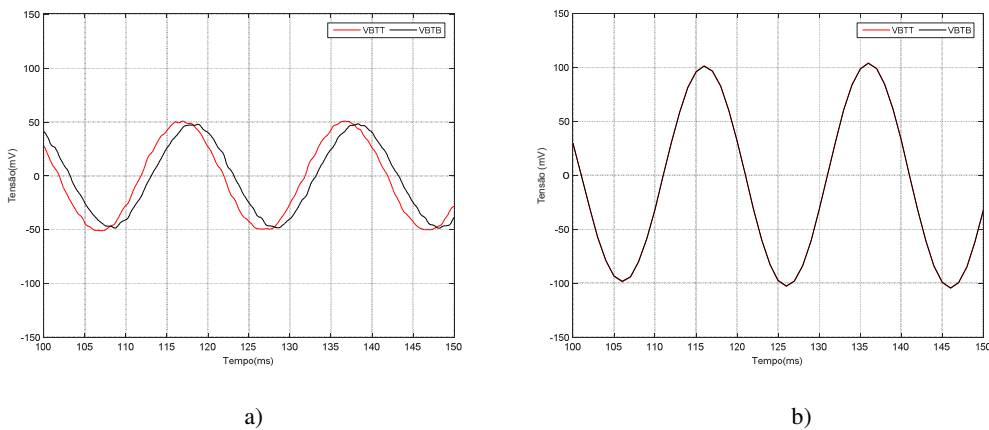


Figura 4.4- Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

4.1.2 Ensaio em Vazio:

O ensaio homopolar em vazio permite determinar a impedância homopolar de magnetização. Em relação ao ensaio anterior a diferença limita-se apenas ao enrolamento secundário, cuja ligação série fica agora em circuito aberto, figura 4.5.

Nesta situação a força magnetomotriz (fmm) do primário não é compensada pela fmm do secundário (que é nula). Comparativamente com o ensaio anterior, para o mesmo valor da fmm do primário, existe assim um maior número de linhas de fluxo magnético, que se fecham pelo núcleo e pela zona envolvente ao circuito ferromagnético. Para comparar os ensaios homopolares (curto-circuito e vazio) ajustou-se a corrente de alimentação a um valor próximo da corrente imposta no ensaio em curto-circuito (aproximadamente 5 A), conforme indicado na tabela 4.2.

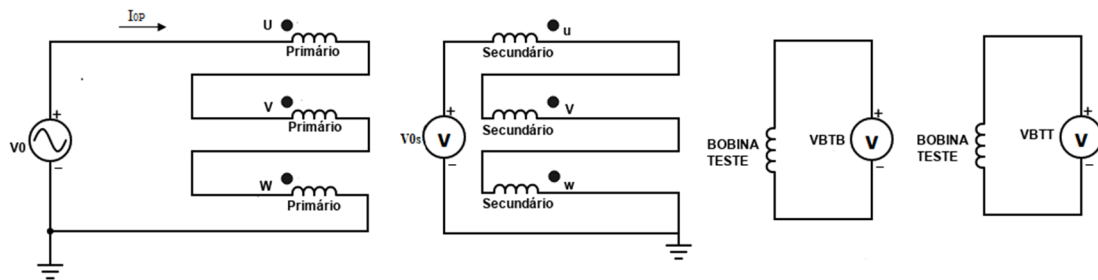


Figura 4.5-Esquema para o ensaio homopolar em vazio.

Tabela 4.2-Resultados do ensaio homopolar em vazio.

	V_{0P} (V)	I_{0P} (A)	V_{0s} (V)	Z_{0m} (Ω)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	46	5.26	25.5	2.73	301	304
Simulação	48.09	5.16	28.63	3.10	898	899
Erro %	+4.54	-2	+12.2	+17	+198	+196

A impedância homopolar de vazio vem agora definida como:

$$Z_{0m} = \frac{1}{3} \frac{V'_{0s}}{I_{0P}} \tag{4.2}$$

onde V'_{0s} representa a tensão aos terminais dos enrolamentos secundários ligados em série, referida ao lado primário, e I_{0P} a corrente de alimentação. A impedância homopolar resultante é superior à do ensaio em curto-circuito, pois agora o fluxo fecha-se parcialmente pelo circuito ferromagnético, resultando numa menor relutância e, conseqüentemente, numa maior reactância. Em relação à impedância homopolar os valores experimental e de simulação estão próximos.

As tensões induzidas nas bobinas de teste possuem também um valor superior (aproximadamente 10×) em relação ao ensaio em curto-circuito, pois existe um maior número de linhas de fluxo homopolar. À semelhança do caso anterior (ensaio em curto-circuito) o valor eficaz das tensões induzidas nas bobinas de teste obtida nos resultados de simulação é mais do dobro dos resultados experimentais.

Da análise dos resultados experimentais pode concluir-se também que existe um fluxo de fugas significativo entre os fluxos homopolares criados no núcleo e aqueles que se fecham através das bobinas de teste. De facto, o valor de pico do fluxo que se fecha através das bobinas de teste (por simplicidade considera-se aqui apenas a superior) pode ser expresso como:

$$\hat{\Phi}_{0BTT} = \frac{\sqrt{2}V_{BTT}}{\omega N_{BT}} = 150 \mu\text{Wb} \quad (4.3)$$

Os fluxos homopolares gerados no núcleo podem ser expressos em função da tensão induzida na associação série dos enrolamentos secundários:

$$\hat{\Phi}_{02} = \frac{\sqrt{2}V_{0s}}{3\omega N_2} = 425 \mu\text{Wb} \quad (4.4)$$

Conclui-se assim que apenas cerca de 35% do fluxo homopolar criado no núcleo se fecha pelas bobinas de teste, existindo um fluxo de fugas significativo, com direção radial, na zona das culassas, figura 4.6. O fluxo radial frontal não é considerado no modelo computacional, podendo ser esta também uma justificação para a diferença entre os resultados de simulação e experimentais. De facto, utilizando os resultados de simulação os valores de pico dos fluxos resultam:

$$\hat{\Phi}_{0BTT} = 449 \mu\text{Wb} \quad (4.5)$$

$$\hat{\Phi}_{02} = 477 \mu\text{Wb} \quad (4.6)$$

possuindo um valor mais próximo, o que sugere que os fluxos de fugas radiais não são tomados em consideração no modelo computacional.

A existência dos fluxos de fugas radiais faz com que a tensão induzida nas bobinas de teste não inclua a totalidade do fluxo homopolar. A diminuição do fluxo de fugas podia ser conseguida com uma localização alternativa das bobinas de teste, conforme representado na figura 4.7. No entanto, esta configuração é mais invasiva, introduz uma maior complexidade no processo de fabrico, e situa-se mais próxima dos enrolamentos, requerendo um nível de isolamento superior.

Por estas razões neste trabalho utilizaram-se as bobinas de teste localizadas nas faces superior e inferior do núcleo ferromagnético.

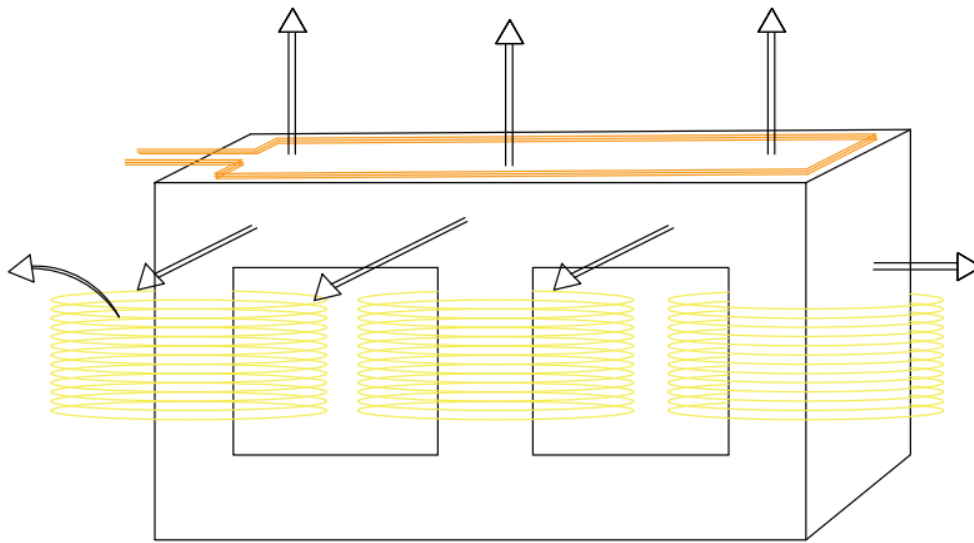


Figura 4.6-Fugas entre os fluxos homopolares gerados no núcleo e os fluxos que se fecham pelas bobinas de teste.

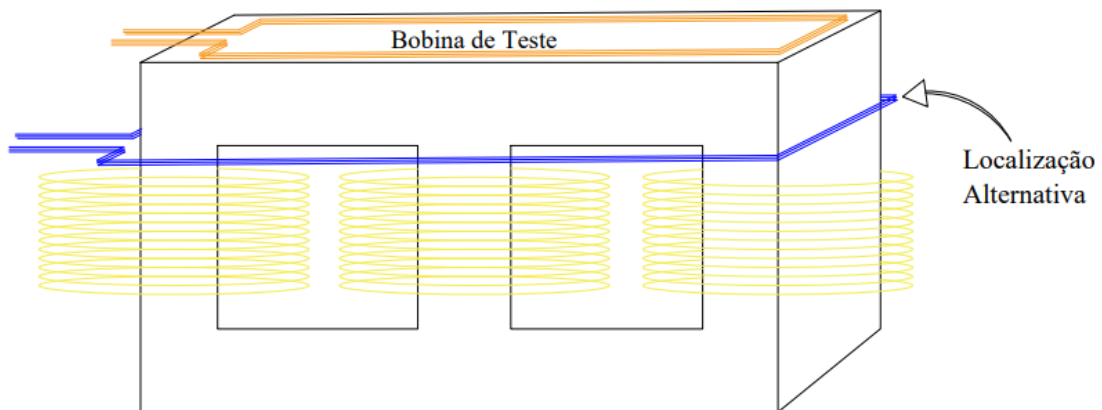


Figura 4.7-Localização alternativa das bobinas de teste para medição do fluxo homopolar.

A figura 4.8, apresenta as formas de onda da corrente de alimentação obtidas pelo ensaio experimental e pelo cálculo computacional, encontrando-se em boa concordância.

A forma de ondas das tensões induzidas nas bobinas de teste é apresentada na figura 4.9. Apesar de se verificar uma diferença entre os resultados simulação/experimentais, existe alguma coerência nos valores obtidos no ensaio em curto-circuito, pois o erro é percentualmente idêntico. O fluxo homopolar possui aqui também uma simetria vertical em relação ao transformador.

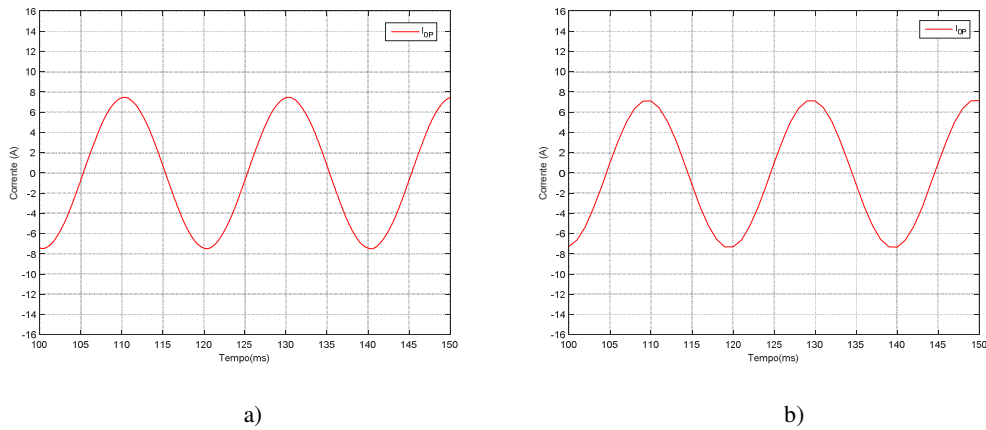


Figura 4.8-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal da corrente no primário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

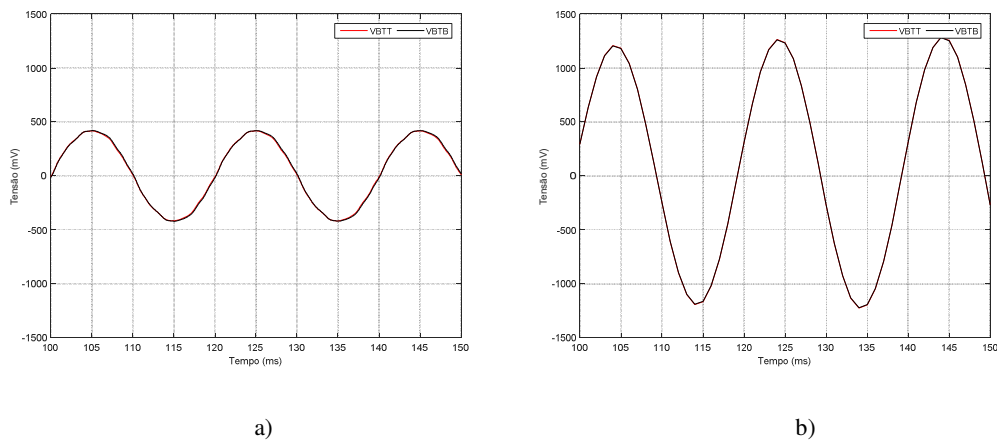


Figura 4.9- Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

4.2 Ligação YNyn0

4.2.1 YNyn0: Regime equilibrado

De forma a testar o funcionamento do modelo do transformador trifásico, começou-se por analisar um sistema equilibrado, com ligação YNyn0, segundo esquema da figura 4.10. Neste tipo de ligação as alterações ao fluxo homopolar são mais facilmente mensuráveis. Os resultados apresentados servem de comparativos para os restantes ensaios descritos neste capítulo.

Em resumo, as condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, $16\ \Omega$, por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

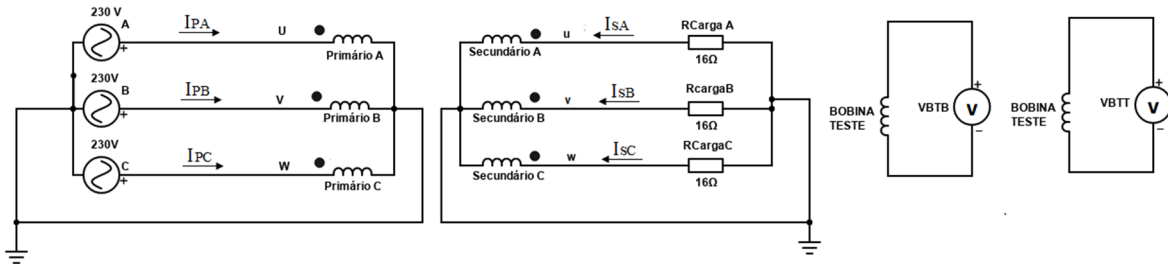


Figura 4.10-Esquema de ligação YNyn0 em regime equilibrado.

As formas de onda apresentadas nas figuras 4.11 a 4.13 ilustram a evolução temporal da tensão no enrolamento primário e as correntes nos enrolamentos. Devido às condições do ensaio (regime equilibrado na fonte e na carga), os sistemas trifásicos de tensão e corrente constituem, aproximadamente, sistemas trifásicos simétricos.

Os resultados de simulação estão em boa concordância com os resultados experimentais.

Nas tabelas 4.3 e 4.4, apresenta-se uma comparação entre o valor eficaz dos valores medidos e simulados, para a tensão e corrente, respetivamente.

Tabela 4.3-Valor eficaz das tensões de alimentação.

Dados	V_{PA} (V)	V_{PB} (V)	V_{PC} (V)
Experimental	229.16	233.11	233.50
Simulação	228	228	228

Tabela 4.4-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	4.94	4.88	5.05	8.95	8.18	8.4	24.50	21.06
Simulação	4.98	4.98	5.02	8.42	8.42	8.42	2,56	2,56

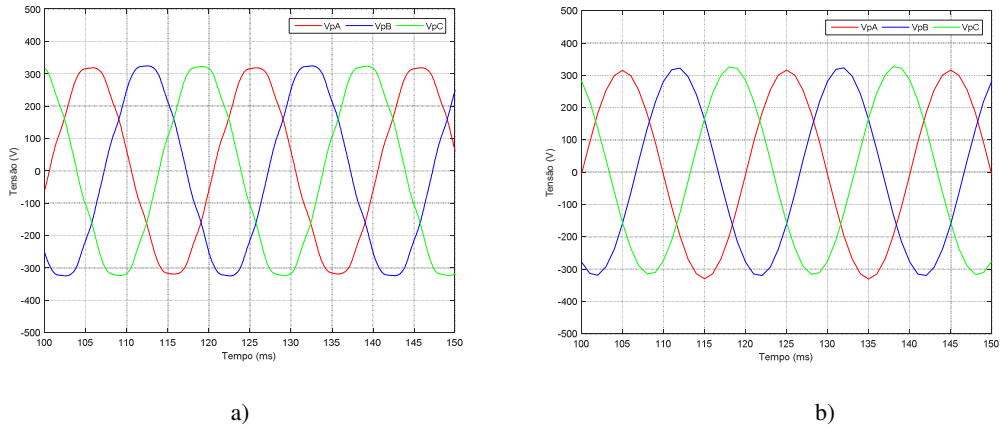


Figura 4.11-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.

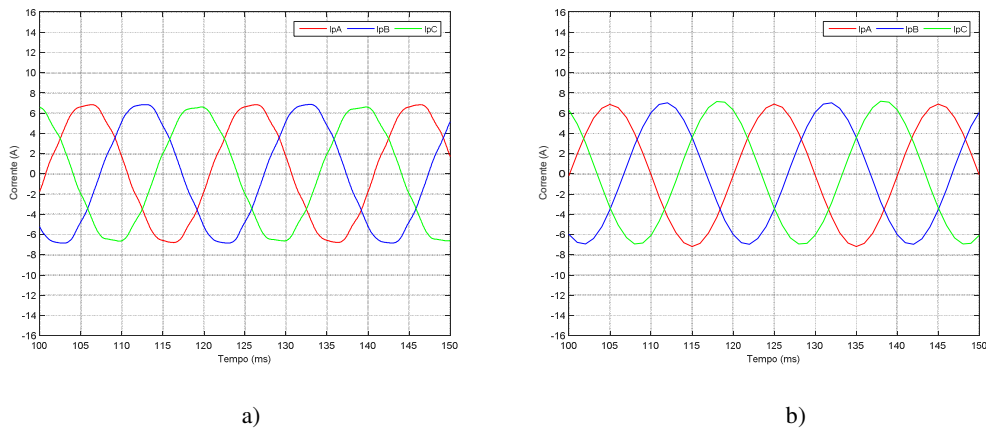


Figura 4.12-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das correntes no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.

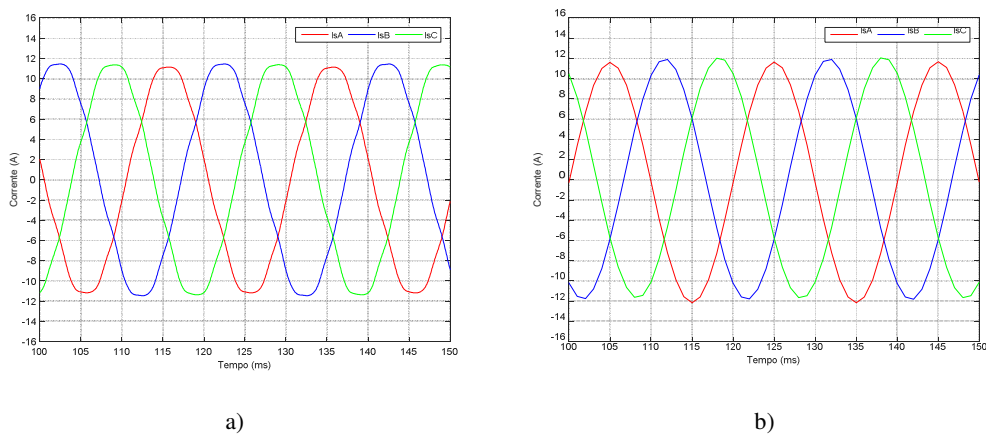


Figura 4.13-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.

A figura 4.14, ilustra a forma de onda das tensões induzidas nas bobinas de teste. A forma de onda obtida experimentalmente é bastante distorcida, em relação a uma senoide, situação que não é reproduzida nos resultados de simulação. Adicionalmente, a amplitude dos sinais calculados computacionalmente é muito inferior à obtida nos resultados laboratoriais. Também aqui a utilização de um modelo bidimensional e as imperfeições e assimetrias no circuito magnético e enrolamentos poderão ser as razões que justificam esta diferença. A própria distorção e assimetria da tensão de alimentação e desequilíbrio da carga (desprezados no modelo) poderá contribuir para que estas diferenças se verifiquem.

Nos resultados experimentais a forma de onda das tensões induzidas possui uma componente distorcida, com bastante conteúdo harmónico. Este conteúdo harmónico induz nas tensões induzidas um valor que é cerca de 10 vezes superior, comparativamente aos resultados de simulação.

A onda da tensão induzida na bobina de teste superior, obtida experimentalmente, foi analisada em frequência, tendo-se obtido o espectrograma apresentado na figura 4.15. Verifica-se que predominam os harmónicos múltiplos de 3 ($h=3, 9$ e 15 , para as frequências 150 Hz, 450 Hz e 750 Hz, respetivamente), que constituem sistemas homopolares. Apesar de possuírem menor amplitude, os harmónicos $1, 5$ e 7 (50 Hz, 250 Hz e 350 Hz, respetivamente) são ainda significativos. Os resultados de simulação apresentam apenas uma componente de 50 Hz, que possui uma amplitude com a mesma ordem de grandeza da componente fundamental dos resultados experimentais. Pode concluir-se desta análise que o modelo computacional só toma em consideração a componente fundamental dos fluxos homopolares.

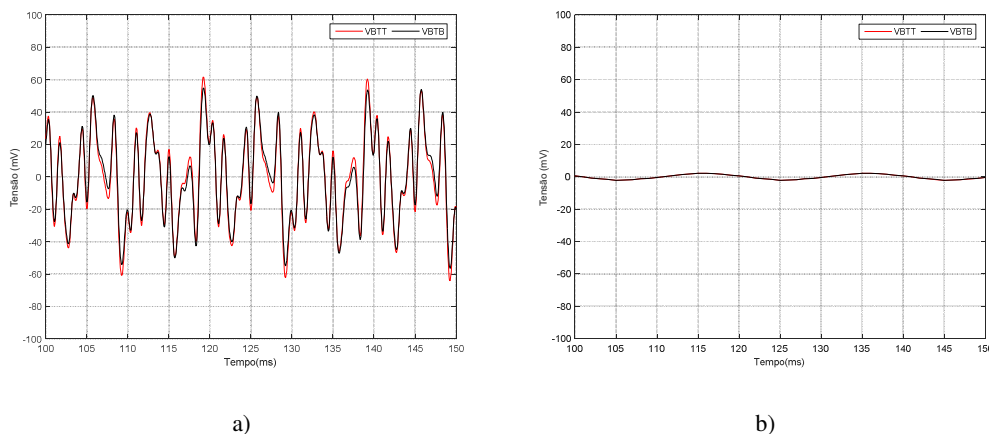


Figura 4.14-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste(a) experimental;(b) simulação.

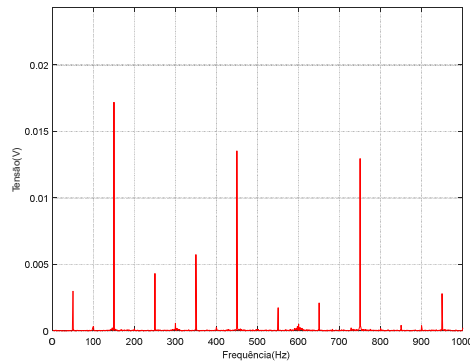


Figura 4.15-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.

4.2.2 YNyn0: carga desequilibrada (fase A-neutro)

A ligação de uma única resistência de 16Ω , entre a fase A e o neutro do secundário servirá para analisar o fluxo homopolar perante um desequilíbrio da carga, figura 4.16.

Em resumo, as condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva desequilibrada, 16Ω , ligada entre fase A e neutro;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

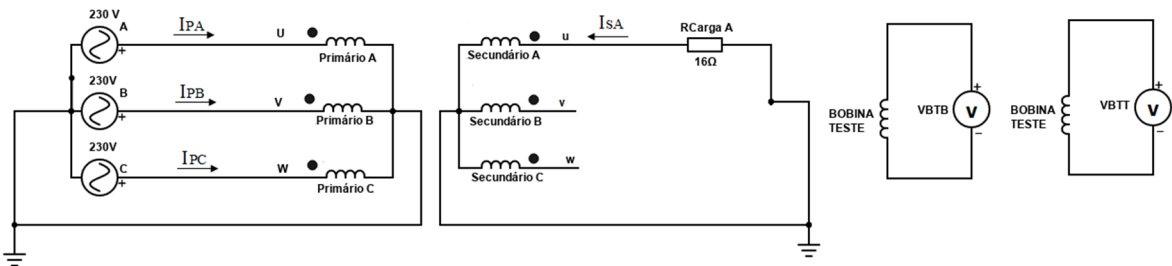


Figura 4.16-Esquema de ligação YNyn0 com carga desequilibrada.

As formas de onda apresentadas nas figuras 4.17 e 4.18 ilustram a evolução temporal das correntes nos enrolamentos, estando os resultados de simulação e experimentais em relativa concordância. A tabela 5.4 apresenta os respectivos valores eficazes.

Existindo neutro do lado primário, a corrente na fase A do lado primário é constituída pela soma da corrente de excitação com a corrente equivalente de carga (corrente do lado secundário transferida para o primário). As fases sem carga (B e C) comportam-se, aproximadamente, como transformadores monofásicos com o secundário em vazio, devendo existir apenas corrente de excitação do lado primário nestas fases. Assim se justifica o sistema de correntes no lado primário do transformador, ilustrado na figura 4.18.

Tabela 4.5-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	4.27	0.70	0.91	8.82	-	-	53.60	54.70
Simulação	4.94	0.61	0.59	8.48	-	-	23.26	23.22

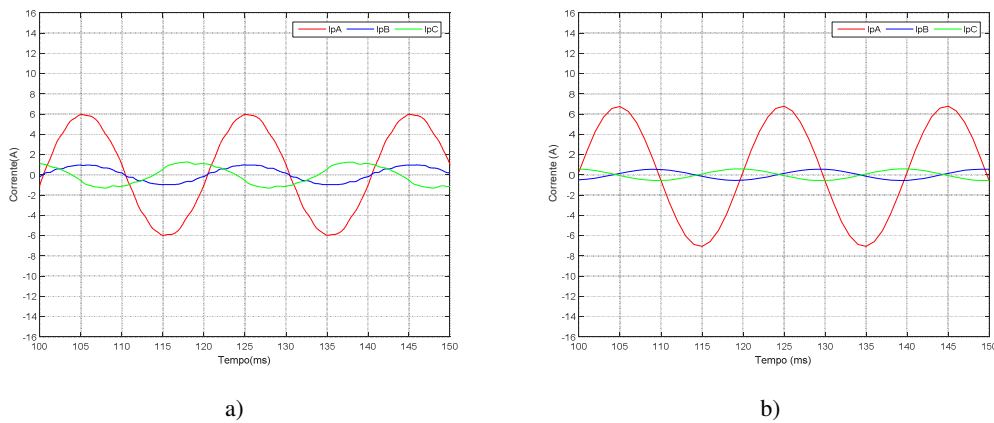


Figura 4.17-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário a) experimental; b) simulação.

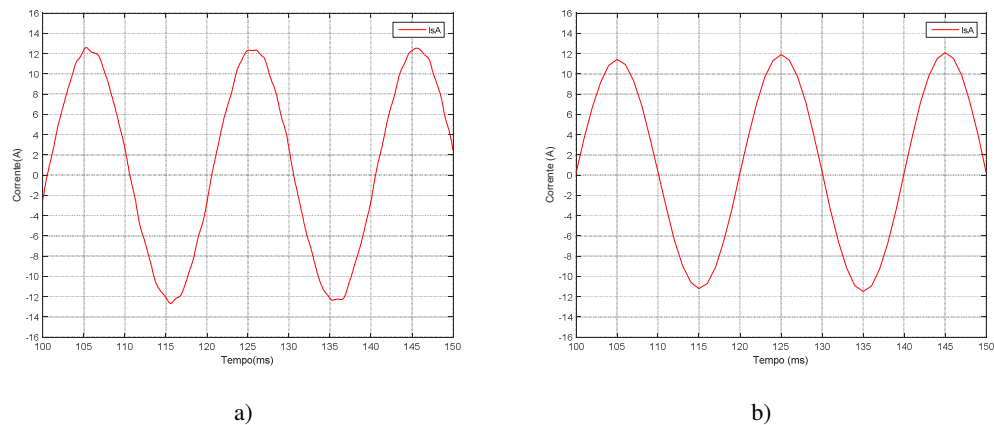


Figura 4.18-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

A presença da corrente no neutro implica diretamente que exista uma componente homopolar nas correntes no lado primário. A queda de tensão na impedância série dos enrolamentos fica desequilibrada, devido à assimetria das correntes, resultando num sistema

também desequilibrado de tensões no ramo de magnetização, que inclui uma componente homopolar. Estes fatores, conjugados com a assimetria natural do circuito magnético, faz com que os fluxos homopolares aumentem, em comparação com o ensaio em regime equilibrado discutido anteriormente. As tensões induzidas nas bobinas de teste têm assim uma maior amplitude comparativamente com o ensaio em regime equilibrado (figura 4.19 e tabela 4.5).

Nos resultados experimentais a forma de onda das tensões induzidas possui uma componente distorcida, com conteúdo harmónico semelhante ao obtida no regime equilibrado, sobreposta com uma componente fundamental. Esta última possui agora uma amplitude muito superior ao regime equilibrado, conforme se apresenta na espectrograma da figura 4.20.

Resumindo, pode dizer-se que as tensões induzidas nas bobinas de teste no ensaio com carga desequilibrada resultam da conjugação do conteúdo harmónico do regime equilibrado com o fundamental provocado pela assimetria da carga. Nos resultados de simulação apenas a componente fundamental é tomada em consideração pelo modelo computacional.

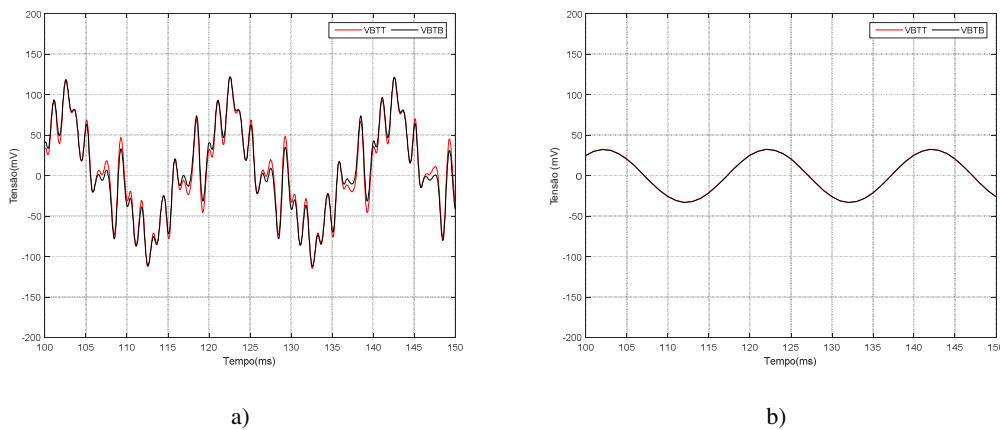


Figura 4.19-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.

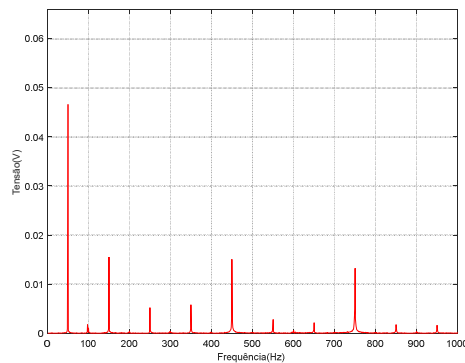


Figura 4.20-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior, resultado experimental.

Nas figuras 4.21 e 4.22 apresentam-se as formas de onda das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação) para o caso da resistência de carga estar ligada nas fases B e C, respetivamente. A mudança da fase da carga tem efeito no desfasamento das tensões induzidas, sendo as amplitudes idênticas, tabela 4.6.

Tabela 4.6-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.

Resultados de simulação	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Com carga única na Fase A	23.26	23.22
Com carga única na Fase B	24.80	24.74
Com carga única na Fase C	22.84	22.80

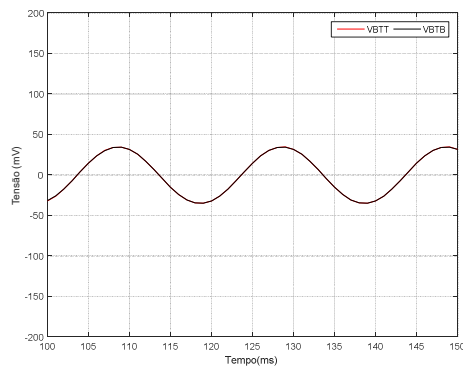


Figura 4.21-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada (fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).

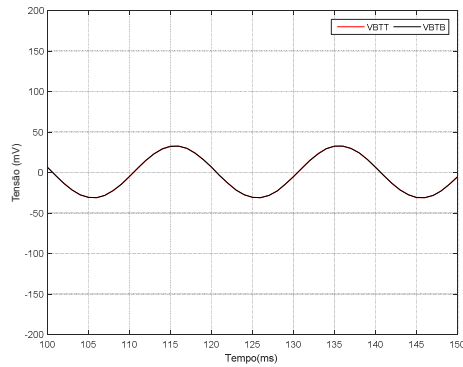


Figura 4.22-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada (fase C): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).

4.2.3 YNyn0: alimentação desequilibrada (falta de fase A)

Este ensaio pretende analisar as tensões induzidas nas bobinas de teste quando ocorre uma perturbação no sistema de alimentação. Considerou-se neste caso a falta da fase A na alimentação, figura 4.23. As condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: assimétrica, fase A em aberto; $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, $16\ \Omega$ por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

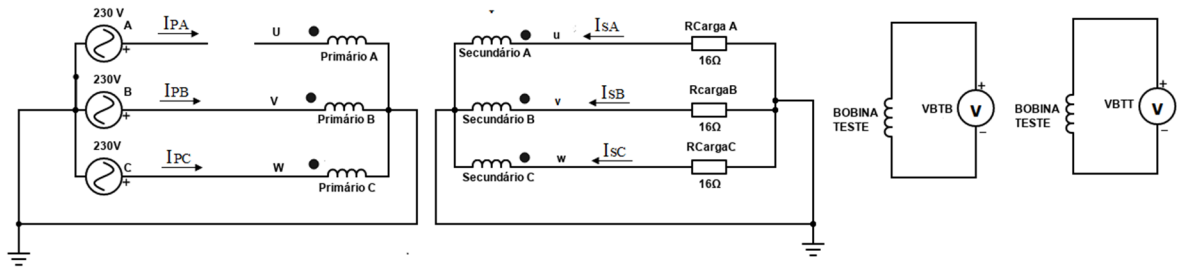


Figura 4.23-Esquema de ligação YNyn0 com alimentação desequilibrada.

Apesar de não existir tensão aplicada ao enrolamento da fase A do primário (resultando também em corrente nula, figura 4.24 e tabela 4.7), o fluxo magnético imposto pelas outras duas fases, vai-se fechar pela coluna dessa fase. Desprezando aqui por simplicidade os fluxos de dispersão:

$$\bar{\phi}_A + \bar{\phi}_B + \bar{\phi}_C = 0 \quad (4.7)$$

Estando os fluxos nas fases B e C desfasados de 120° e definindo:

$$\begin{cases} \bar{\phi}_B = 1 \angle -120^\circ \\ \bar{\phi}_C = 1 \angle 120^\circ \end{cases} \quad (\text{pu}) \quad (4.8)$$

Resulta:

$$\bar{\phi}_A = 1 \angle 0^\circ \quad (\text{pu}) \quad (4.9)$$

O fluxo na coluna da fase A é assim idêntico ao fluxo que existiria caso este enrolamento fosse também alimentado, induzindo no lado secundário do transformador um sistema equilibrado de correntes, figura 4.25. Na prática os fluxos de dispersão vão fazer com que os fluxos B e C não se fechem totalmente pela coluna A, resultando num valor ligeiramente menor de $\bar{\phi}_A$ e, conseqüentemente, num valor ligeiramente menor de corrente na fase A do lado secundário, situação facilmente visível na figura 4.25(a).

As correntes no lado primário nas fases B e C tem de compensar a falta da fase A, aumentando de valor comparativamente ao regime equilibrado pois a potência do secundário permanece idêntica nos dois regimes, mas agora é fornecida no lado primário apenas por 2 fases, figura 4.24 e tabela 4.7.

Globalmente os resultados experimentais e de simulação estão de acordo, apesar de não ser tão evidente nos resultados computacionais o menor valor da corrente na fase A do secundário.

Tabela 4.7-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	0	7.63	8.22	7.33	8.11	8.08	252.76	252.78
Simulação	0	8.36	8.71	8.28	8.36	8.43	258.10	257.57

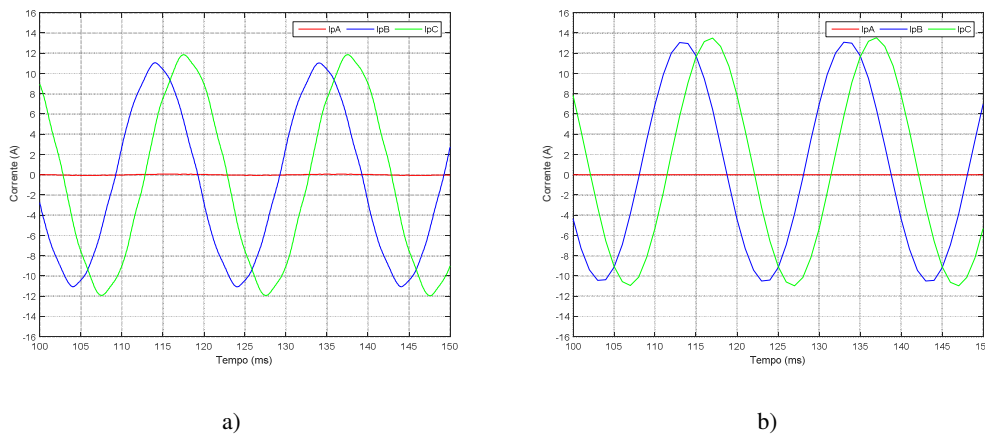


Figura 4.24-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.

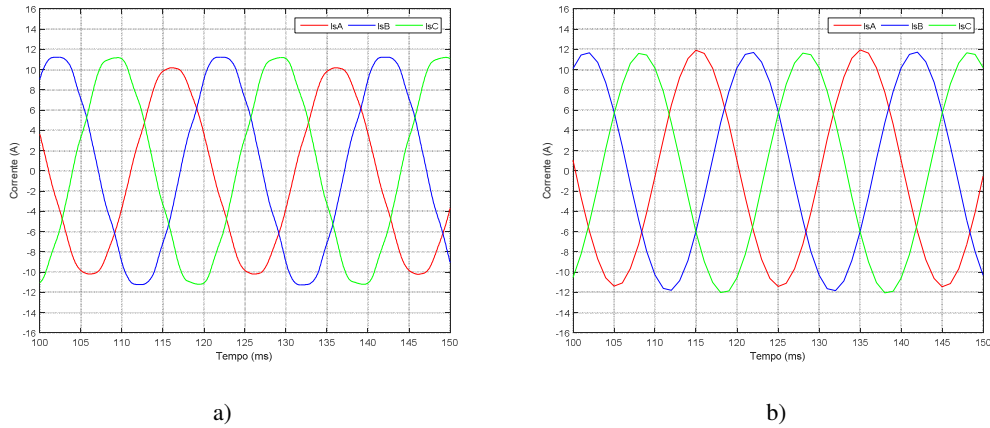


Figura 4.25- Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

O desequilíbrio no sistema de alimentação provoca um aumento significativo do fluxo homopolar, que se reflete nas tensões induzidas nas bobinas de teste, figura 4.26 e tabela 4.7. Os resultados experimentais e de simulação estão globalmente de acordo, à exceção da distorção harmónica, que não é considerada pelo modelo computacional.

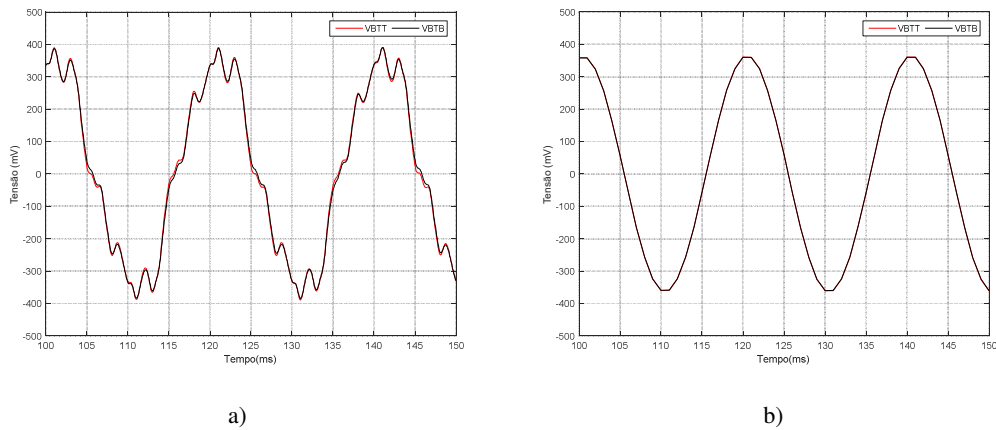


Figura 4.26-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.

Caso a falta da alimentação ocorresse noutras fases os resultados seriam similares, tabela 4.8 e figuras 4.27 e 4.28, afetando apenas o ângulo das tensões induzidas nas bobinas de teste.

Tabela 4.8-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.

Resultados de simulação	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Sem Fase A de alimentação	258.10	257.57
Sem Fase B de alimentação	259.74	259.20
Sem Fase C de alimentação	258.33	257.80

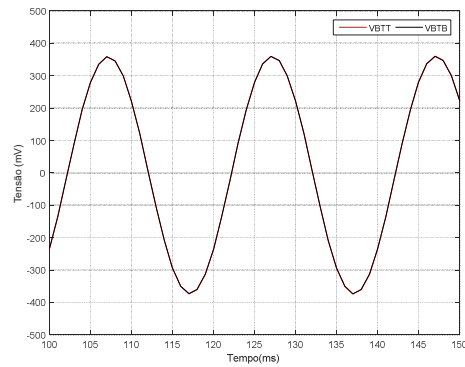


Figura 4.27-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada (sem fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).

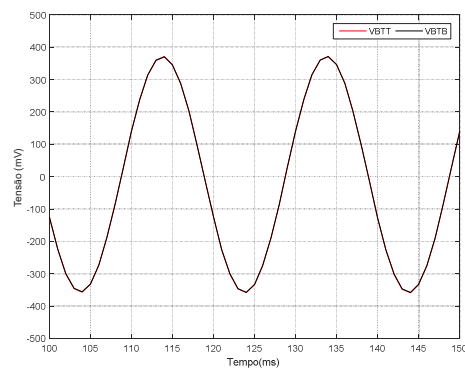


Figura 4.28-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada (sem fase C): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).

4.3 Ligação Yyn0 (sem neutro do primário)

4.3.1 Yyn0: Regime equilibrado

Este ensaio pretende analisar as tensões induzidas nas bobinas de teste quando o neutro do enrolamento primário não se encontra ligado, figura 4.29. A análise vai-se focar nas diferenças em relação aos casos (Secção 4.2) onde o neutro do primário se encontrava ligado ao neutro do gerador. Em resumo, as condições do ensaio são:

- Ligação: **Yyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω , por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

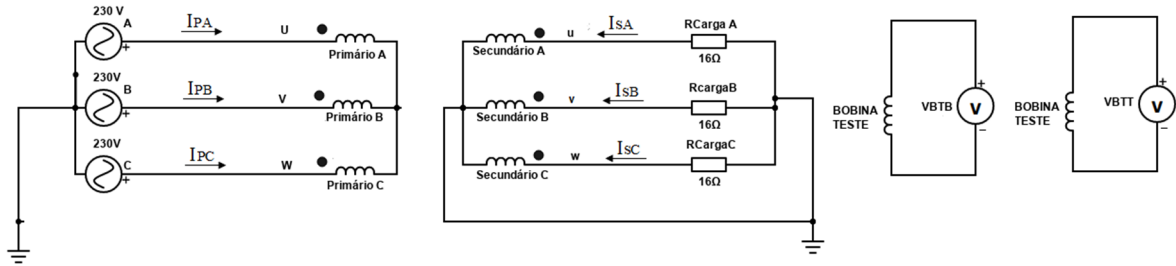


Figura 4.29-Esquema de ligação Yyn0 em regime equilibrado.

Em regime equilibrado a ausência de neutro no lado primário não afecta de forma significativa as correntes nos enrolamentos (em relação à ligação YNyn0), tabela 4.9 e figuras 4.30 e 4.31.

As tensões induzidas nas bobinas de teste têm também aproximadamente o mesmo valor eficaz (tabela 4.9), mas a forma de onda, figuras 4.32(a), e respetivo conteúdo harmónico, figura 4.33, é substancialmente diferente. A ausência de neutro no primário resulta na existência do terceiro harmónico nos fluxos das colunas, que se tem de fechar pelo ar, conforme explicado anteriormente. Como consequência o conteúdo harmónico das tensões induzidas nas bobinas de teste praticamente só possui a componente com frequência de 150 Hz, figura 4.33. Os resultados de simulação não incluem este fenómeno, à semelhança dos casos anteriores.

Tabela 4.9-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	4.89	4.89	5.08	8.90	7.98	8.46	0,95	0,98
Simulação	5.02	4.99	5.00	8.49	8.42	8.43	17,7	17,9

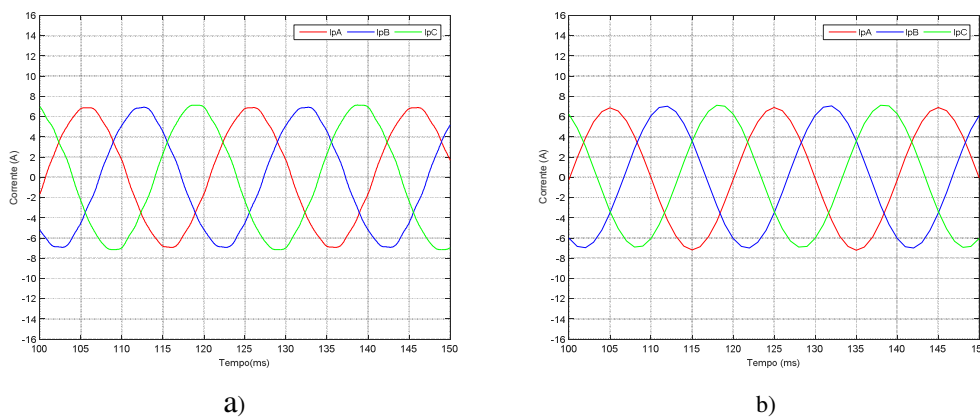


Figura 4.30-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.

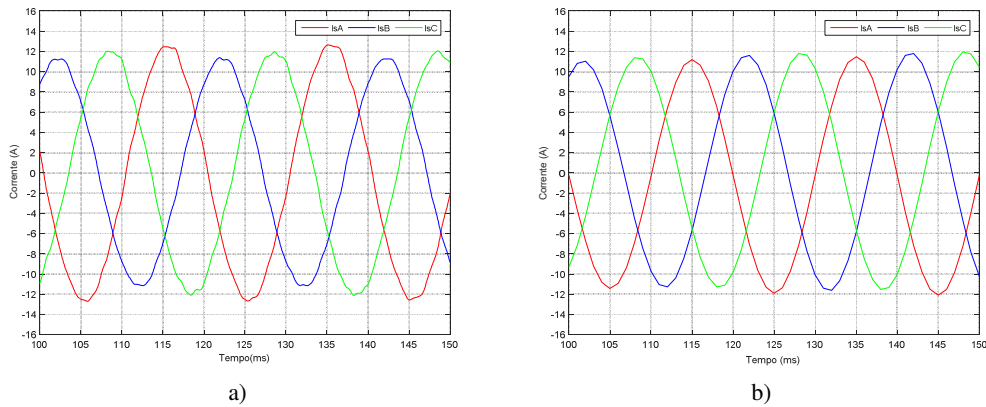


Figura 4.31-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.

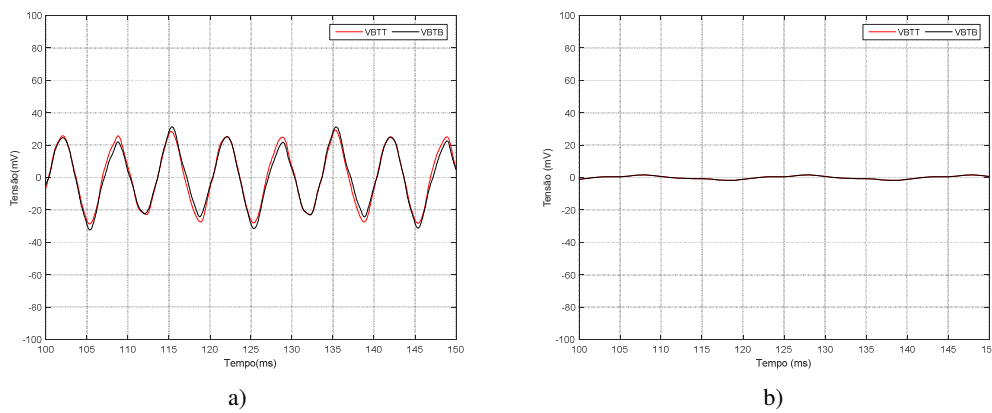


Figura 4.32-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.

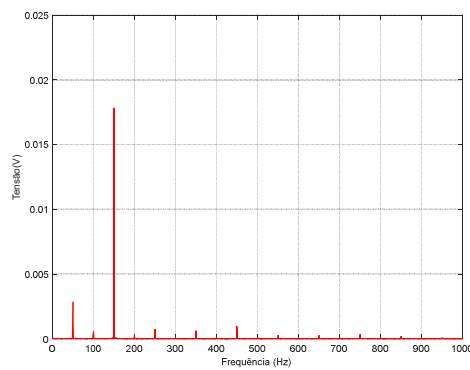


Figura 4.33-Ensaio Yyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior, resultado experimental.

4.3.2 Yyn0: carga desequilibrada (fase A-neutro)

Considera-se agora a ligação Yyn0 com carga desequilibrada, mais concretamente apenas com carga na fase A do secundário, esquema da figura 4.34. As condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **Yyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva desequilibrada, $16\ \Omega$, ligada entre fase A e neutro;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

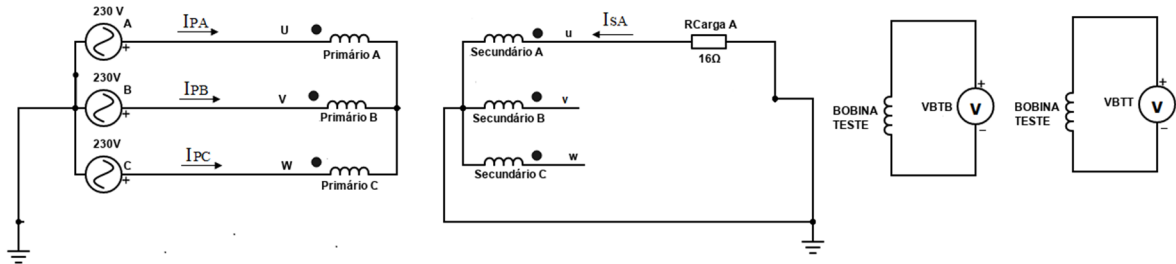


Figura 4.34-Esquema de ligação Yyn0 com carga desequilibrada.

A explicação sobre esta condição de funcionamento já foi apresentada na secção 2.5.2, sendo omitida aqui. As formas de onda das correntes nos enrolamentos são apresentadas nas figuras 4.35 e 4.36 (e o respectivo valor eficaz na tabela 4.10), estando de acordo com a explicação apresentada anteriormente. Os resultados experimentais e de simulação estão em boa concordância.

Tabela 4.10-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	3.33	1.84	1.51	8.21	-	-	91.90	97.09
Simulação	3.32	1.69	1.63	8.48	-	-	53.09	53.09

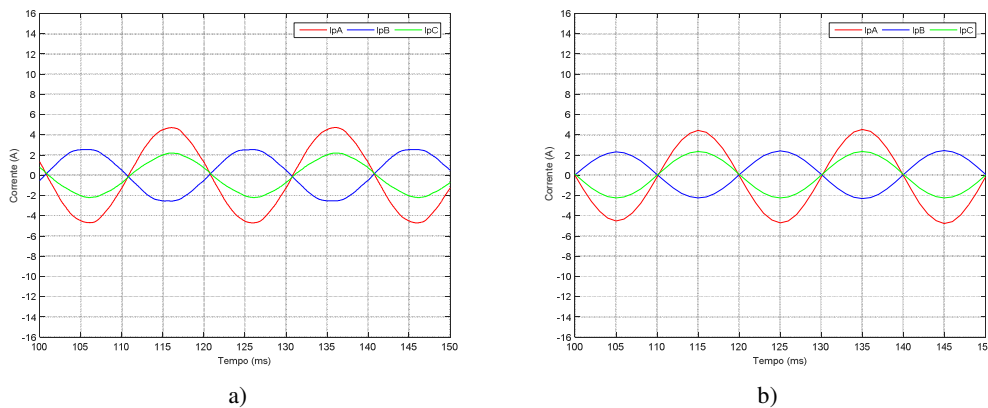


Figura 4.35-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.

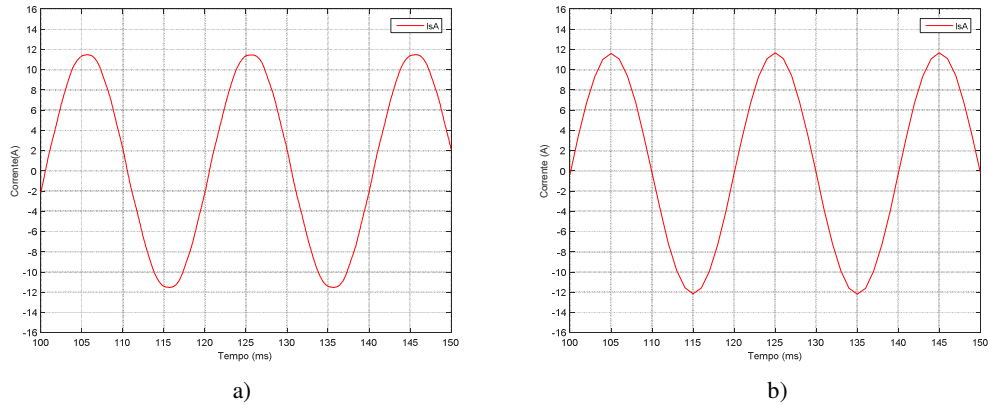


Figura 4.36-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

As fmm não estão equilibradas em cada coluna, resultando numa maior amplitude dos fluxos homopolares, que se traduz no aumento das tensões induzidas nas bobinas de teste, tabela 4.10, comparativamente quer com o caso Yyn do regime equilibrado, quer com o caso YNyn do regime desequilibrado. As formas de onda das tensões induzidas nas bobinas de teste são apresentadas na figura 4.37. A comparação entre os resultados experimentais e de simulação é semelhante aos casos anteriores.

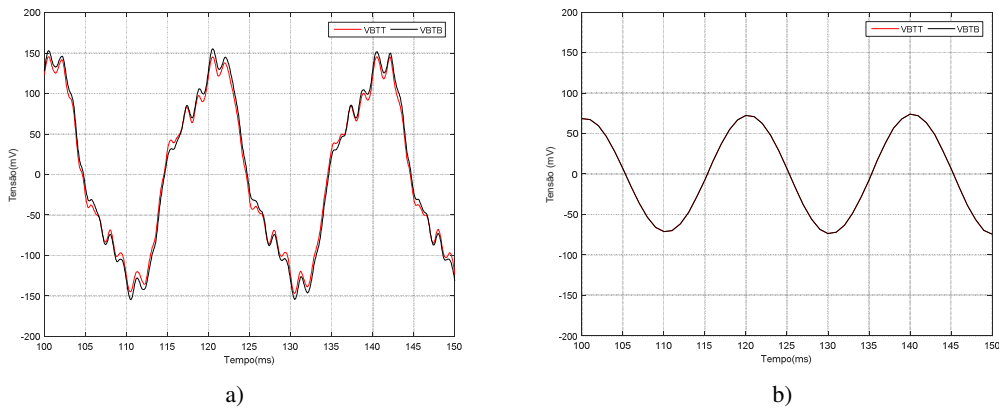


Figura 4.37-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada: Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.

Conclusões similares podem ser obtidas caso a carga seja ligada a outras fases do secundário, conforme apresentado na tabela 4.11 e figuras. 4.38 e 4.39.

Tabela 4.11-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.

Resultados de simulação	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Com carga única na Fase A	53.09	53.09
Com carga única na Fase B	53.66	53.66
Com carga única na Fase C	52.96	52.96

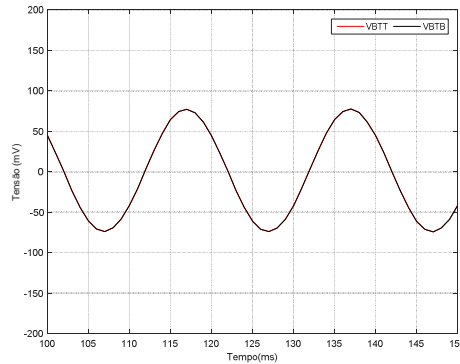


Figura 4.38-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada (fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).

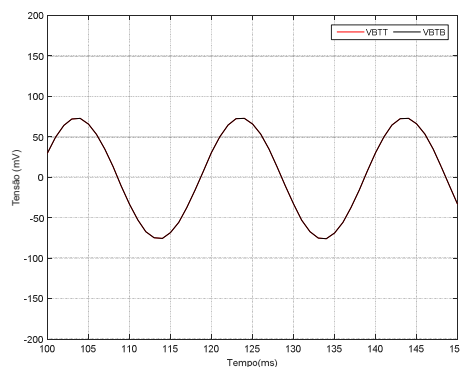


Figura 4.39-Ensaio Yyn0 com carga desequilibrada (fase C): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (resultados de simulação).

4.3.3 Yyn0: alimentação desequilibrada (falta de fase A)

Este caso é idêntico àquele apresentado na secção 4.2.3., mas com o enrolamento primário com neutro isolado, esquema da figura 4.40. As condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **Yyn0**;
- Alimentação: assimétrica, fase A em aberto; $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

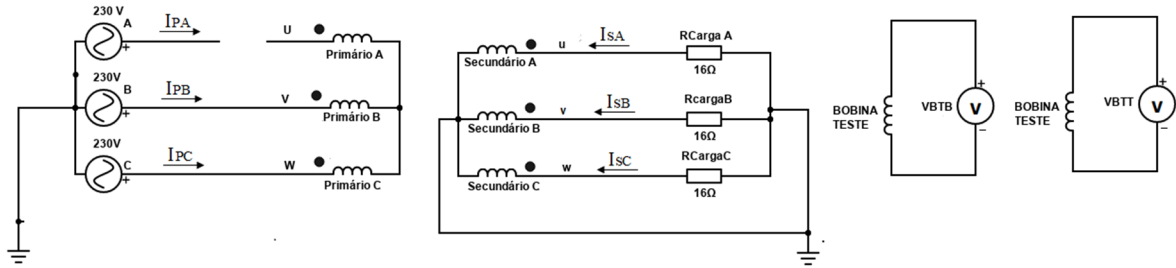


Figura 4.40-Esquema de ligação Yyn0 com alimentação desequilibrada.

Não existindo neutro no primário as correntes nas fases B e C do primário vão ser iguais e opostas. Consequentemente os fluxos B e C também vão ter a mesma amplitude e sinal contrário. Nestas condições estes fluxos fecham-se apenas pelas colunas associadas a essas fases, não existindo fluxo magnético (ou sendo residual) na coluna da fase A. Nesta situação os fluxos homopolares fora do núcleo serão muito reduzidos, pois a coluna da fase A oferece de facto um percurso de baixa relutância. Em resumo, as correntes das fases B e C vão ser iguais e opostas, quer no lado primário, quer no lado secundário, e as tensões induzidas nas bobinas de teste vão ter um valor muito reduzido, comparativamente com os casos anteriores. Os resultados experimentais e de simulação estão de acordo com a explicação exposta, conforme apresentado na tabela 4.12 e figuras. 4.41 a 4.43.

Conclusões similares podem ser obtidas caso a falta de alimentação ocorra numa das outras fases.

Tabela 4.12-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	0	4.30	4.40	0.20	6.66	6.50	2.5	3.3
Simulação	0	4.31	4.31	0.39	7.29	7.29	0.79	0.72

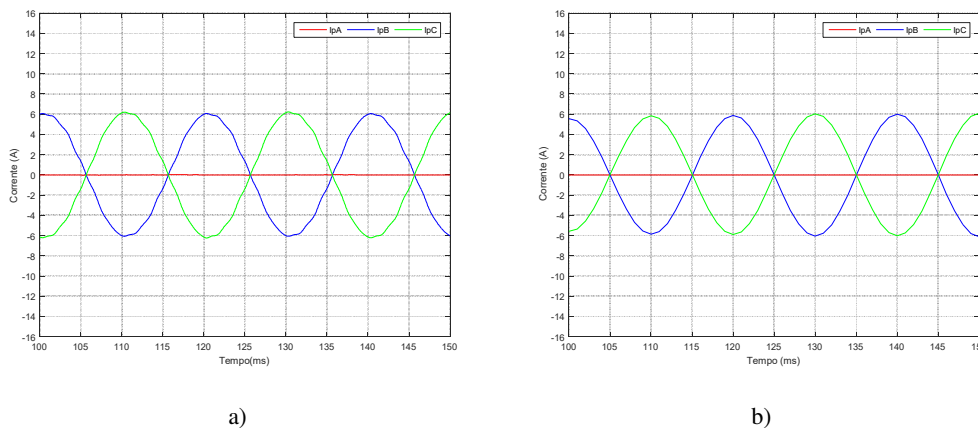


Figura 4.41- Ensaio Yyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.

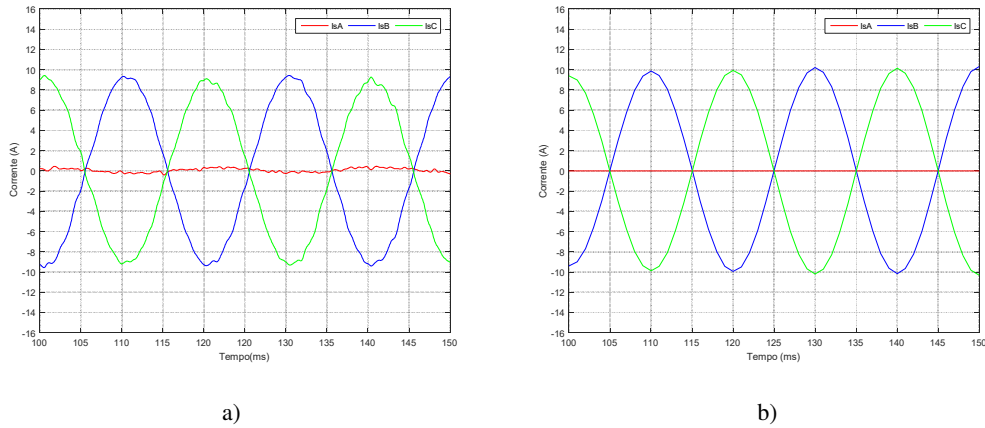


Figura 4.42-Ensaio Yyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

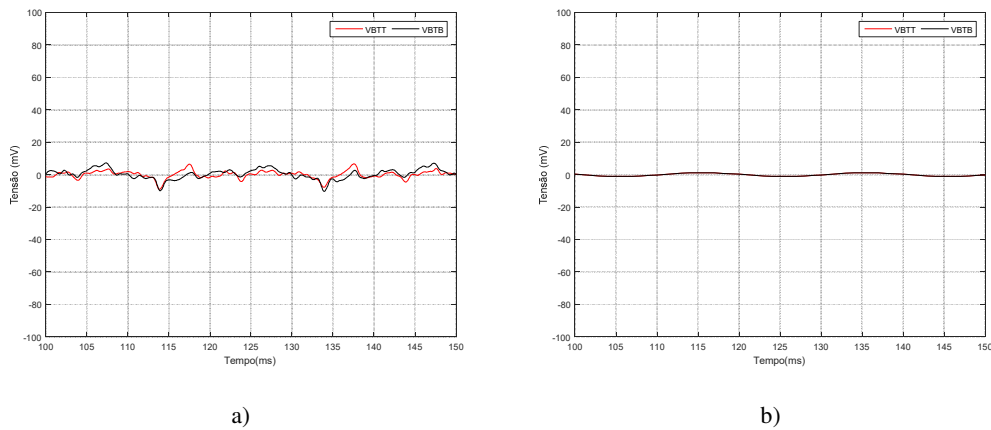


Figura 4.43-Ensaio Yyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.

4.4 Ligação Dyn11

4.4.1 Dyn11: Regime equilibrado

Pretende-se agora analisar o comportamento dos fluxos homopolares para a ligação triângulo-estrela com configuração Dyn11, com o esquema da figura 4.44. Neste ensaio usaram-se as seguintes condições:

- Ligação: **Dyn11**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=230$ V;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω , por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

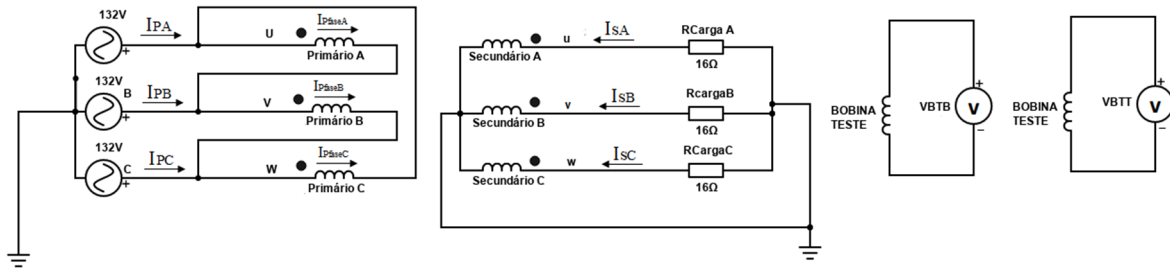


Figura 4.44-Esquema de ligação Dyn11 em regime equilibrado.

As figuras 4.45 a 4.48 apresentam as tensões e correntes obtidos no ensaio Dyn11 em regime equilibrado. Nestas condições não existem diferenças significativas em relação aos ensaios anteriores. Na ligação em triângulo do primário podem circular correntes com componente homopolar nos enrolamentos, figura. 4.46, mas não nas linhas, figura 4.47. Assim, podem circular componentes homopolares das correntes nos enrolamentos primários e nos secundários, situação que idêntica ao caso YNyn0. Os fluxos homopolares têm um valor reduzido, que se traduz também num baixo valor das tensões induzidas nas bobinas de teste, figura. 4.49 e tabela 4.15. De facto, os enrolamentos em triângulo servem de inibidores dos fluxos homopolares, pois vai estabelecer-se uma corrente no triângulo que contraria estes fluxos (contraria a causa que lhe deu origem).

Tabela 4.13-Valor eficaz das tensões simples de alimentação.

Dados	V_{PA} (V)	V_{PB} (V)	V_{PC} (V)
Experimental	130.57	133.58	134.53
Simulação	131.18	131.18	131.18

Tabela 4.14-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.

Dados	I_{PfaseA} (A)	I_{PfaseB} (A)	I_{PfaseC} (A)
Simulação	4.94	4.98	4.94

Tabela 4.15-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTA} (mV)
Experimental	8.53	8.42	8.68	7.90	8.38	7.98	9,2	8,3
Simulação	8.58	8.57	8.59	8.36	8.36	8.36	2.27	2.26

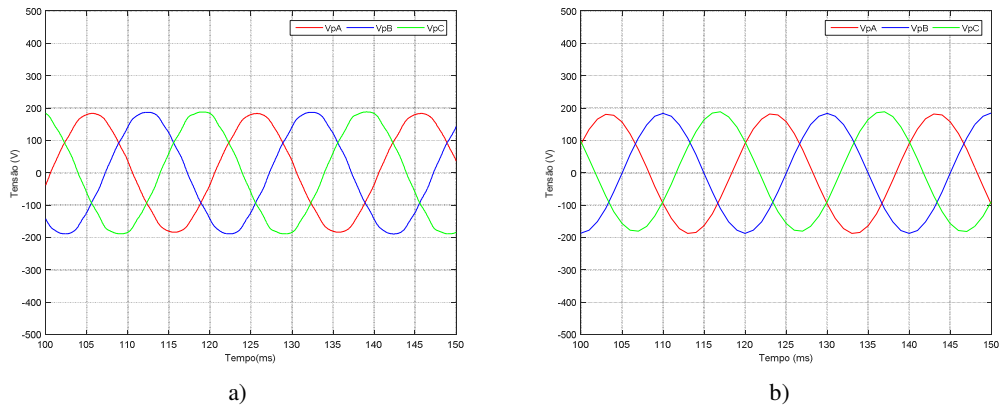


Figura 4.45-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões simples de alimentação: (a) experimental;(b) simulação.

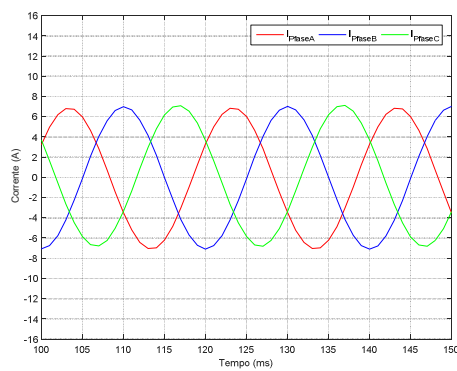


Figura 4.46-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).

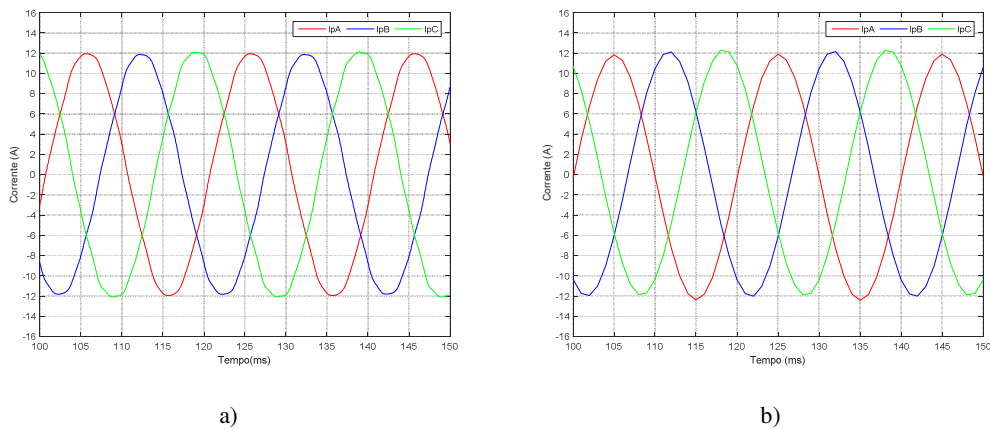


Figura 4.47-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.

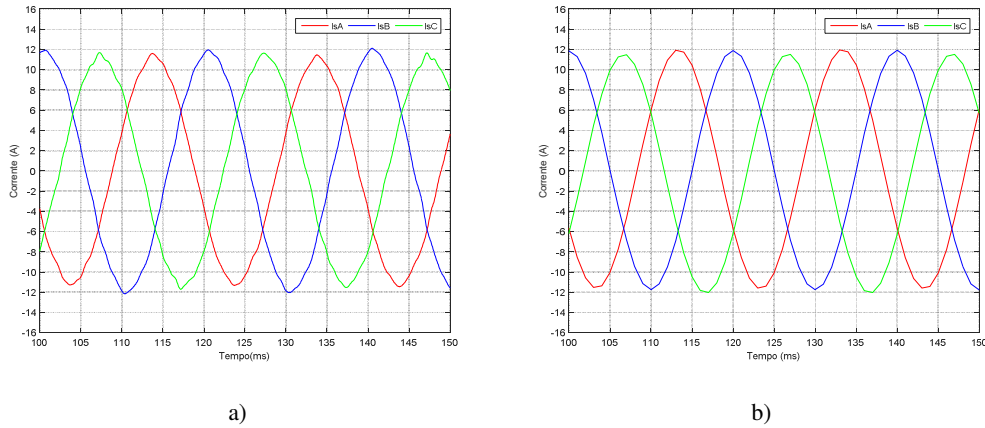


Figura 4.48-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.

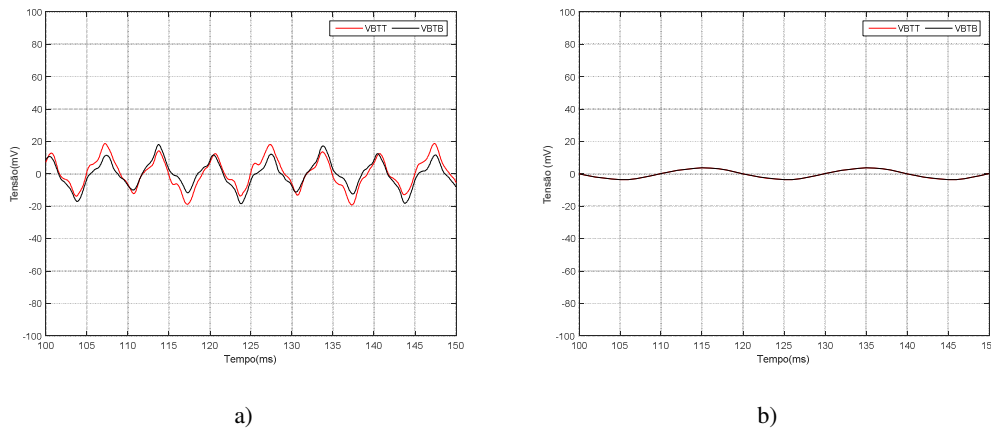


Figura 4.49-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.

4.4.2 Dyn11: carga desequilibrada (fase A-neutro)

As condições deste ensaio, figura 4.50 são as seguintes:

- Ligação: **Dyn11**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=230$ V;
- Carga: resistiva desequilibrada, 16Ω , ligada entre fase A e neutro;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

Podendo circular uma componente homopolar nas correntes nos enrolamentos do lado primário e secundário o comportamento do circuito vai ser idêntico àquele apresentado no caso YNyn0. As formas de onda relevantes são apresentadas nas figuras 4.51 a 4.53 e os valores eficazes nas tabelas 4.16 e 4.17.

Os fluxos homopolares vão ser cancelados por uma corrente que se fecha no enrolamento em triângulo, contrariando a causa que lhe deu origem, resultando assim em valores mais reduzidos nas tensões induzidas nas bobinas de teste do que no caso da ligação em estrela. Conclusões similares podem ser obtidas caso a carga seja ligada a outras fases do secundário.

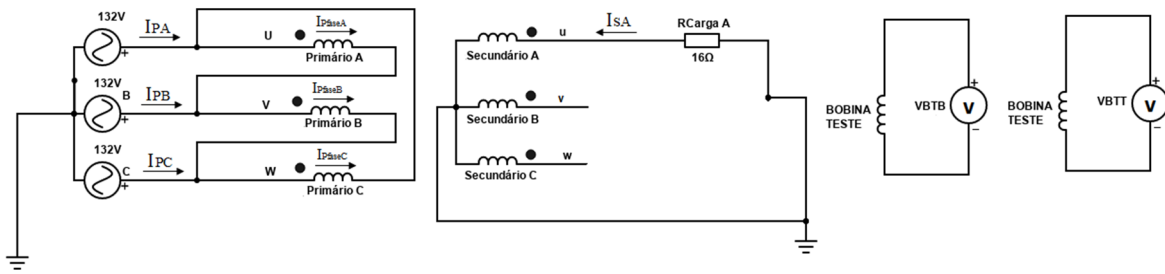


Figura 4.50-Esquema de ligação Dyn11 com carga desequilibrada.

Tabela 4.16-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.

Dados	$I_{P\text{fase}A}$ (A)	$I_{P\text{fase}B}$ (A)	$I_{P\text{fase}C}$ (A)
Simulação	4.92	4.97	0.04

Tabela 4.17-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	4,75	1,08	0,57	8,53	-	-	11.30	13.90
Simulação	4,88	0.39	0.40	8,38	-	-	20.49	20.44

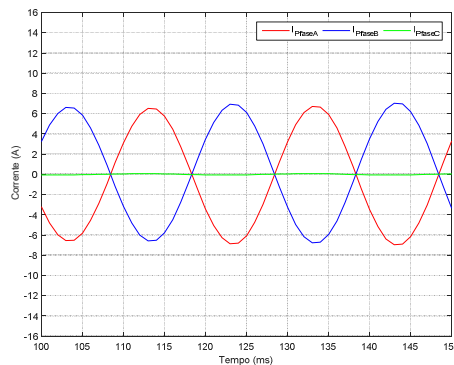


Figura 4.51-Ensaio Dyn11 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).

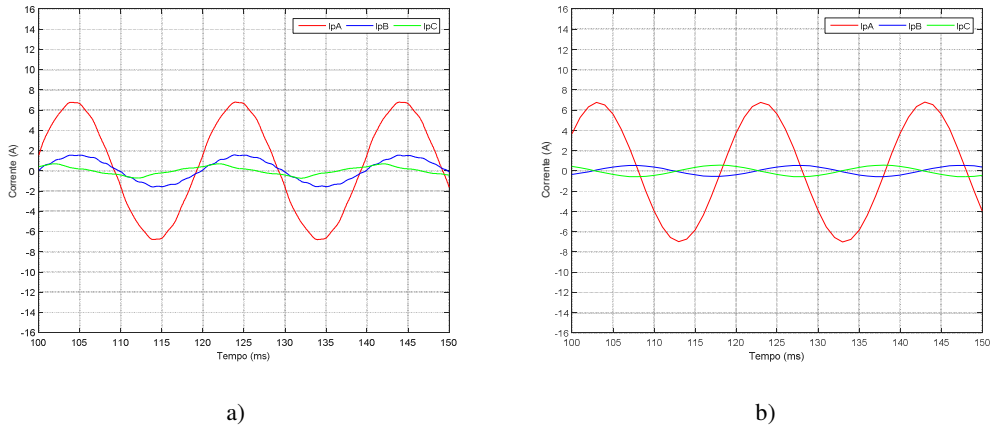


Figura 4.52-Ensaio Dyn11 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes de linha no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.

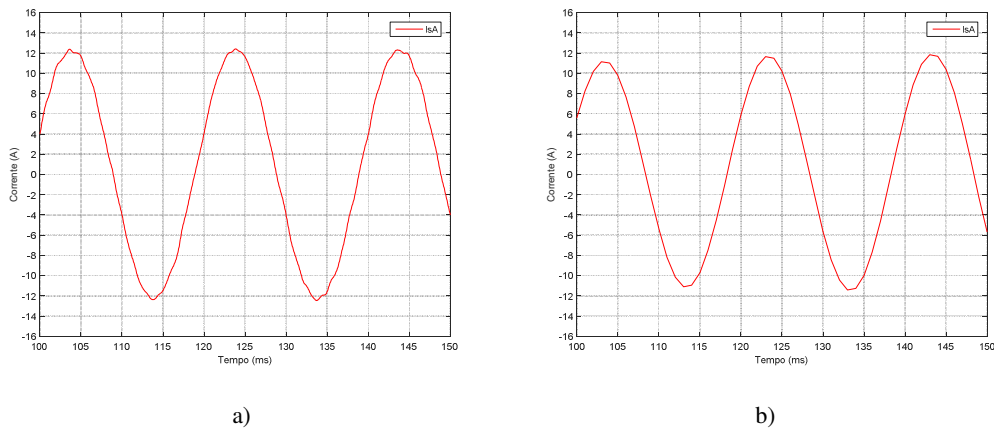


Figura 4.53-Ensaio Dyn11 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

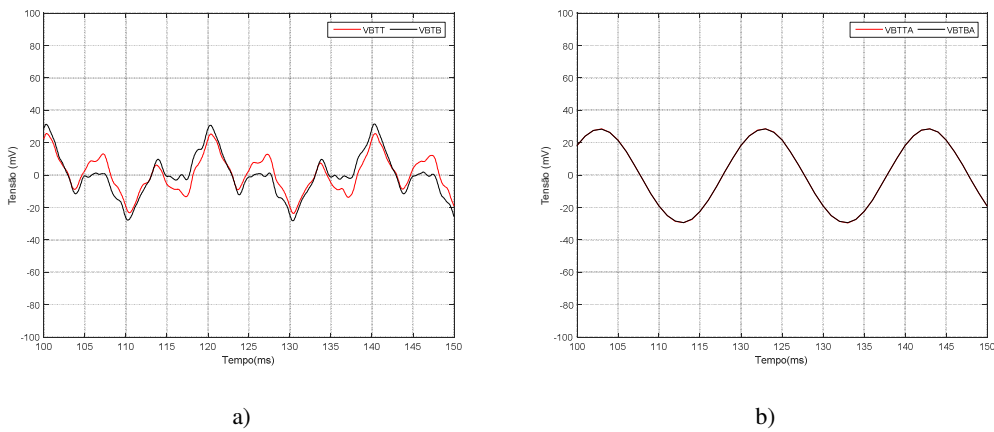


Figura 4.54-Ensaio Dyn11 com carga desequilibrada: Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.

4.4.3 Dyn11: alimentação desequilibrada I (interrupção no enrolamento da fase A)

Neste ensaio analisa-se o caso onde se interrompeu a ligação no enrolamento da fase A, figura 4.55. As condições deste ensaio são as seguintes:

- Ligação: **Dyn11**;
- Alimentação: assimétrica, fase A em aberto, $V_{LL}=230\text{ V}$;
- Carga: resistiva equilibrada, $16\ \Omega$ por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

Este ensaio conduz de facto a condições de funcionamento muito idênticas às que foram obtidas no caso de ligação YNyn0 e se removeu a alimentação da linha A (Secção 4.2.3). A principal diferença refere-se ao facto dos enrolamentos das fases B e C do primário serem alimentados com tensões compostas (V_{BC} e V_{CA} , respetivamente) enquanto no ensaio em YNyn0 o eram com tensões simples. As correntes de linha no lado primário são também diferentes, devido às ligações do triângulo aberto. As grandezas relevantes são apresentadas nas figuras 4.56 a 4.58 e os correspondentes valores eficazes nas tabelas 4.18 e 4.19.

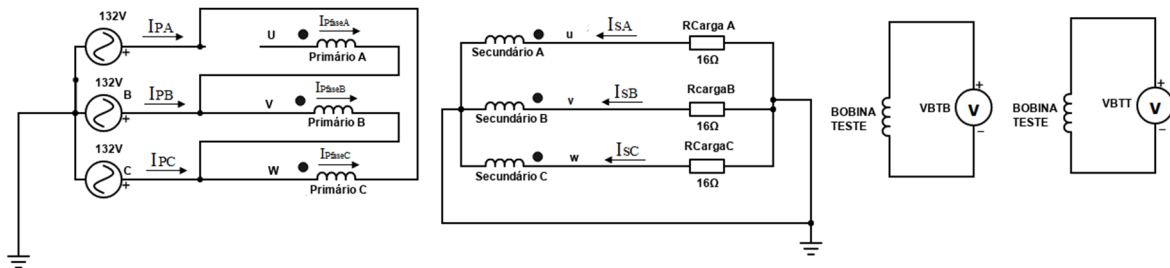


Figura 4.55-Esquema de ligação Dyn11 com alimentação desequilibrada: interrupção da fase A.

Tabela 4.18-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.

Dados	$I_{P\text{faseA}}$ (A)	$I_{P\text{faseB}}$ (A)	$I_{P\text{faseC}}$ (A)
Simulação	0	8.35	8.63

Tabela 4.19-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	7.68	8.20	8.64	8.31	8.34	8.30	277.12	283.09
Simulação	8.63	8.35	8.63	8.23	8.35	8.35	256.64	256.08

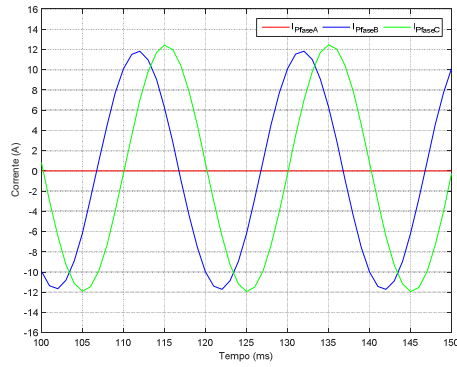
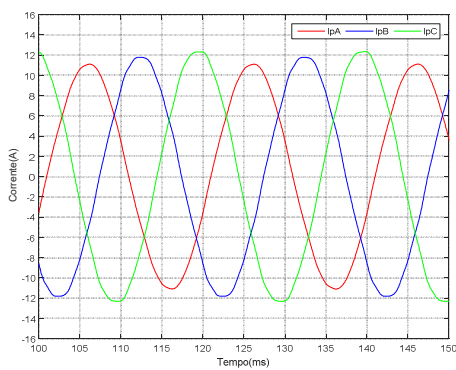
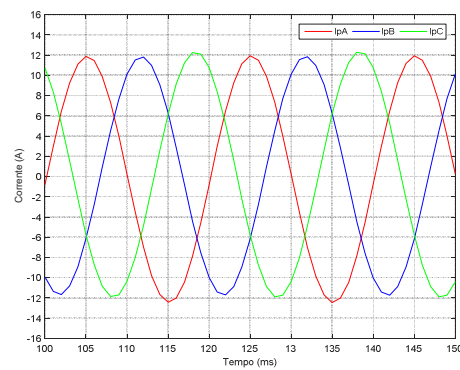


Figura 4.56-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).

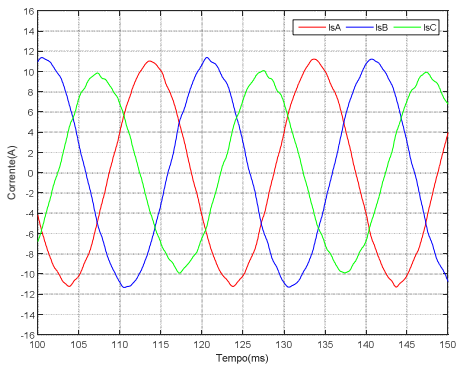


a)

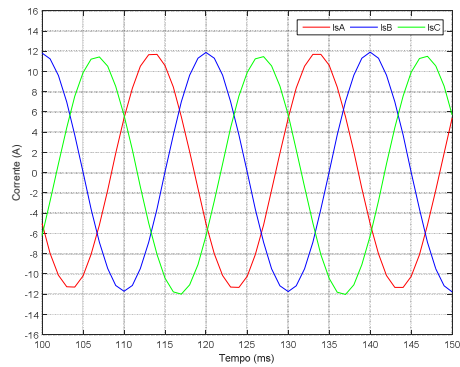


b)

Figura 4.57-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.



a)



b)

Figura 4.58-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.

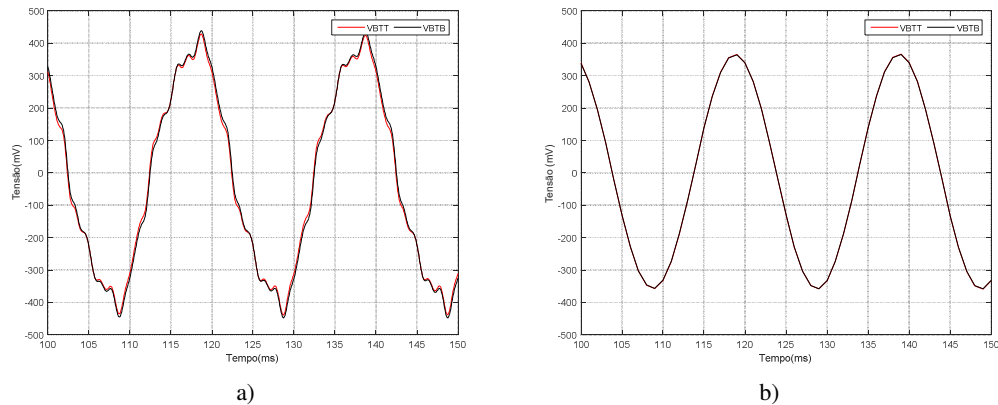


Figura 4.59-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção no enrolamento da fase A): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.

Verifica-se que apesar de semelhante, as tensões induzidas nas bobinas (resultados experimentais, figura 4.59 (a)) possuem uma forma de onda ligeiramente diferente daquela obtida no ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: isto sugere que os harmónicos das tensões de alimentação (que são diferentes das tensões simples para as tensões compostas) afetam o conteúdo harmónico dos fluxos homopolares.

Caso a interrupção da alimentação ocorresse noutras fases os resultados seriam similares.

4.4.4 Dyn11: alimentação desequilibrada II (interrupção na linha A)

Neste ensaio analisa-se o caso onde se interrompeu a ligação na linha A do primário, figura 4.60. As condições deste ensaio são as seguintes:

- Ligação: **Dyn11**;
- Alimentação: assimétrica, linha A em aberto, $V_{LL}=230$ V;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

Neste ensaio o primário (em delta) é alimentado apenas pela tensão composta VBC: esta tensão é aplicada diretamente ao enrolamento B e também, em paralelo, à associação série-adição dos enrolamentos A e C. Estes últimos são de facto alimentados com $\frac{1}{2}$ da tensão nominal, resultando em $\frac{1}{2}$ das correntes de fase no primário e no secundário, comparativamente com o caso de regime equilibrado. Verifica-se que as fmm por coluna são compensadas (iguais e de sentido contrário), resultando em valores reduzidos de fluxos homopolares.

Além disso, o triângulo do primário permanece fechado, permitindo que as correntes de excitação possuam o terceiro harmônico, mantendo o fluxo nas colunas aproximadamente sinusoidal. Os resultados obtidos confirmam esta explicação, figuras 4.61 a 4.64 e tabelas 4.20 e 4.21.

Caso a interrupção da alimentação ocorresse noutras linhas os resultados seriam similares.

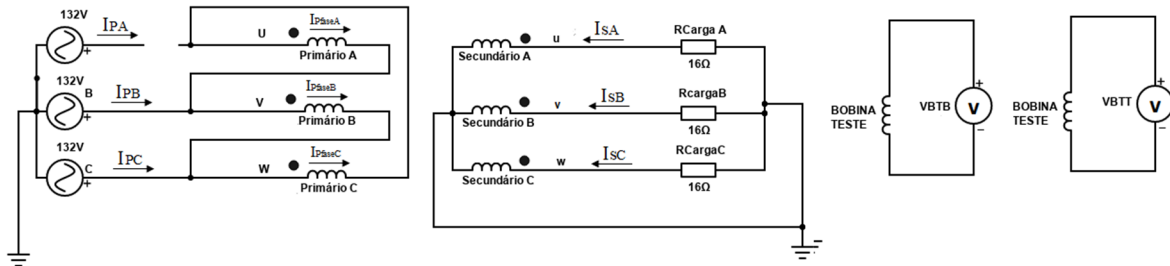


Figura 4.60-Esquema de ligação Dyn11 com alimentação desequilibrada: interrupção da linha A.

Tabela 4.20-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.

Dados	$I_{P\text{fase}A}$ (A)	$I_{P\text{fase}B}$ (A)	$I_{P\text{fase}C}$ (A)
Simulação	2.47	5.22	2.47

Tabela 4.21-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	0	6,98	6,95	3,99	8,38	4,13	4.30	3.60
Simulação	0	7.43	7.70	4.22	8,44	4.22	2.26	2.26

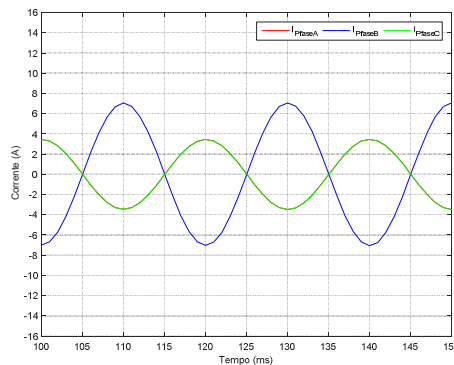


Figura 4.61-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).

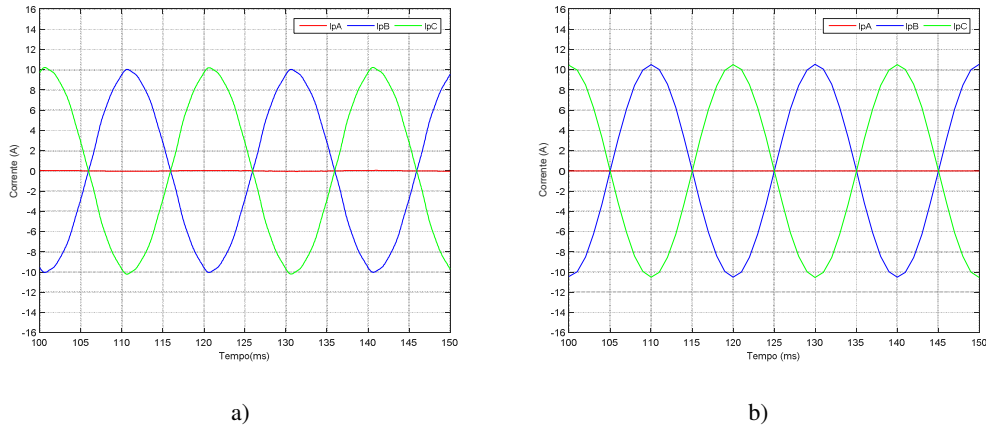


Figura 4.62-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.

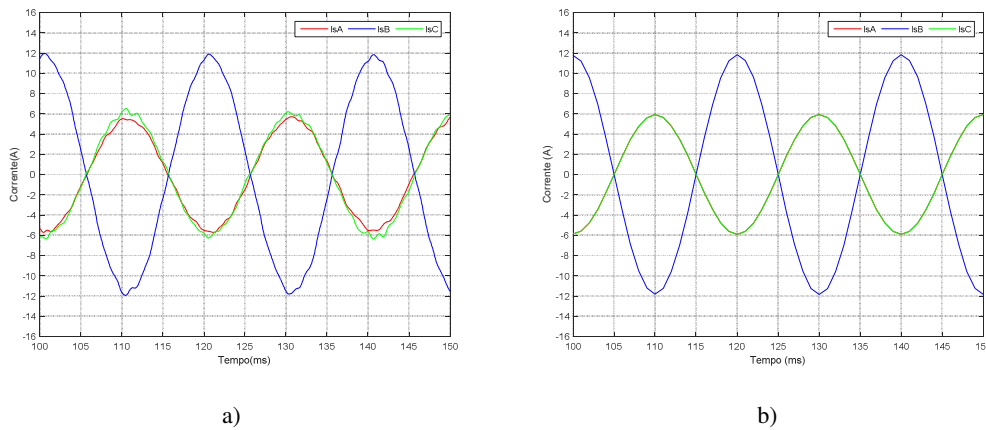


Figura 4.63-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.

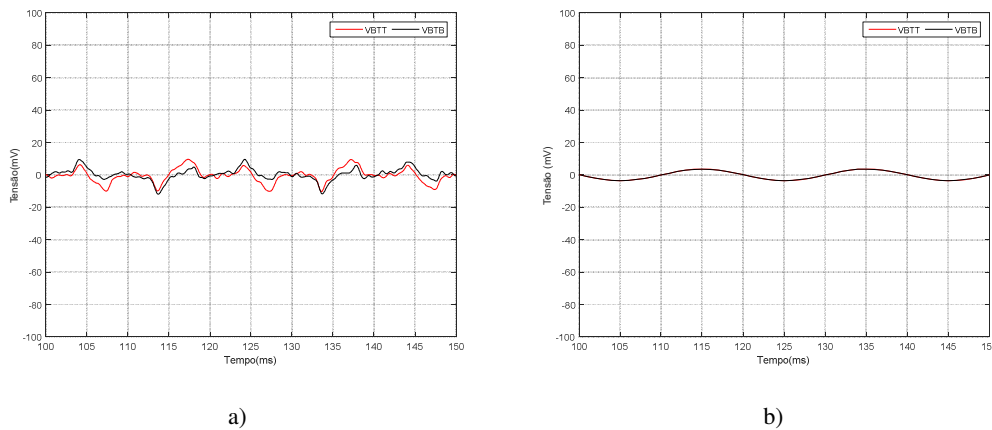


Figura 4.64-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (interrupção na linha A): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.

4.4.5 Dyn11: alimentação desequilibrada III (alimentação da fase B)

Este ensaio conjuga as 2 situações anteriores (com interrupção simultânea da fase A e da linha A), resultando apenas na alimentação do enrolamento B com a tensão VBC, figura.

4.65. As condições deste ensaio são as seguintes:

- Ligação: **Dyn11**;
- Alimentação: assimétrica, apenas alimenta fase B, $V_{LL}=230\text{ V}$;
- Carga: resistiva equilibrada, $16\ \Omega$ por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

Neste ensaio, no primário só existe corrente na fase B, o fluxo produzido nesta coluna (central) fecha-se pelas colunas laterais, dividindo-se equitativamente por estas. A tensão induzida nos enrolamentos A e C do secundário é assim metade da tensão em regime equilibrado. Resulta assim que a corrente nestes enrolamentos possui metade do valor em regime normal. A tensão e corrente no enrolamento B do secundário é igual à que ocorre no regime equilibrado. A corrente na fase B do primário é superior à do regime equilibrado, pois as três fases do secundário estão a ser alimentadas apenas por essa fase do primário. As fmm não estão equilibradas em cada coluna, resultando numa maior amplitude dos fluxos homopolares, que se traduz no aumento das tensões induzidas nas bobinas de teste. Os resultados obtidos confirmam esta explicação, figuras 4.66 a 4.69 e tabelas 4.22 e 4.23.

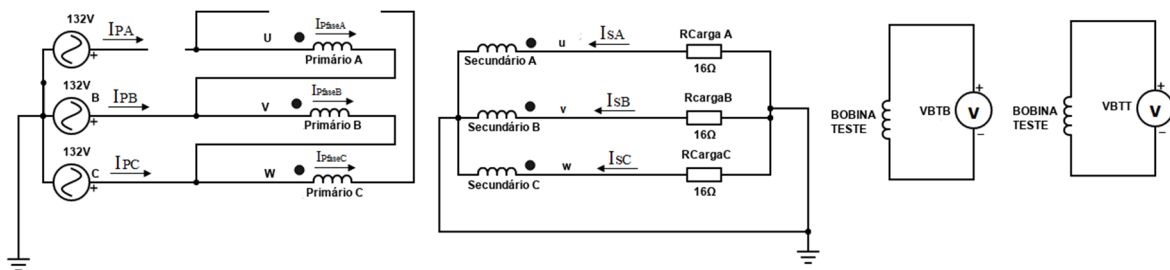


Figura 4.65-Esquema de ligação Dyn11 com alimentação desequilibrada: apenas alimentação da fase B.

Tabela 4.22-Valor eficaz das correntes nas fases (enrolamentos) do primário.

Dados	I_{pfaseA} (A)	I_{pfaseB} (A)	I_{pfaseC} (A)
Simulação	0	7.43	0

Tabela 4.23-Valor eficaz das correntes nas linhas e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	0	6,98	6,95	3,99	8,38	4,13	135	139
Simulação	0	7.43	7.70	4.22	8,44	4.22	116,61	116,38

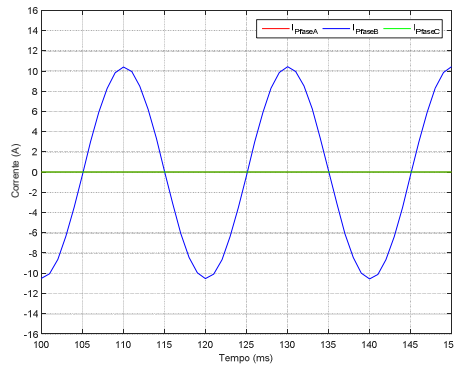
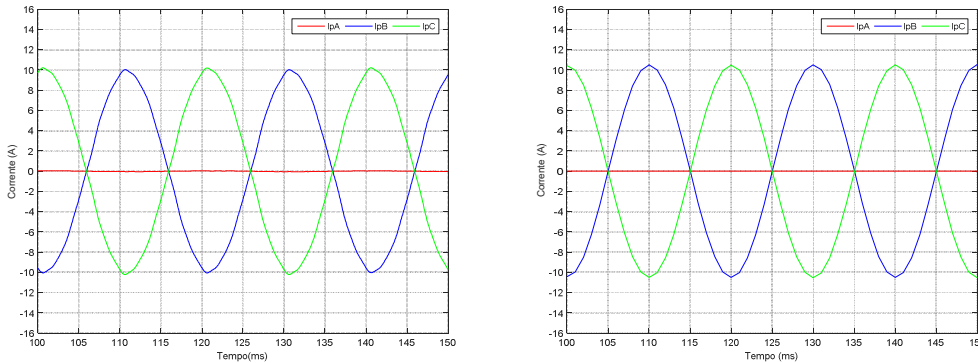


Figura 4.66-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das correntes nos enrolamentos no lado primário (simulação).



a)

b)

Figura 4.67-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das correntes de linha no lado primário: (a) experimental;(b) simulação.

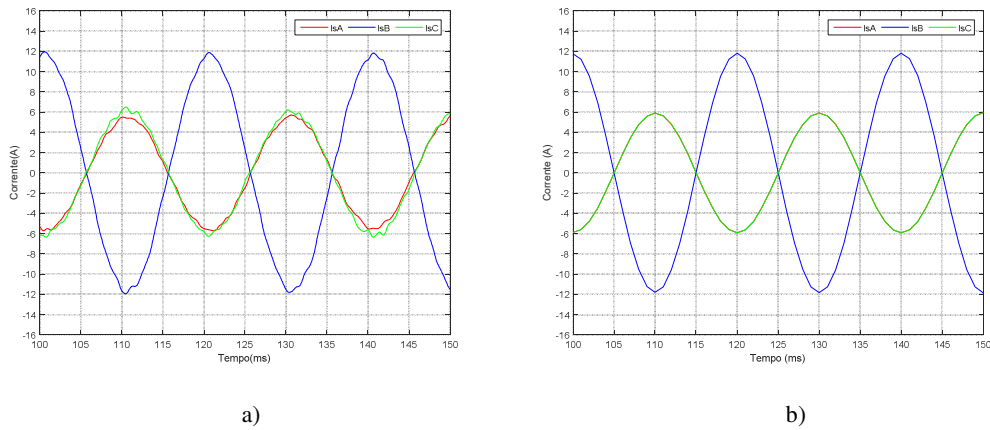


Figura 4.68-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das correntes de linha no lado secundário: (a) experimental;(b) simulação.

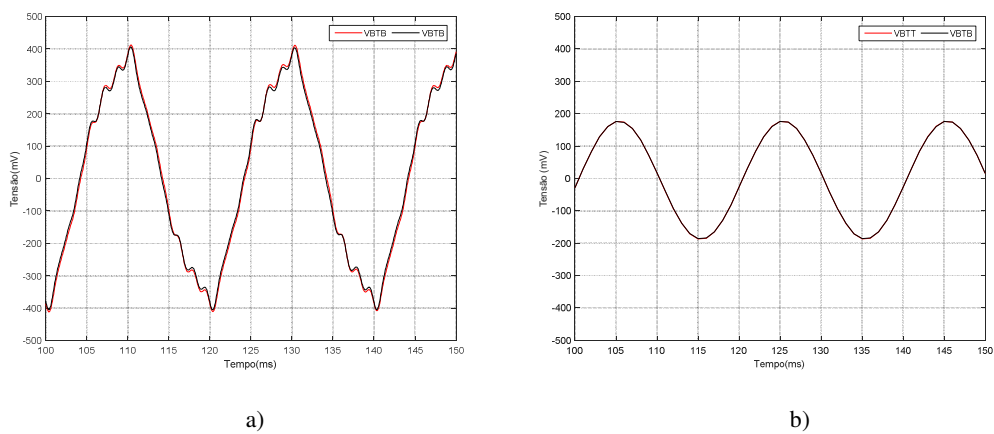


Figura 4.69-Ensaio Dyn11 com alimentação desequilibrada (apenas alimentação da fase B): evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) experimental;(b) simulação.

Outros ensaios, conduzidos para diferentes ligações dos enrolamentos, regimes de carga, condições de assimetria do sistema de alimentação conduzem a conclusões similares às anteriormente referidas.

5. Influência da Cuba na Análise ao Fluxo Homopolar

5.1 Influência da cuba

Neste capítulo, pretende-se analisar as características do fluxo homopolar quando o transformador está inserido na cuba.

5.2 Cuba de chapas

Foi construída uma cuba para o transformador utilizando chapas de ferro existentes no laboratório, montadas e sustentadas com suportes de madeira, figura 5.1. A cuba foi também incluída no modelo computacional de elementos finitos, figura 5.2. O transformador não se encontra centrado verticalmente no interior da cuba, estando mais próximo da base do que do topo.

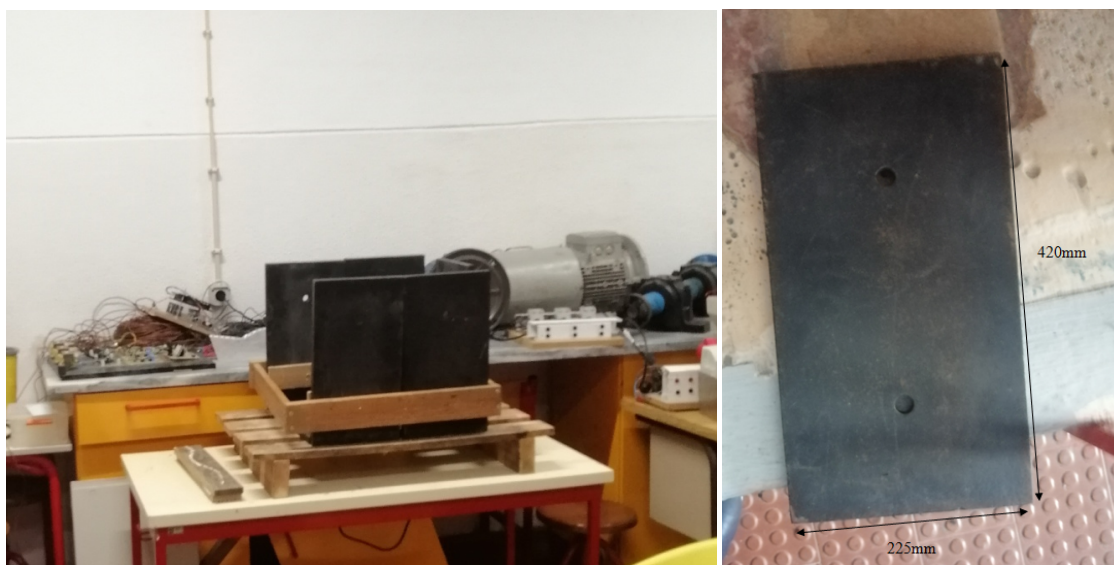


Figura 5.1-Cuba construída com chapas de ferro.

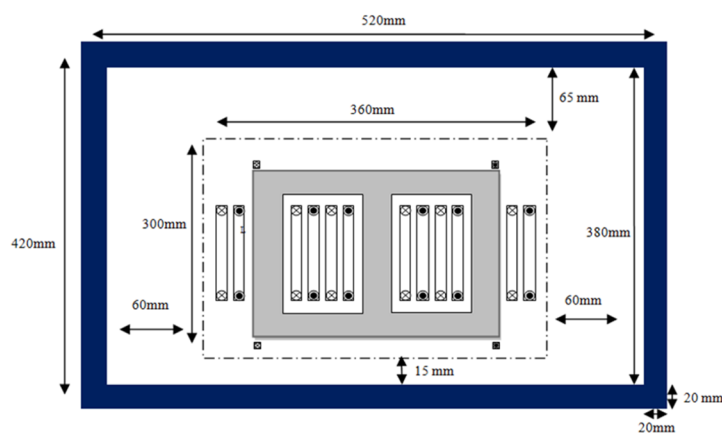


Figura 5.2.-Dimensões e característica da cuba de chapas.

5.3 Ensaios homopolares com a cuba de chapas

5.3.1 Ensaio homopolar em curto-circuito.

O ensaio homopolar em curto-circuito já foi descrito anteriormente, para a situação onde não existia cuba. A presença da cuba não afeta de forma significativa os resultados obtidos, tabela 5.1. Os fluxos homopolares fecham-se agora num percurso que engloba as chapas de ferro, com menor relutância, resultando num valor ligeiramente superior da reactância homopolar, comparativamente com o ensaio sem cuba. O aumento dos fluxos homopolares resulta no aumento das tensões induzidas nas bobinas de teste, particularmente na bobina de baixo, pois a cuba está mais próxima da base do que do topo do núcleo ferromagnético. As formas de onda das correntes no primário e no secundário e das tensões induzidas são apresentadas nas figuras 5.3 e 5.4, podendo-se observar que os resultados de simulação e experimentais estão em boa concordância.

Comparativamente ao ensaio realizado na secção 4.1.2, verifica-se que a impedância de curto-circuito têm valor semelhante, apresentado uma boa concordância.

Tabela 5.1-Resultados do ensaio homopolar em curto-circuito.

	V_{OP} (V)	I_{OP} (A)	I_{Os} (A)	Z_{Occ} (m Ω)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	8.46	5.29	8.82	537.14	48.66	72.20
Simulação	8.69	5.83	9.72	497.71	130.15	182.03

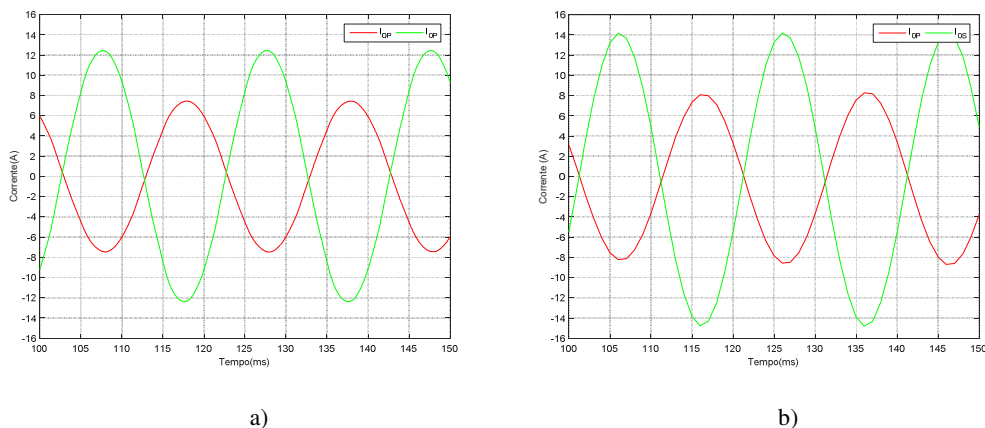


Figura 5.3-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

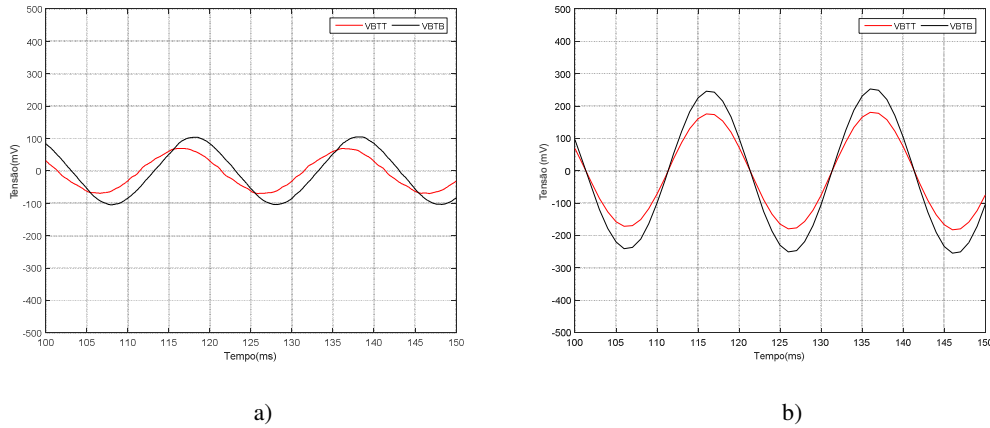


Figura 5.4-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

5.3.2 Ensaio homopolar em vazio

No ensaio homopolar em vazio a presença da cuba tem globalmente os mesmos efeitos que no caso do ensaio em curto-circuito, mas com consequências ampliadas: a impedância homopolar aumenta de forma mais significativa e as tensões induzidas nas bobinas de teste mais que duplicam. A diferença entre as tensões induzidas nas bobinas de teste superior e inferior é também mais notória, fornecendo informação sobre a presença de uma assimetria no circuito magnético.

As formas de onda da corrente no primário e das tensões induzidas são ilustradas nas figuras 5.5 e 5.6, os correspondentes valores eficazes, são apresentados na tabela 5.2. No caso de v_{BTT} e v_{BTB} os resultados experimentais têm uma maior amplitude que os obtidos em simulação, devido às limitações do modelo pelas razões já apresentadas anteriormente.

Tabela 5.2-Resultados do ensaio homopolar em vazio.

	V_{0P} (V)	I_{0P} (A)	V_{0s} (V)	Z_{0m} (Ω)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	66.76	4.87	37.75	4.34	595.68	1068
Simulação	43.90	4.30	25.52	3.23	1479	2030

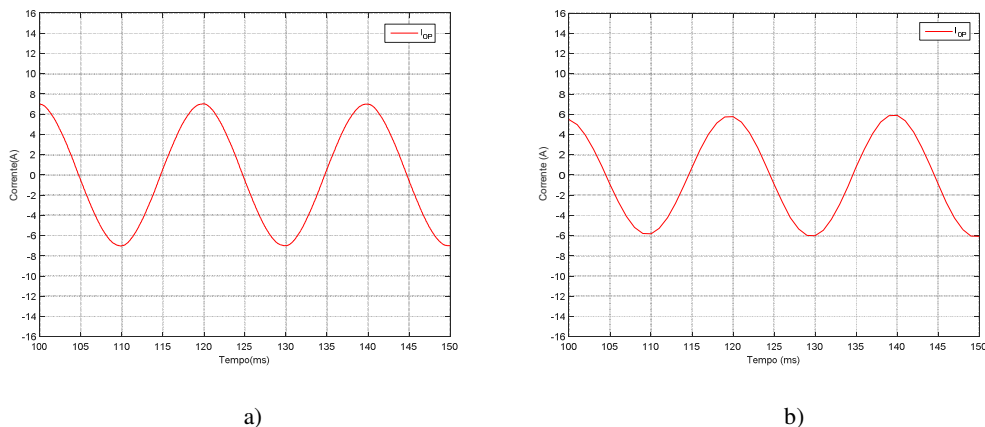


Figura 5.5-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal da corrente no primário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

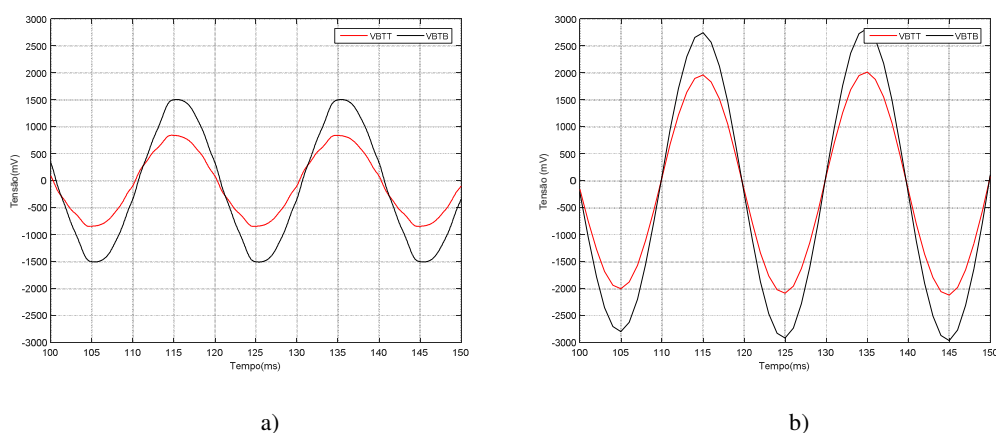


Figura 5.6-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

5.4 Ligação YNyn0 com a cuba de chapas

5.4.1 YNyn0: Regime equilibrado

Utilizam-se as mesmas condições do ensaio da secção 4.2.1, neste caso, com a presença da cuba:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω , por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

As formas de onda apresentadas nas figuras 5.7 a 5.9 ilustram a evolução temporal da tensão no enrolamento primário e as correntes nos enrolamentos.

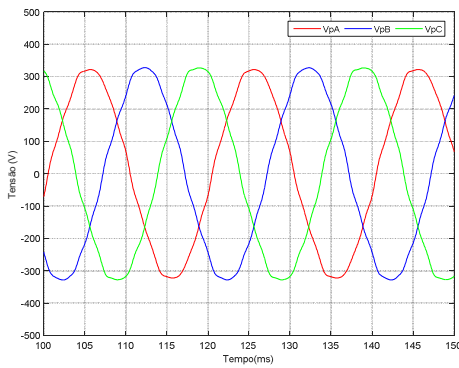
As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os valores eficazes das tensões no enrolamento primário, das correntes nos enrolamentos e das tensões induzidas nas bobinas de teste.

Tabela 5.3-Valor eficaz das tensões de alimentação.

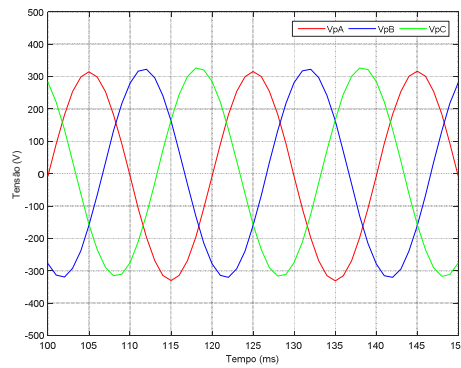
Dados	V_{PA} (V)	V_{PB} (V)	V_{PC} (V)
Experimental	229.16	233.11	233.50
Simulação	228	228	228

Tabela 5.4-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	5.00	4.89	4.67	8.32	8.71	8.25	35.1	40.2
Simulação	4.44	4.45	4.49	7.49	7.49	7.49	4.65	6.63

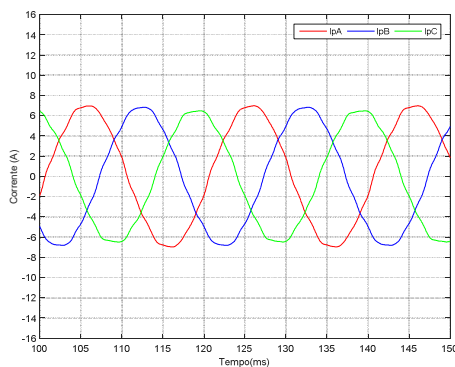


a)

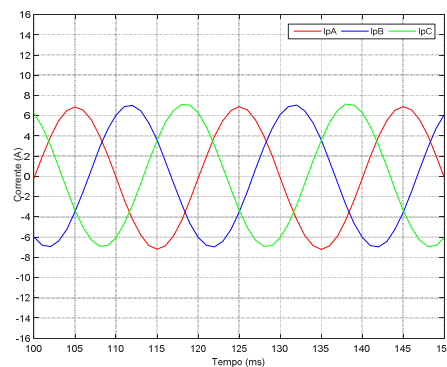


b)

Figura 5.7-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.



a)



b)

Figura 5.8-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das correntes no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.

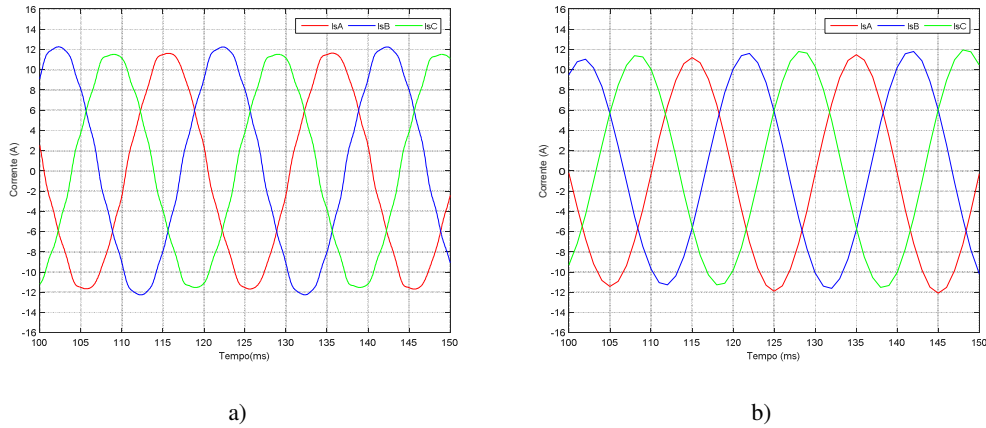


Figura 5.9-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.

A figura 5.10, ilustra a forma de ondas das tensões induzidas nas bobinas de teste: à semelhança do ensaio apresentado no capítulo 4, secção 4.2.1., a forma de onda obtida experimentalmente continua bastante distorcida, com conteúdo harmónico semelhante ao ensaio realizado no capítulo 4. Em comparação com os resultados obtidos no capítulo 4, verifica-se um ligeiro aumento da amplitude da tensão induzida nas bobinas de teste, conforme se apresenta na espectrograma da figura 5.11.

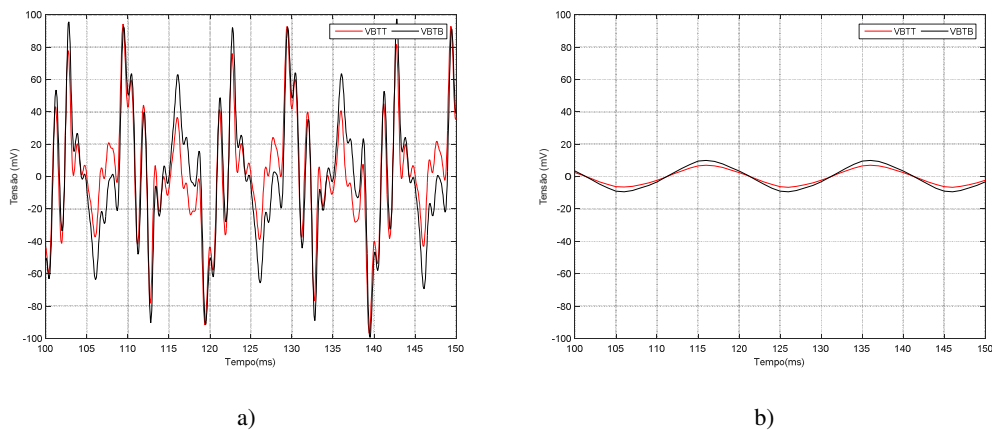


Figura 5.10-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.

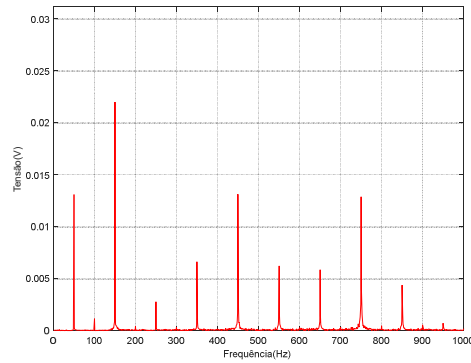


Figura 5.11-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.

5.4.2 YNyn0: alimentação desequilibrada (falta de fase A)

Este ensaio pretende analisar as tensões induzidas nas bobinas de teste na cuba quando ocorre a falta da fase A na alimentação. Em resumo as condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: assimétrica, fase A em aberto; $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

A explicação sobre este ensaio já foi apresentada na secção 4.2.3, sendo omitida aqui. As formas de onda das correntes nos enrolamentos são apresentadas nas figuras. 5.12 e 5.13 e os respetivos valores eficazes na tabela 5.5, estando de acordo com a explicação apresentada anteriormente. A conjugação do desequilíbrio provocado pela falta de fase e o percurso oferecido pela cuba levam a um aumento significativo do fluxo homopolar, comparativamente com o caso sem cuba, que se reflete nas tensões induzidas das bobinas de teste, figura 5.14.

Também neste ensaio se verifica que a tensão induzida na bobina de teste da base é superior à tensão na bobina de teste do topo, devido às razões já mencionadas anteriormente.

Tabela 5.5-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	0	7.11	7.66	6.97	8.03	8.53	497	892
Simulação	0	7.00	7.95	7.16	7.45	7.55	1390	1990

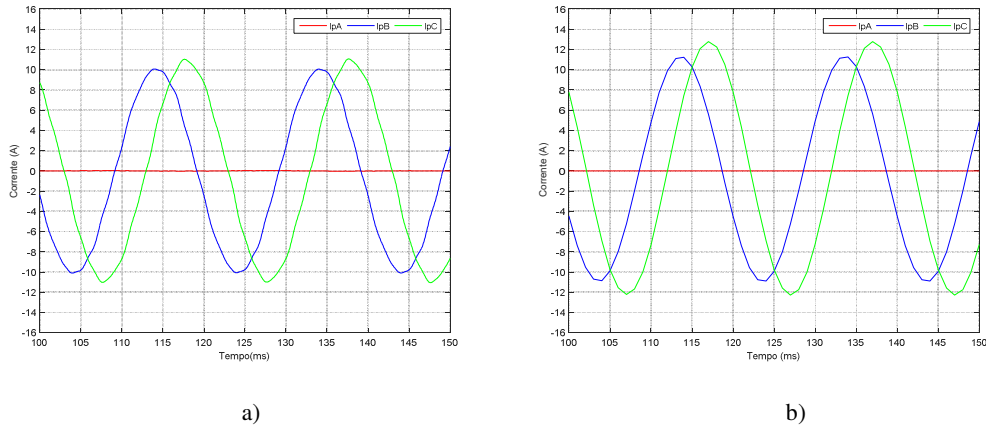


Figura 5.12-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) experimental; b) simulação.

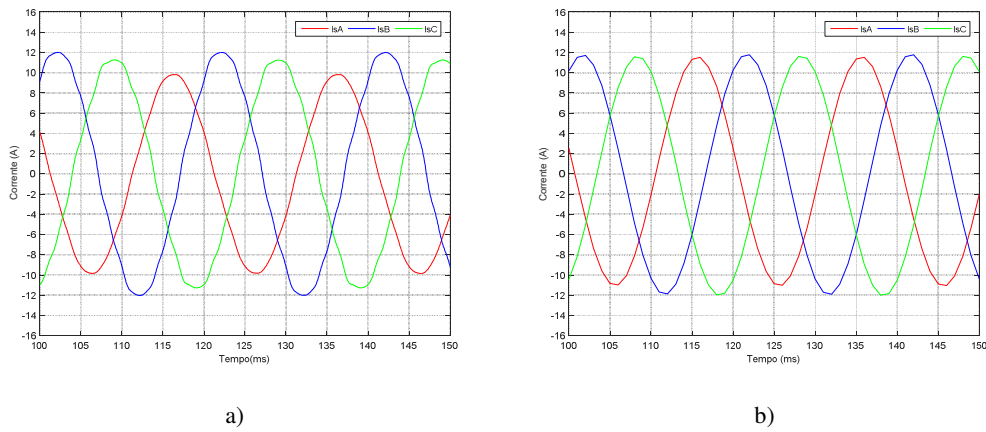


Figura 5.13-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

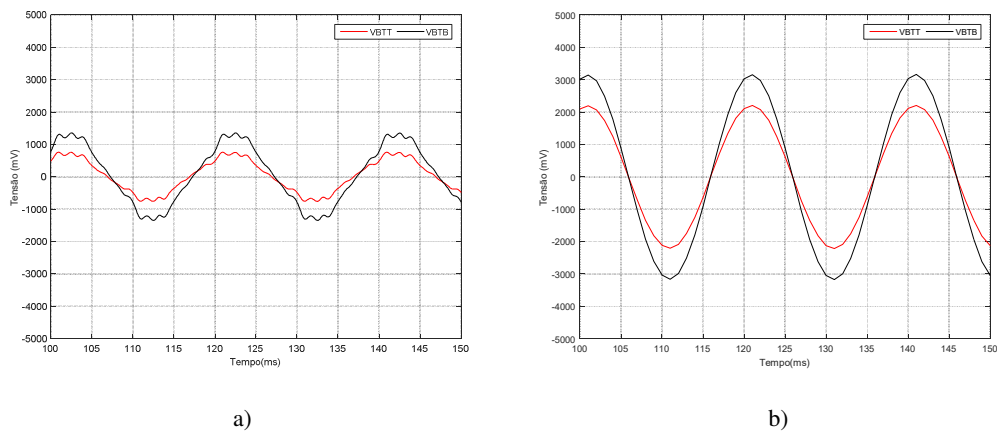


Figura 5.14-Ensaio YNyn0 com alimentação desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) experimental; b) simulação.

5.5 Cuba de um transformador de 50kVA

Após a validação dos resultados com a “cuba de chapas”, foi utilizada uma cuba real de um transformador trifásico de 50 kVA sucateado. A colocação do transformador dentro da cuba foi realizada com o auxílio de um ferro tubular e dois cabos de aço nas extremidades do transformador, conforme ilustrado na figura 5.15. As ligações de cada ensaio foram realizadas com o transformador fora da cuba, sendo depois o transformador inserido no reservatório. A cuba agora utilizada é de maior dimensão que a anterior, com a chapa a possuir menor espessura. Por facilidade utilizaram-se chapas de ferro do ensaio anterior para servir de tampa da cuba (estas chapas possuem maior espessura que a chapa da cuba). As dimensões e geometria da cuba e do transformador apresentam-se resumidamente na figura 5.16. À semelhança do caso anterior, o transformador não se encontra centrado verticalmente na cuba.



Figura 5.15-Ensaio experimental com cuba de 50kVA.

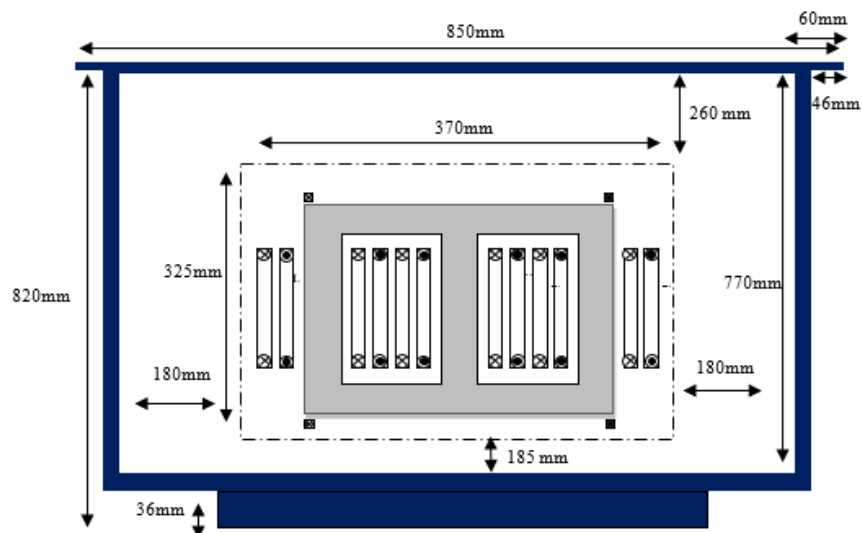


Figura 5.16-Dimensões e característica da cuba de 50kVA.

5.6 Ensaio homopolar com a cuba de 50kVA

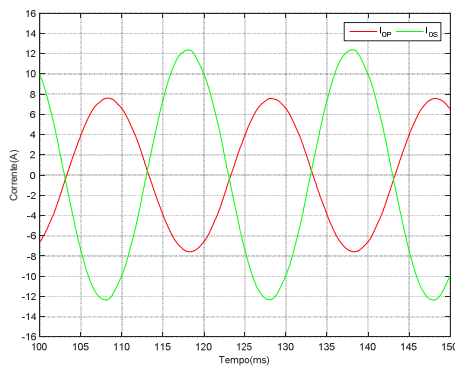
5.6.1 Ensaio homopolar de curto-circuito

Os resultados relevantes são apresentados nas figuras 5.17 e 5.18 e na tabela 5.6. Este ensaio corresponde a uma situação entre as duas condições anteriores (sem cuba e com a cuba de chapas), pois, comparativamente com a cuba de chapas, o fluxo homopolar neste caso tem um maior percurso pelo ar, devido à maior distância entre o núcleo ferromagnético e a cuba (devido à maior dimensão desta última). O valor da impedância homopolar de curto-circuito confirma este raciocínio, pois situa-se entre as duas situações referidas (com e sem cuba).

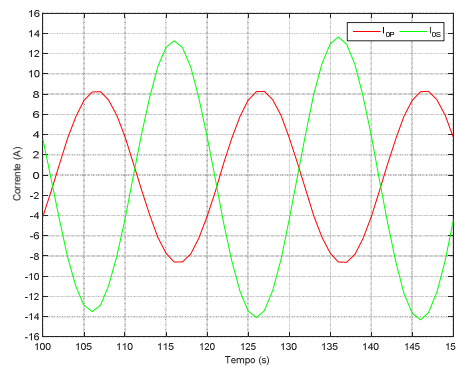
Os fluxos homopolares são idênticos à situação sem cuba, pois as linhas fecham-se também aqui parcialmente pelo ar, situação que se reflete nas tensões induzidas nas bobinas de teste. Dos resultados obtidos nestes ensaios não se conseguem estabelecer conclusões definitivas sobre a influência da localização assimétrica do transformador na cuba nas tensões induzidas nas bobinas de teste (devido à menor influência da cuba).

Tabela 5.6-Resultados do ensaio homopolar em curto-circuito.

	V_{OP} (V)	I_{OP} (A)	I_{Os} (A)	Z_{Occ} (m Ω)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	8.30	5.40	8.77	530.01	34.75	31.05
Simulação	8.72	6.01	9.49	510,12	96.08	97.89



a)



b)

Figura 5.17-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

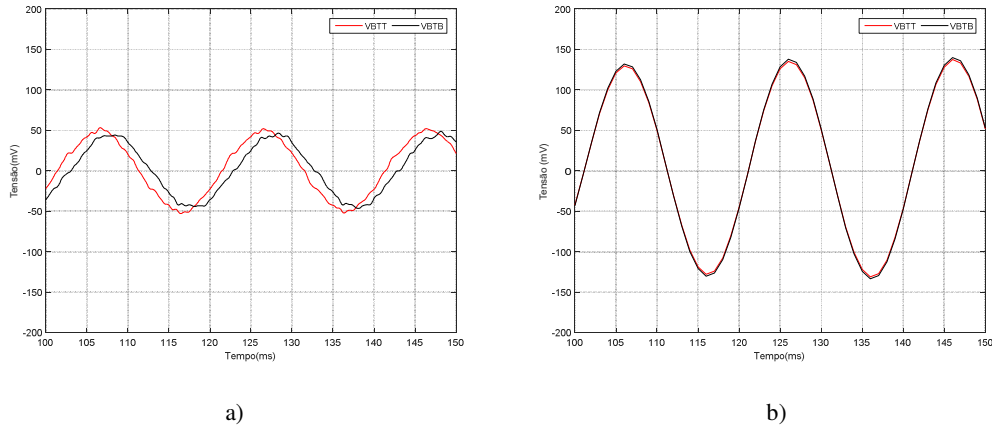


Figura 5.18-Ensaio homopolar em curto-circuito: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

5.6.2 Ensaio homopolar em Vazio

Este ensaio homopolar é semelhante ao apresentado na secção 5.3.2. As formas de onda relevantes encontram apresentadas nas figuras 5.19 e 5.20 e os correspondentes valores eficazes na tabela 5.8. As tensões induzidas apresentadas pelas bobinas de teste são significativamente menores comparativamente ao ensaio com a cuba de chapas. De facto, os resultados das bobinas de teste apresentados são bastante próximos ao apresentado na secção 4.1.

Tabela 5.7-Resultados do ensaio homopolar em vazio.

	V_{0P} (V)	I_{0P} (A)	V_{0s} (V)	Z_{0m} (Ω)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	50.57	5.03	28.08	3.13	293.98	316.52
Simulação	48.16	3.96	24.88	10.55	1130	973.50

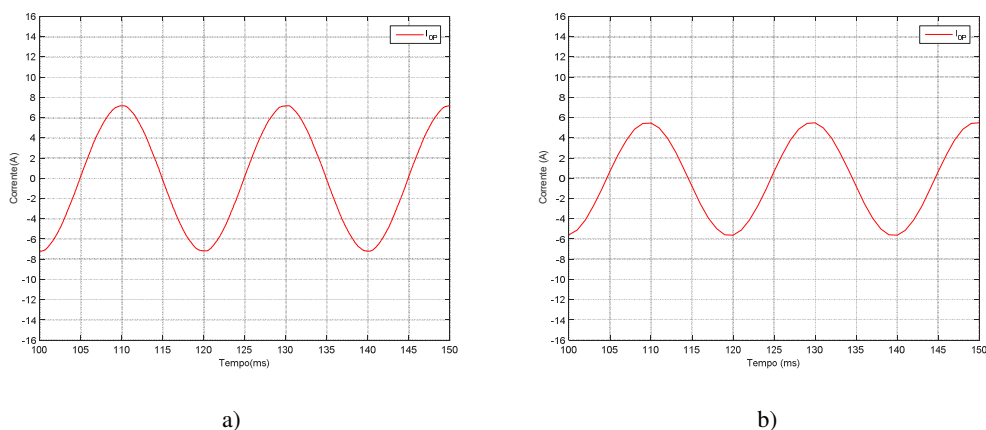


Figura 5.19-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das correntes no primário e no secundário: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

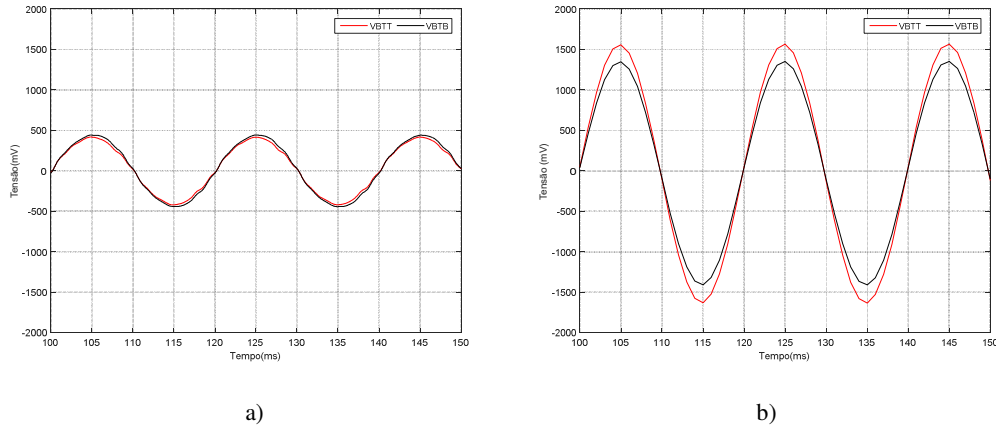


Figura 5.20-Ensaio homopolar em vazio: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: (a) resultados experimentais;(b) resultados de simulação.

5.7 Ligação YNyn0 com a cuba de 50kVA

5.7.1 YNyn0: Regime equilibrado

Para análise comparativa com os casos anteriores repetiu-se o ensaio das secções 4.2 e 5.3 com o transformador agora inserido na cuba de 50 kVA e as seguintes condições:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω , por fase;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

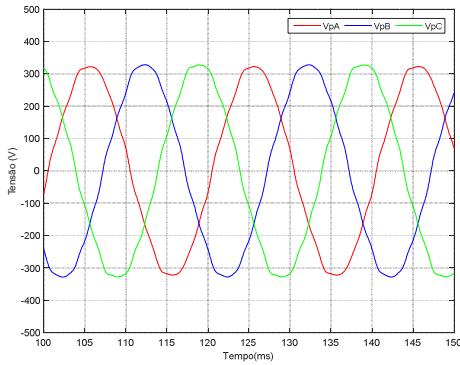
As formas de onda relevantes encontram apresentadas nas figuras 5.21 a 5.24 e os correspondentes valores eficazes nas tabelas 5.8 e 5.9. Em relação aos casos anteriores, este ensaio não apresenta diferenças significativas, correspondendo a uma situação intermédia entre a condição “sem cuba” e “com cuba de chapas”. As tensões induzidas nas bobinas de teste estão compreendidas entre os valores destas duas situações. Neste caso, a presença da cuba tem um impacto pouco significativo no fluxo homopolar.

Tabela 5.8-Valor eficaz das tensões de alimentação.

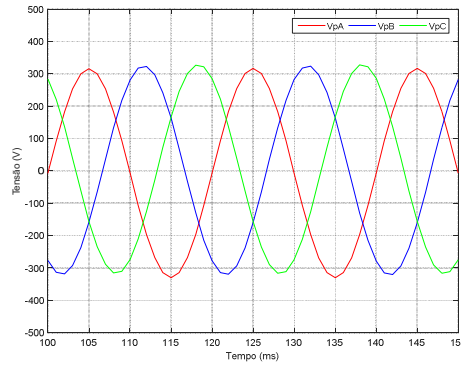
Dados	V_{PA} (V)	V_{PB} (V)	V_{PC} (V)
Experimental	229.16	233.11	233.50
Simulação	228	228	228

Tabela 5.9-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	5.00	4.89	4.67	8.32	8.71	8.25	28.3	25.7
Simulação	4.97	4.95	2.03	8.42	8.42	8.42	1.95	1.95

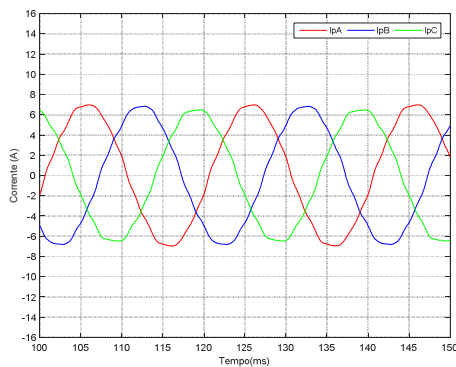


a)

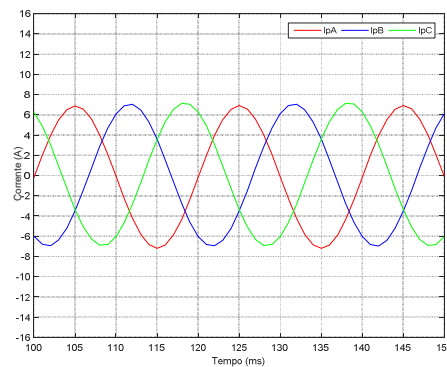


b)

Figura 5.21-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das tensões no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.

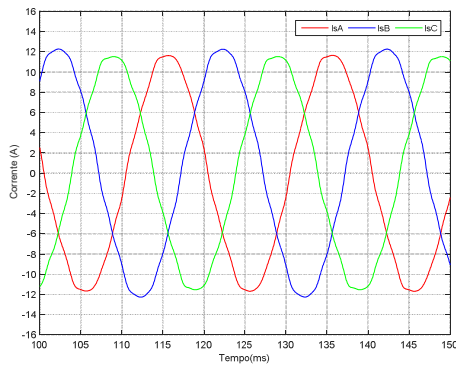


a)

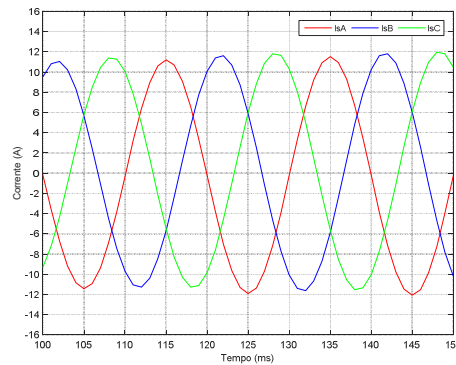


b)

Figura 5.22-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: Evolução temporal das Correntes no enrolamento primário: (a) experimental;(b) simulação.



a)



b)

Figura 5.23-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: (a) experimental;(b) simulação.

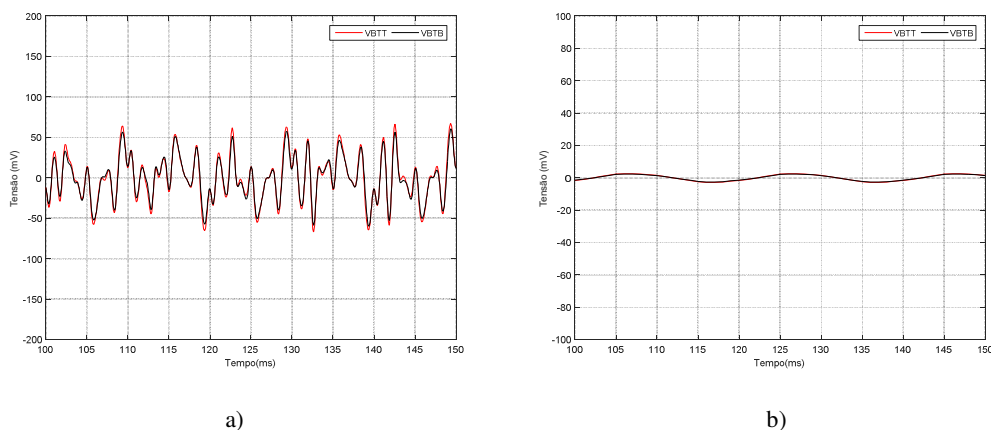


Figura 5.24-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste(a) experimental;(b) simulação.

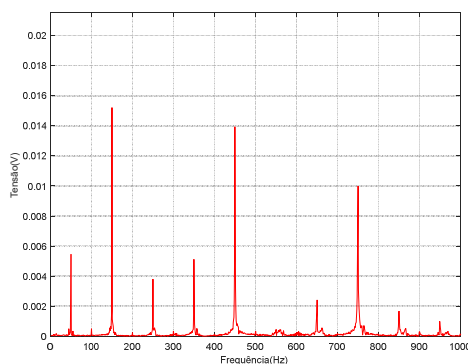


Figura 5.25-Ensaio YNyn0 em regime equilibrado: espectrograma da tensão induzida na bobina de teste superior resultado experimental.

5.7.2 YNyn0 carga desequilibrada (fase A-neutro)

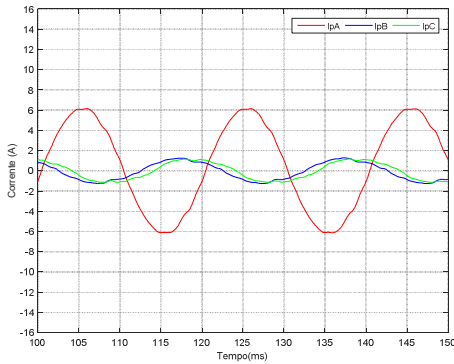
Neste ensaio analisa-se a influência da cuba no contexto de desequilíbrio da carga. As condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva desequilibrada, 16Ω , ligada entre fase A e neutro;
- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;

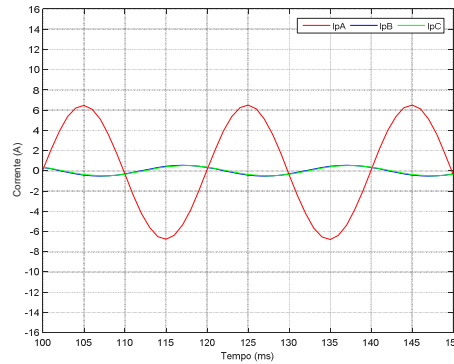
As formas de onda relevantes encontram apresentadas nas figuras 5.26 a 5.28 e os correspondentes valores eficazes na tabela 5.10. Também aqui não existem diferenças significativas, a presença da cuba tem um impacto pouco significativo no fluxo homopolar.

Tabela 5.10-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	4.41	0.85	0.84	8.09	-	-	48.70	48.81
Simulação	4.70	0.38	0.37	8.42	-	-	46.87	40.68

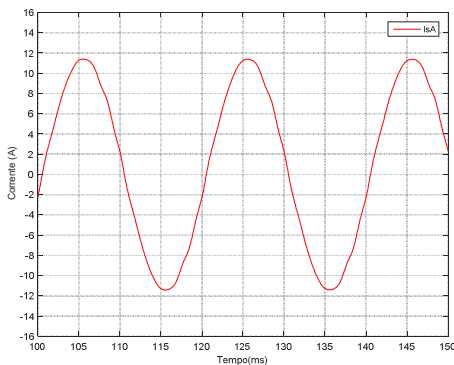


a)

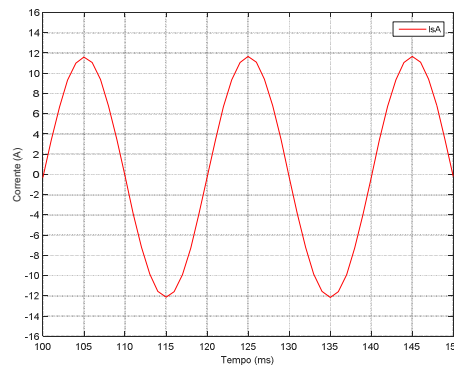


b)

Figura 5.26-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das correntes no enrolamento primário a) experimental; b) simulação.

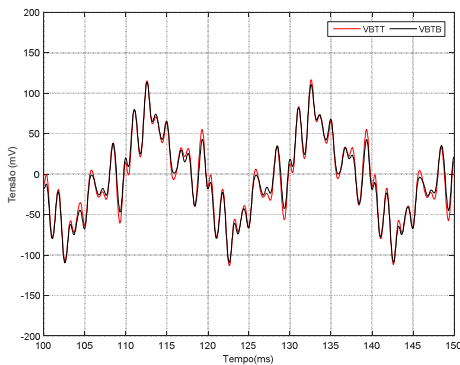


a)

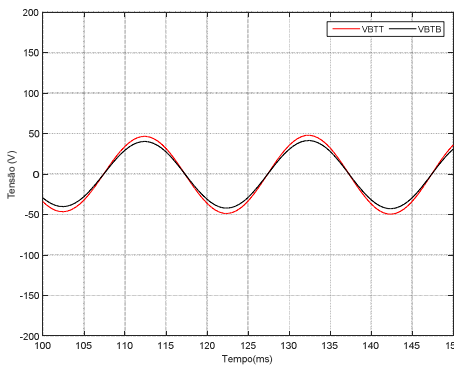


b)

Figura 5.27-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.



a)



b)

Figura 5.28-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal da corrente no enrolamento secundário: a) experimental; b) simulação.

Outros ensaios, conduzidos para diferentes ligações dos enrolamentos, regimes de carga, condições de assimetria do sistema de alimentação conduzem a conclusões similares às anteriormente referidas

6. Influência do Enrolamento Terciário

Este capítulo tem como objetivo analisar a influência do enrolamento terciário no fluxo homopolar. O transformador laboratorial só possui dois enrolamentos, não sendo possível por essa razão utilizá-lo para analisar o seu funcionamento na presença do terciário. Assim, apresentam-se apenas resultados de simulação, relativos à ligação YNyn0d, referente a um caso de desequilíbrio na carga.

A geometria do transformador de dois enrolamentos foi mantida, tendo o enrolamento terciário sido introduzido dividindo o enrolamento secundário em duas partes iguais, conforme representado na figura 6.1, considerando-se o seguinte número de espiras dos enrolamentos: $N_1 = 152$, $N_2 = 45$ e $N_3 = 45$ espiras.

O esquema elétrico é apresentado na figura 6.2.

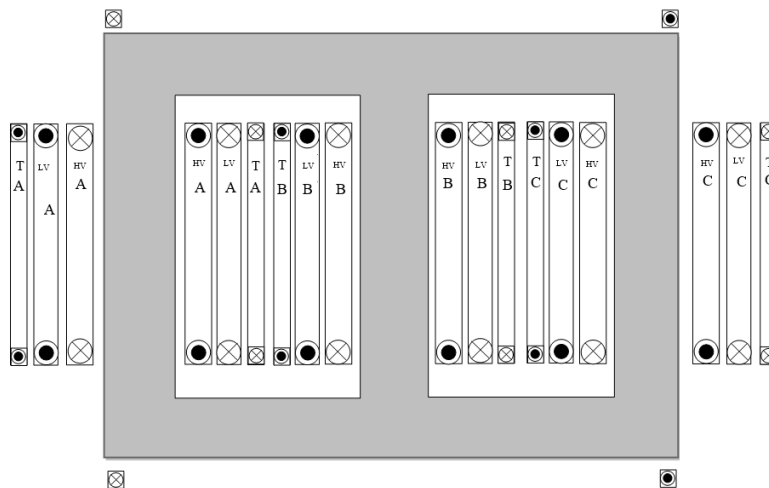


Figura 6.1-Geometria do transformador trifásico com o enrolamento terciário.

6.1 Yyn0d carga desequilibrada (fase A-neutro)

Neste caso considerou-se uma situação de carga desequilibrada, similar às apresentadas anteriormente, consistindo na ligação de uma única resistência de 8Ω , entre a fase A e o neutro do secundário. Em suma as condições deste ensaio são as seguintes.

- Ligação: **Yyn0d**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva desequilibrada, 8Ω , ligada entre fase A e neutro;

- Condição: sem defeito;
- Bobinas de teste com 9 espiras;
- Enrolamentos primário, secundário e terciário: 152, 45 e 45 espiras, respetivamente;

Para possibilitar a comparação apresentam-se os casos com e sem a presença do terciário, mantendo-se todas as outras condições de funcionamento iguais.

As formas de onda apresentadas nas figuras 6.4 a 6.6 ilustram a evolução temporal das correntes nos enrolamentos. A tabela 6.1 apresenta os respetivos valores eficazes.

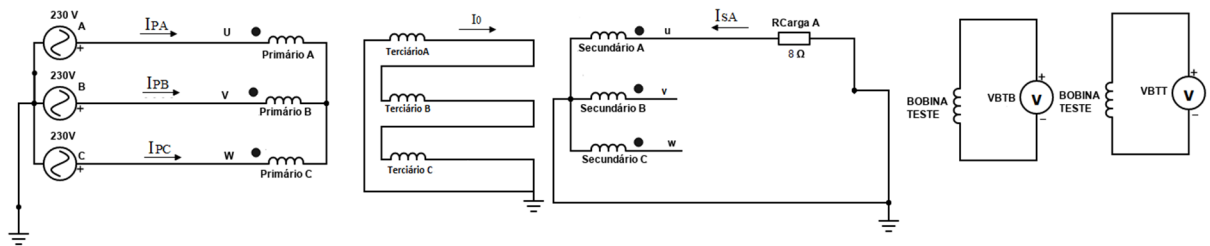
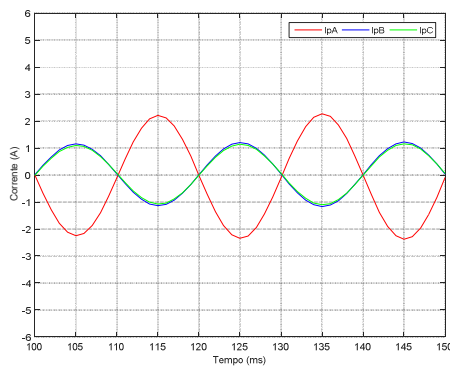


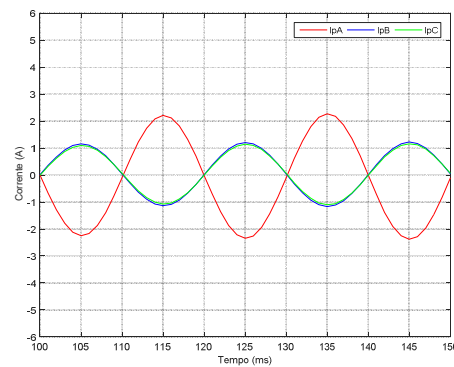
Figura 6.2-Esquema de ligação Yyn0d com carga desequilibrada.

Tabela 6.1-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	I_0 (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Simulação Sem terciário	1.48	0.76	0.72	7.53	-	-	-	39.15	39.15
Simulação - com terciário	1.48	0.76	0.72	7.52	-	-	2.26	16.96	16.91



a)



b)

Figura 6.3-Evolução temporal das correntes no enrolamento primário: a) Sem terciário; b) Com terciário.

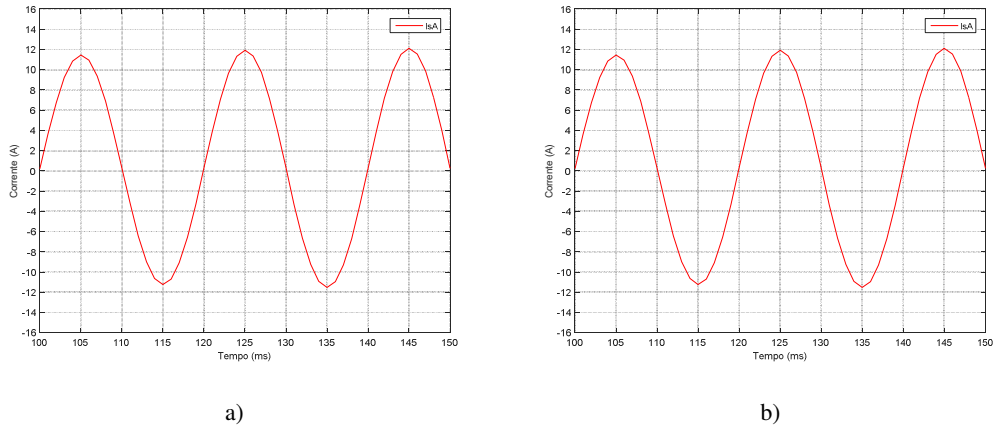


Figura 6.4-Evolução temporal das correntes no enrolamento secundário: a) Sem terciário; b) Com terciário.

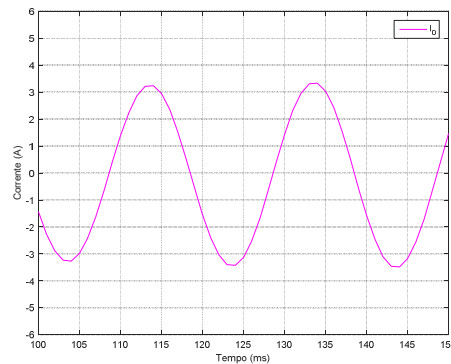


Figura 6.5-Evolução temporal das correntes no enrolamento terciário.

Nestas condições de desequilíbrio de carga, quando o terciário se encontra em circuito aberto, são criados fluxos homopolares (por coluna) que induzem uma tensão em cada um dos enrolamentos do terciário (situação idêntica à apresentada na Secção 4.3.2). Essas tensões constituem um sistema homopolar, com a mesma amplitude e defasamento nulo. Quando o triângulo do terciário é fechado o somatório dessas três tensões criará uma corrente que tende a opor-se à causa que lhe deu origem, ou seja, tenderá a anular os fluxos homopolares causados pelo desequilíbrio de carga [6]. Os fluxos homopolares resultantes terão um valor bastante reduzido, mas não serão completamente anulados, pois, se assim fosse, não existiria tensão induzida e, conseqüentemente, a corrente no terciário seria nula. Estabelece-se assim uma situação de equilíbrio entre fluxos homopolares, tensão induzida e corrente induzida.

Se, por simplicidade, desprezarmos os fluxos homopolares residuais a força magnetomotriz induzida no enrolamento terciário irá compensar completamente a força-magnetomotriz em cada coluna (ver figuras 2.11 e 2.12) [6], resultando no valor de

$I_0 \approx 33.3\%$. A tabela 6.2 apresenta uma comparação entre os valores teóricos simplificados e os valores obtidos na simulação (situação com terciário), os quais estão em boa concordância.

Tabela 6.2-Comparação entre os valores teóricos simplificados e resultados de simulação.

	Valor teórico simplificado (%)	Valor teórico simplificado (A)	Simulação (A)
I_{SA} (A)	100 %	7.52	7.52
I_{PA} (A)	66.6 %	$= 7.52 \frac{N_2}{N_1} \times 0.666 = 1.48$ A	1.48
I_{PB} (A)	33.3 %	$= 7.52 \frac{N_2}{N_1} \times 0.333 = 0.74$ A	0.76
I_{PC} (A)	33.3 %	$= 7.52 \frac{N_2}{N_1} \times 0.333 = 0.74$ A	0.72
I_0 (A)	33.3 %	$= 7.52 \frac{N_2}{N_3} \times 0.333 = 2.50$ A	2.26

A tabela 6.1 apresenta os valores eficazes das tensões induzidas nas bobinas de teste, para as situações sem e com enrolamento terciário. As formas de onda das tensões induzidas nas bobinas de teste são apresentadas na figura 6.6. Com a inclusão do enrolamento terciário no transformador verifica-se uma diminuição significativa das tensões induzidas nas bobinas de teste, cerca de 55%, em resultado da diminuição do fluxo homopolar. Esta situação sugere que a monitorização das tensões induzidas permite também detetar anomalias (por exemplo, um circuito aberto) no enrolamento terciário.

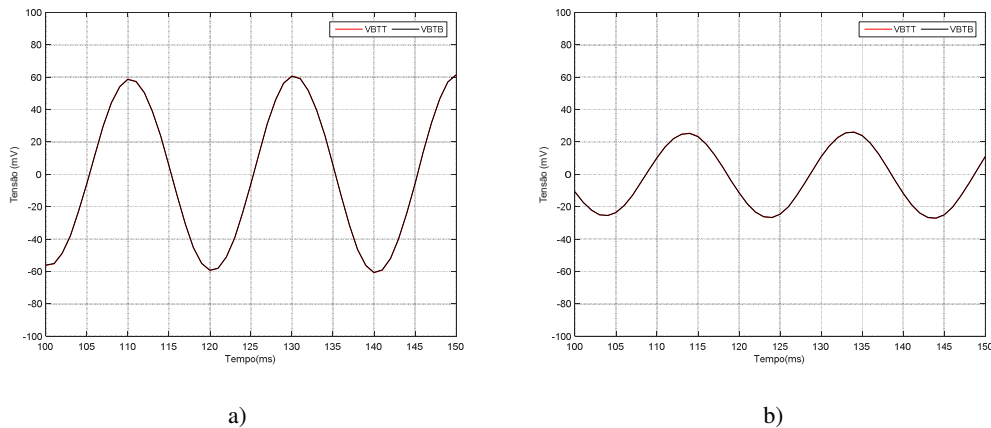


Figura 6.6-Ensaio YNyn0 com carga desequilibrada: evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste: a) Sem terciário; b) Com terciário.

7. Ocorrência de Defeitos Internos

Este capítulo tem como o objetivo analisar a distribuição do fluxo homopolar quando ocorrem defeitos internos no transformador. Nesta análise foram considerados curtos-circuitos entre espiras e deformações nos enrolamentos. A componente do trabalho apresentada neste estudo é de índole exploratória, requerendo posteriormente uma investigação mais detalhada.

O transformador usado nos ensaios experimentais apenas possibilita analisar a ocorrência de curtos-circuitos entre espiras. Assim a análise das deformações foi efetuada utilizando apenas o modelo computacional. As condições dos ensaios tiveram como base a ligação YNyn0, com o defeito a ocorrer no enrolamento primário da fase A.

A validação dos ensaios descritos neste capítulo servirá de base futura para a detecção de avarias através da análise ao fluxo homopolar.

7.1 Ocorrência de curto-circuito entre espiras

7.1.1 Curto-circuito com 2 espiras no enrolamento primário da fase A

Este ensaio pretende analisar as tensões induzidas nas bobinas de teste quando ocorre um curto-circuito entre espiras. Considerou-se neste caso que o curto-circuito afetou 2 espiras do enrolamento primário da fase A. O esquema de ligações é apresentado na figura 7.1. Ajustou-se a resistência de contacto (R_{cc}) para que a corrente que nela circula atingisse $I_{RCC} = 15 A$. Esta situação constitui um defeito incipiente de reduzida severidade, pois de facto não é ultrapassado nenhum parâmetro nominal da máquina e o número de espiras afectado é o menor possível. A localização das espiras em defeito é ilustrada na figura 7.2.

As condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω por fase;
- Condição: Curto-circuito no enrolamento primário da fase A, 2 espiras, $I_{RCC} = 15 A$
- Bobinas de teste com 9 espiras;

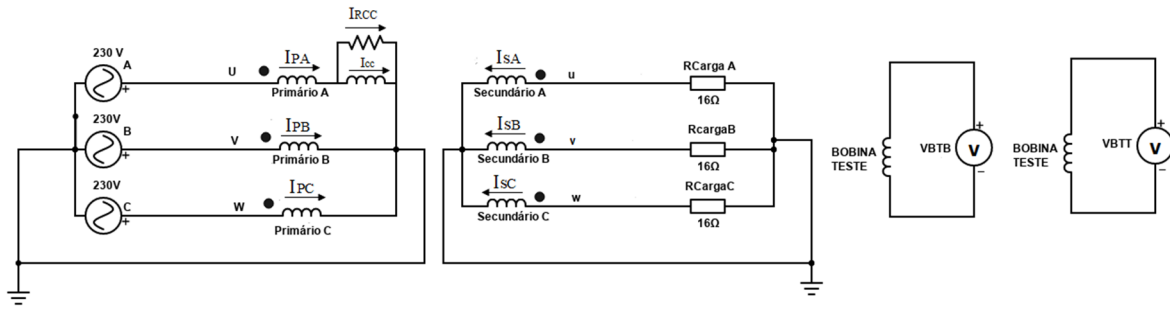


Figura 7.1- Esquema de ligação YNyn0 para estudo dos curtos-circuitos na fase A.

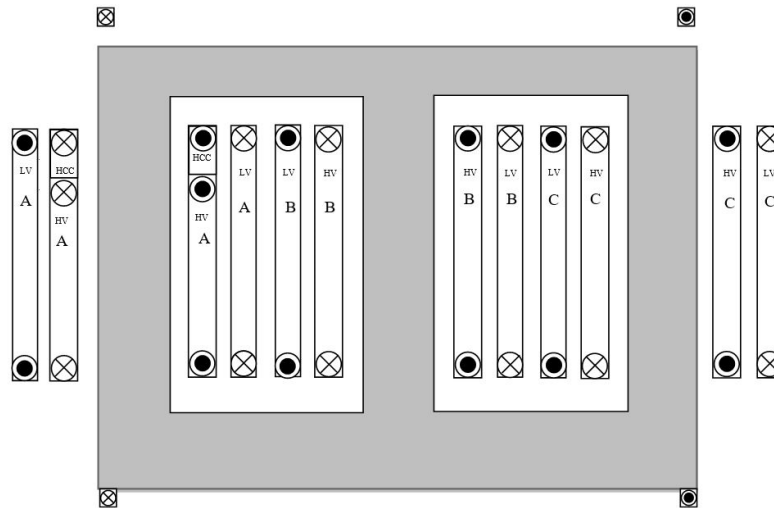


Figura 7.2-Modelo trifásico para estudo dos curtos-circuitos na fase A.

As formas de onda apresentadas nas figuras 7.3 a 7.4 ilustram a evolução temporal das correntes nos enrolamentos. A figura 7.5 apresenta as correntes associadas ao defeito. O valor eficaz das grandezas relevantes é apresentado na tabela 7.1. Neste caso, como o curto-circuito envolve um número reduzido de espiras, o aumento da amplitude da corrente no enrolamento afetado também será bastante reduzido, mesmo que a corrente nas espiras em curto-circuito seja elevada. Assim, a corrente nos enrolamentos não apresenta alterações significativas comparativamente com a condição de funcionamento normal. Os resultados de simulação estão em boa concordância com os resultados experimentais.

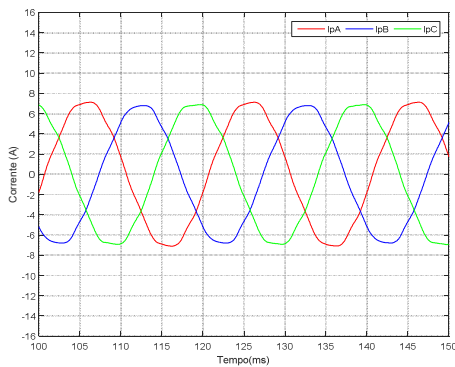
As formas de onda das tensões induzidas nas bobinas de teste são apresentadas na figura 7.6. A tabela 7.2 apresenta uma comparação do valor eficaz das tensões induzidas entre a condição com e sem defeito. À semelhança da situação sem defeito, as amplitudes dos sinais obtidos pela simulação são muito inferiores aos obtidos pelos resultados de laboratório.

Os sinais obtidos (experimental e simulação) tem valores muito semelhantes aos obtidos no ensaio em regime equilibrado sem defeito.

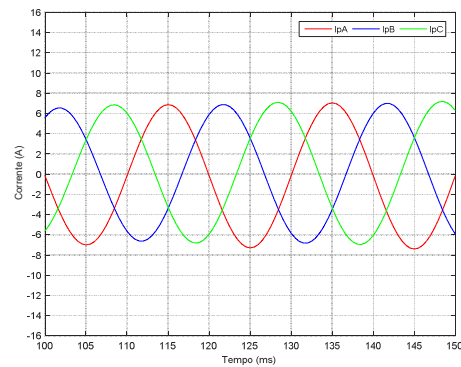
Os valores obtidos nos resultados de simulação sugerem que o defeito provoca um ligeiro aumento na amplitude das tensões induzidas e introduz um desfasamento entre v_{BTT} e v_{BTB} . No entanto, estas ligeiras alterações não são detetáveis nos resultados experimentais, devido à complexidade da distribuição de fluxos e ruído, que o modelo computacional não toma em consideração, não sendo possível de facto identificar a ocorrência do defeito.

Tabela 7.1-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{SA} (A)	I_{SB} (A)	I_{SC} (A)	I_{RCC} (A)	I_{CC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	5.14	4.90	5.03	8.03	8.11	8.24	15.05	10.00	21.60	24.60
Simulação	4.59	4.46	4.49	7.51	7.49	7.57	13.35	8.68	3.49	4.41

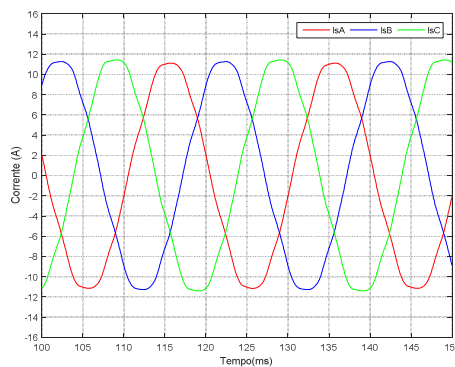


a)

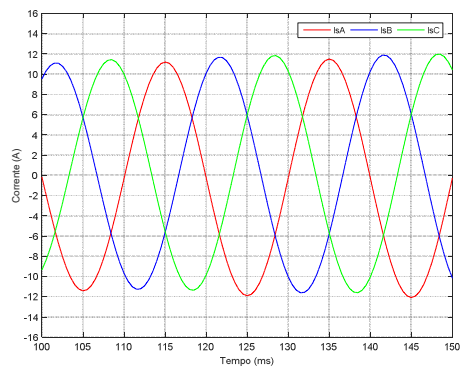


b)

Figura 7.3- Evolução temporal das correntes no enrolamento primário para o caso da ocorrência de 2 espiras em curto-circuito na fase A do primário do transformador: (a) experimental;(b) simulação; (Ligação YNyn0, carga resistiva equilibrada 16 Ω).



a)



b)

Figura 7.4-Ensaio YNyn0 em: evolução temporal das correntes no enrolamento secundário (mesmas condições da figura 7.3): (a) experimental;(b) simulação.

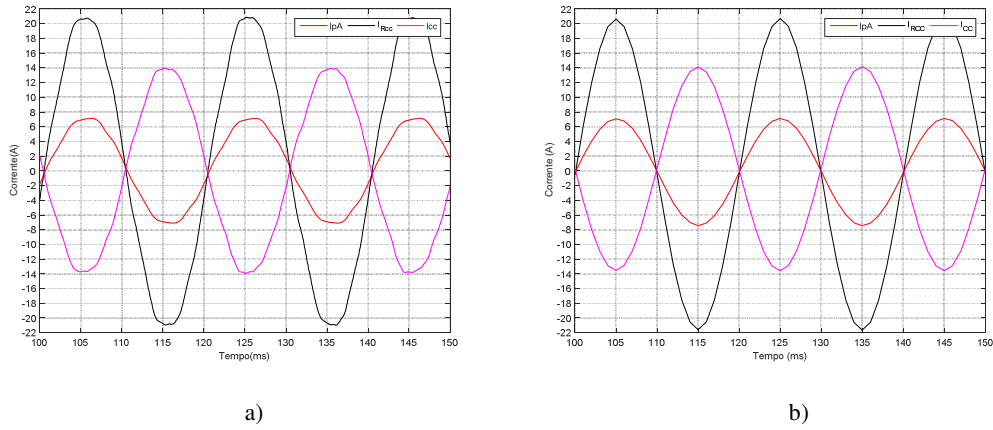


Figura 7.5- Evolução temporal das correntes associadas ao defeito (mesmas condições da figura 7.3): (a) experimental;(b) simulação.

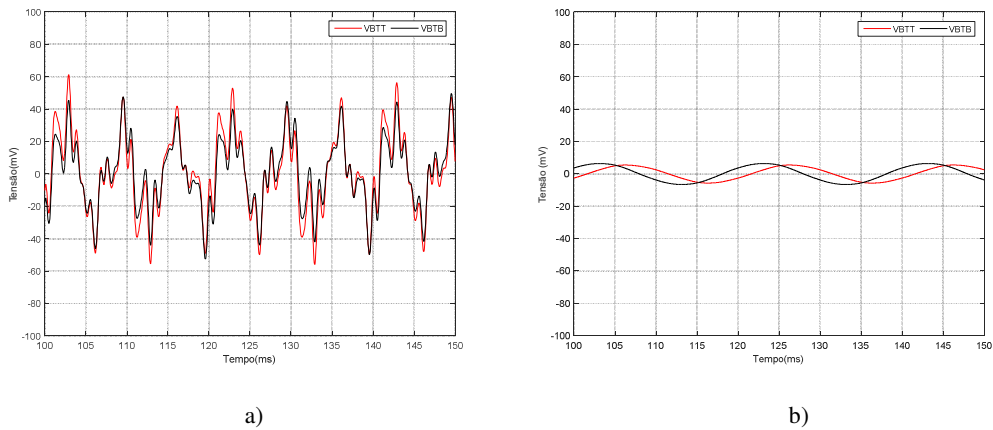


Figura 7.6-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (mesmas condições da figura 7.3) a) experimental;(b) simulação.

Tabela 7.2-Comparação do valor eficaz das tensões nas bobinas de teste com e sem defeito.

	Sem defeito		Com defeito			
			2 espiras em curto-circuito		74 espiras em curto-circuito	
	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)	V_{BTB} (mV)	V_{BTB} (mV)	V_{BTB} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	24.50	21.06	21.60	24.60	56.30	62.50
Simulação	2,56	2,56	3.49	4.41	43.39	40.15

7.1.2 Curto-circuito com 74 espiras no enrolamento primário da fase A

Neste ensaio analisa-se o caso onde ocorre um curto-circuito em 74 espiras no enrolamento primário da fase A. Neste caso já é afetada uma parcela significativa do enrolamento, sendo um defeito de muito maior severidade que o caso anterior. As condições do ensaio são as seguintes:

- Ligação: **YNyn0**;
- Alimentação: simétrica, $V_{LL}=400V$;
- Carga: resistiva equilibrada, 16Ω por fase;
- Condição: Curto-circuito no enrolamento primário da fase A, 74 espiras, $I_{RCC} = 15 A$
- Bobinas de teste com 9 espiras;

As figuras 7.7 a 7.9 apresenta a evolução temporal das correntes. O valor eficaz das grandezas relevantes é apresentado na tabela 7.3. A maior severidade do defeito provoca um aumento significativo da amplitude da corrente no enrolamento afetado. Devido à limitação da corrente na resistência de contacto ($I_{RCC}=15 A$), a corrente nas espiras afetadas (I_{CC}) é menor do que a corrente de entrada do enrolamento afetado, figura 7.9, levando a um desequilíbrio de correntes no enrolamento primário.

Também neste caso a corrente nos enrolamentos secundários não sofre alterações significativas com a introdução do defeito, figura 7.8, estando os resultados de simulação e experimentais em relativa concordância.

Tabela 7.3-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	I_{RCC} (A)	I_{CC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Experimental	11.02	4.69	5.78	7.84	8.22	8.15	14.85	2.31	56.30	62.50
Simulação	10.87	3.96	4.96	7.46	7.50	7.57	13.12	2.36	43.39	40.15

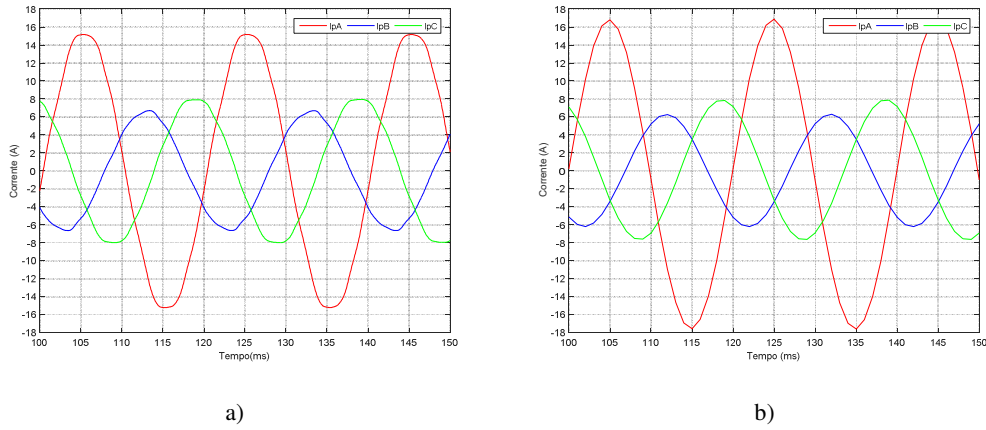


Figura 7.7-Evolução temporal das correntes no enrolamento primário para o caso da ocorrência de 74 espiras em curto-circuito na fase A do primário do transformador: (a) experimental;(b) simulação; (Ligação YNyn0, carga resistiva equilibrada 16 Ω).

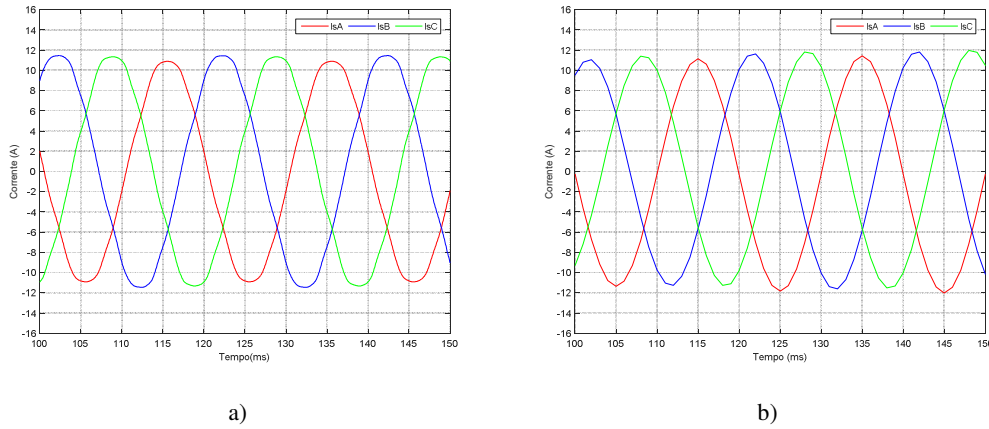


Figura 7.8-Evolução temporal das correntes no enrolamento secundário (mesmas condições da figura 7.7): (a) experimental;(b) simulação.

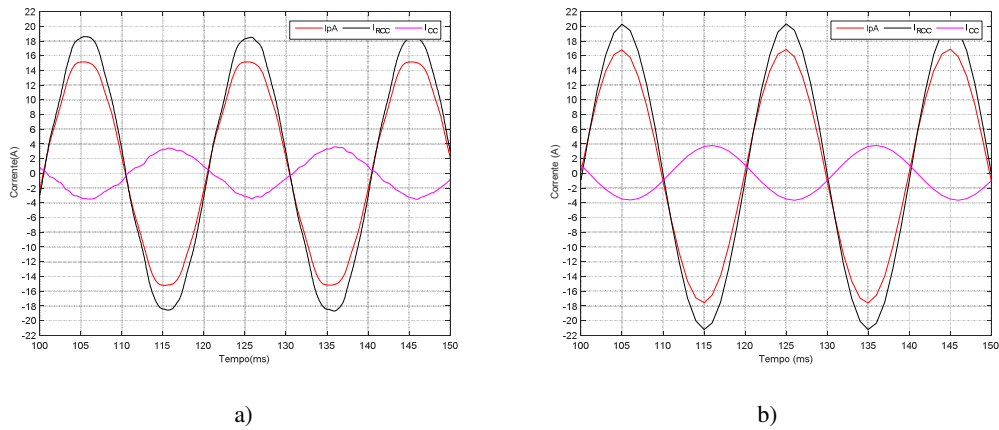


Figura 7.9-Evolução temporal das correntes ao enrolamento afetado (mesmas condições da figura 7.7): (a) experimental;(b) simulação.

O desequilíbrio de correntes no enrolamento primário (tabela 7.2) provoca uma alteração significativa da distribuição de fluxos, resultando no aumento significativo do fluxo homopolar, que se reflete nas tensões induzidas nas bobinas de teste, figura. 7.10 e tabela 7.3. A tabela 7.2 apresenta uma comparação do valor eficaz das tensões induzidas entre a condição com e sem defeito. Para este nível de severidade do defeito as tensões induzidas nas bobinas permitem claramente detetar o curto-circuito nas espiras do transformador.

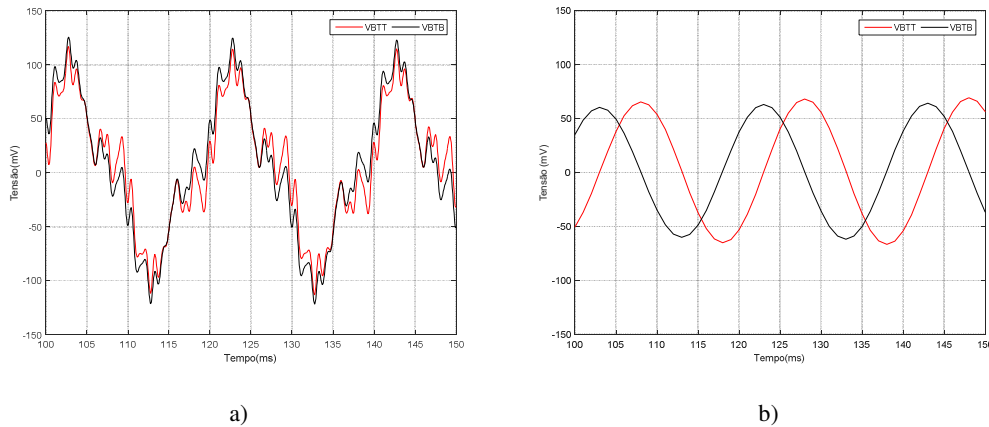


Figura 7.10- Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste (mesmas condições da figura 7.7): (a) experimental;(b) simulação.

7.1.3 Curto-circuito entre espiras: análise para outros níveis de severidade do defeito

O transformador utilizado no laboratório só permite realizar ensaios com 2 e 74 espiras em curto-circuito. Utilizando o modelo computacional foram analisados diversos outros casos, com diferentes percentagens de espiras afetadas pelo defeito. O valor da resistência de curto-circuito (R_{cc}), foi calculada de forma que a corrente nas espiras em defeito, seja o dobro da corrente nominal no enrolamento ($I_{cc}=2I_n$). A tabela 7.4 apresenta o valor da resistência de curto-circuito para as diversas situações analisadas.

Tabela 7.4-Valor da resistência de curto-circuito para a condição de $I_{cc}=2I_n$.

Espiras	R_{cc} (Ω)
1%-2 espiras	0,201
5%-8 espiras	0,807
10%-15 espiras	1,51
15%-23 espiras	2,30
20%-30 espiras	3,02
48%-74 espiras	7.48

A figura 7.11 ilustra a evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para diversos níveis de severidade do defeito. A tabela 7.5 apresenta os correspondentes valores eficazes. Verifica-se que as tensões induzidas são afetadas pelo defeito: na bobina superior, que está mais próxima do defeito, o sinal de tensão tem uma variação não monótona. O curto-circuito interno provoca no local de ocorrência uma componente radial do fluxo magnético, que não se fecha (total ou parcialmente) pela bobina de teste.

Adicionalmente esta componente radial pode não ser corretamente tomada em consideração pela análise FEM 2D. As razões expostas poderão resultar na variação oscilante de v_{BTT} em função do número de espiras afetado. O defeito já não afeta localmente a bobina inferior, verificando-se aqui um crescimento monótono da amplitude da tensão induzida. Verifica-se ainda que existe um desfasamento entre da tensão nas duas bobinas, cuja origem e comportamento não se conseguem facilmente justificar neste estudo exploratório.

Tabela 7.5-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.

Resultados de simulação	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Normal	2,56	2,56
Curto-Circuito 5%	2.54	2.49
Curto-Circuito 10%	5.20	4.49
Curto-Circuito 15%	1.02	9.77
Curto-Circuito 20%	5.14	14.23

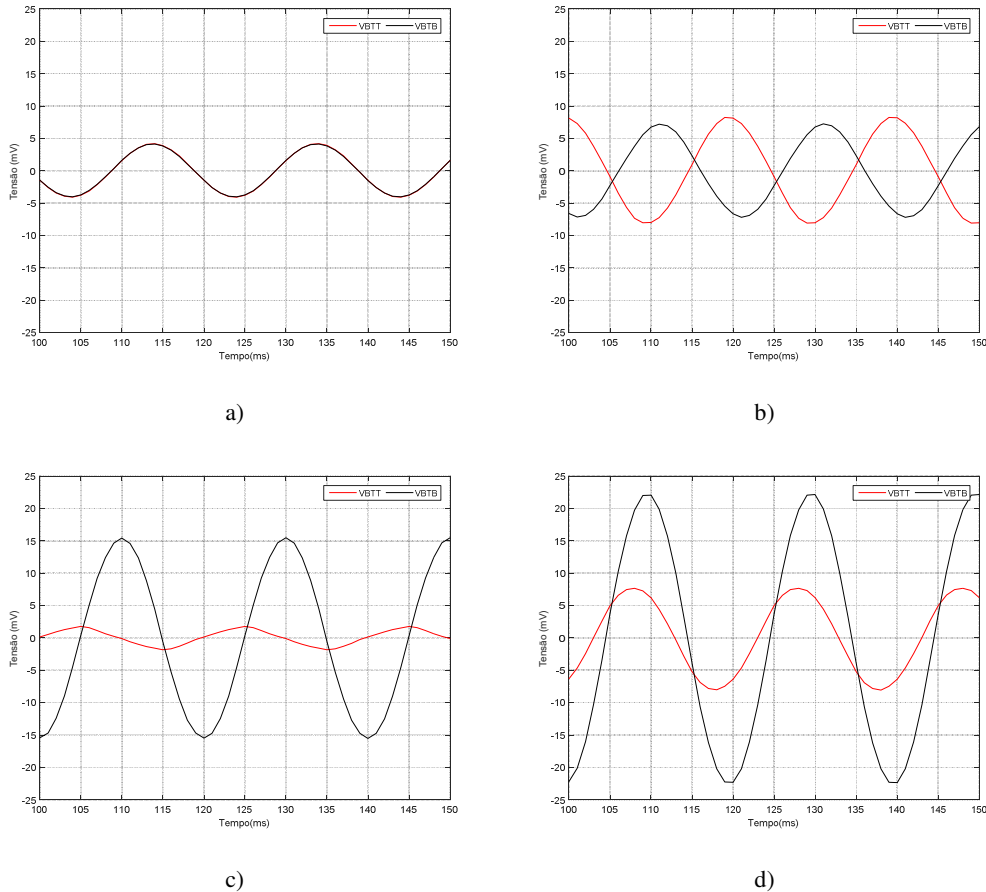


Figura 7.11-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de curto-circuito entre espiras (simulação):(a) 5%;(b) 10%;(c) 15%;(d) 20%.

7.2 Deformação nos Enrolamentos

As deformações nos enrolamentos são uma das razões que podem levar ao transformador ficar fora de serviço. A causa destas deformações podem ter origem em pequenos defeitos internos na estrutura de suporte dos enrolamentos que alteram a geometria do transformador, ou a esforços eletrodinâmicos, causados por curto-circuitos externos ou sobrecargas. Estas situações podem provocar o deslocamento dos enrolamentos, no sentido radial e/ou axial, o qual altera substancialmente a distribuição de fluxo e poderá causar contacto direto entre as partes ativas do transformador.

O transformador usado nos ensaios experimentais não permite introduzir deformações geométricas nos enrolamentos, pelo que esta análise foi efetuada utilizando apenas o modelo computacional.

Este caso pretende estudar o comportamento do fluxo homopolar perante uma contração vertical (axial) no enrolamento primário da fase A. A geometria do modelo encontra-se apresentada na figura 7.12.

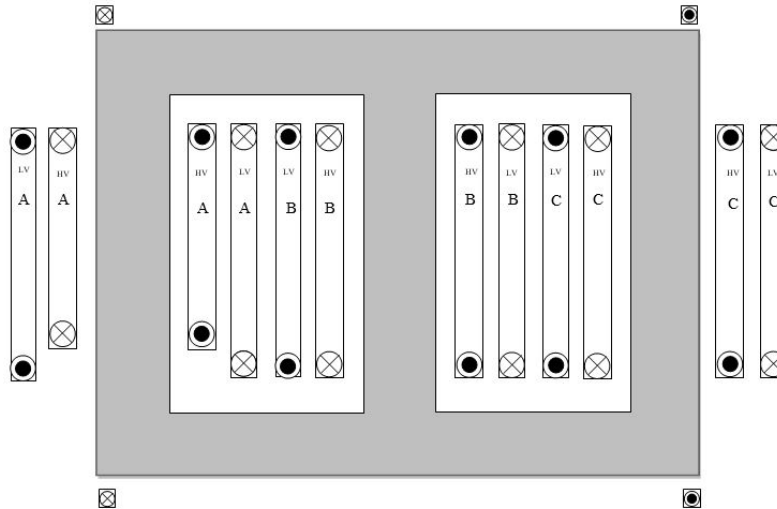


Figura 7.12-Modelo trifásico para estudo da deformação ao enrolamento interior da fase A.

Para analisar o defeito, considerou-se a ligação YNyn0 apresentada anteriormente na secção 4.2 (figura 4.10), com alimentação e carga equilibradas, e com uma contração axial no enrolamento primário (interior) da fase A de 2% do total da altura do enrolamento. Na tabela 7.6 apresentam-se os valores eficazes das grandezas relevantes. As formas de ondas apresentadas nas figuras 7.13 e 7.14 ilustram a evolução temporal das correntes nos enrolamentos.

Tabela 7.6-Valor eficaz das correntes nos enrolamentos e tensões nas bobinas de teste para o caso de uma deformação no enrolamento em 2%.

Dados	I_{PA} (A)	I_{PB} (A)	I_{PC} (A)	I_{sA} (A)	I_{sB} (A)	I_{sC} (A)	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Simulação	4.93	4.97	5.04	8.41	8.41	8.41	3.15	3.15

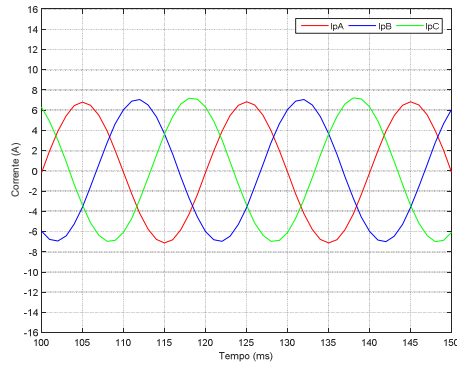


Figura 7.13- Evolução temporal das correntes no enrolamento primário para o caso de deformação da espira.

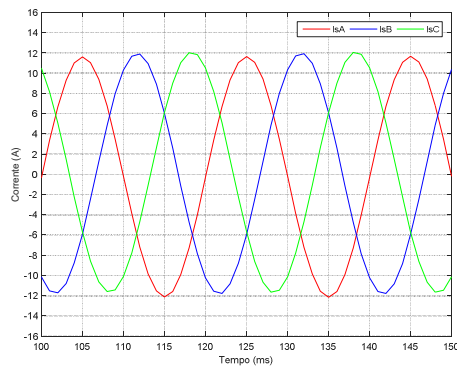


Figura 7.14- Evolução temporal das correntes no enrolamento Secundário para o caso de deformação da espira.

A tabela 7.7 e figuras 7.15 a 7.17 apresentam os resultados obtidos nas tensões induzidas nas bobinas de teste para diversos níveis de severidade da deformação. As tensões induzidas na bobina de teste inferior (que se encontra mais próxima da deformação, figura 7.12) não apresentam diferenças significativas para os vários níveis de severidade de defeito (tabela 7.7 e figuras 7.15 a 7.17). Pelo contrário, na bobina de teste superior a amplitude das tensões induzidas aumenta com o nível da severidade do defeito. Os resultados obtidos sugerem que o método de diagnóstico é sensível à deformação dos enrolamentos.

Tabela 7.7-Valor eficaz das tensões induzidas das bobinas de teste.

Resultados de simulação	V_{BTT} (mV)	V_{BTB} (mV)
Normal	2,56	2,56
Contração da espira em 2%	3.15	3.15
Contração da espira em 4%	4.17	3.19
Contração da espira em 6%	9.89	2.38

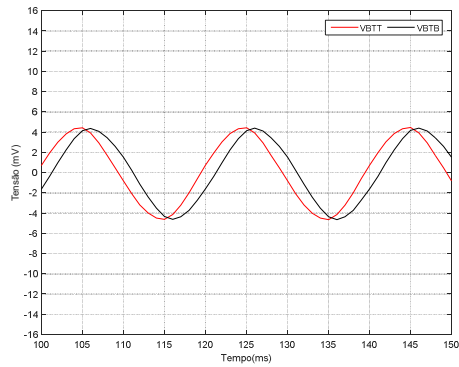


Figura 7.15-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de deformação no enrolamento em 2% (Contração).

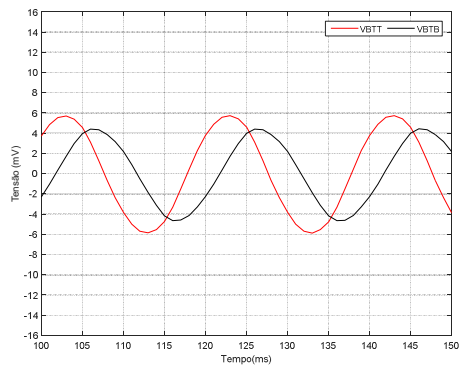


Figura 7.16-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de deformação no enrolamento em 4% (Contração).

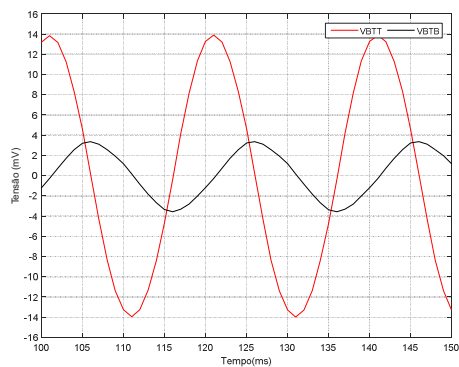


Figura 7.17-Evolução temporal das tensões induzidas nas bobinas de teste para o caso de deformação no enrolamento em 6% (Contração).

8. Conclusões

O objetivo deste trabalho consiste em analisar a viabilidade da utilização da tensão induzida em bobinas de teste para análise do fluxo homopolar em transformadores trifásicos. A distribuição do fluxo homopolar é afetada quando ocorre um defeito, podendo o método servir para identificar anomalias no transformador.

As bobinas de teste foram colocadas nas faces externas das culassas inferior e exterior do núcleo ferromagnético, permitindo caracterizar a distribuição de fluxo homopolar para diversas condições de funcionamento.

Foram realizados diversos ensaios experimentais e simulações computacionais cujos resultados permitem caracterizar a distribuição do fluxo homopolar e analisar a viabilidade da utilização das bobinas de teste para a sua medição. Nos casos de estudo apresentados são consideradas diversas condições de funcionamento, onde se incluem diferentes tipos de ligação dos enrolamentos, desequilíbrios de carga, assimetrias da tensão de alimentação, presença da cuba e do enrolamento terciário e ocorrência de deformações e defeitos de isolamento nos enrolamentos.

O modelo computacional desenvolvido é baseado em elementos finitos 2D. Apesar de constituir normalmente um bom compromisso entre a exatidão e complexidade, verifica-se que a análise bidimensional não é a mais adequada para analisar a distribuição do fluxo homopolar, que possui características intrinsecamente 3D. Assim, uma conclusão importante a retirar é que uma análise detalhada destes fenómenos requer a utilização de um modelo computacional FEM 3D.

Da análise dos resultados obtidos é possível concluir que a monitorização do fluxo homopolar permite efetuar a deteção de defeitos internos, mas o método de diagnóstico poderá não ser suficientemente sensível para identificar avarias com reduzido nível de severidade. Será assim importante analisar no futuro o comportamento do método de diagnóstico em função da severidade da avaria e para outras condições das anomalias, nomeadamente no que se refere à localização dos defeitos de isolamento e ao tipo de deformação dos enrolamentos. Neste contexto sugere-se ainda a reformulação das bobinas de teste, para, por exemplo, possibilitar a captação dos fluxos homopolares radiais.

Referências Bibliográficas

- [1] C. Cabral, J. Gonçalves, “Máquinas Eléctricas I”, Universidade do Algarve, 1997.
- [2] A. Martignoli, Transformadores, São Paulo Brasil: Globo, 1969.
- [3] L. W. Matsch, “Capacitors, Magnetic Circuits, and Transformers”, Prentice-Hall, 1964.
- [4] Jiadaí Liu, V. Din avahi, “Detailed Magnetic Equivalent Circuit Based Real-Time Nonlinear Power Transformer Model on FPGA for Electromagnetic Transient Studies”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 2, pp. 1191-1201, February 2016.
- [5] M. V. Guedes, Corrente Alternada-sistema polifásicos assimétricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [6] E. Ras, Transformador de Potência de medida e de protecção, Almedina, 1977.
- [7] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde: "Transformer engineering: design and practice", Marcel Dekker, New York, 2004.
- [8] A. J. M. Cardoso and L. M. R. Oliveira: "Power Transformers Fault Diagnostics by Park's Vector Approach" - Chapter in Transformers: Analysis, Design and Measurement, Xose M. López-Fernández, H. Bülent Ertan and Janusz Turowski, CRC Press, Boca Raton, 2012. H. B. E. a. J. T. A. J. M. Cardoso and L. M. R. Oliveira Xose M. López-Fernández, "Power Transformers Fault Diagnostics by Park's Vector Approach", em CRC Press, Boca Raton, 2012.
- [9] S. C. Athikessavan, E. Jeyasankar, S. S. Manohar and S. K. Panda, "Inter-Turn Fault Detection of Dry-Type Transformers Using Core-Leakage Fluxes," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, no. 4, pp. 1230-1241, Aug. 2019.
- [10] J. P. A. Rodrigues: "Detecção de deformações nos enrolamentos de transformadores através da análise do fluxo de fugas - Análise FEM", Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve, 2018.
- [11] M. Mostafaei, J. Faiz, P.A. Venikar, M. S. Ballal01, "Turn-to-turn fault monitoring methods in electrical power transformers—State of the art," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 28, no. 12, pp. e2644, December 2012.
- [12] L. M. R. Oliveira, “Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Protecção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos”, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.
- [13] Blume, L. F., Boyajian, A., Camilli, G., Lennox, T. C., Minneci, S., and Montsinger, V. M. Transformer engineering, John Wiley and Sons, New York, and Chapman and Hall, London, 1951.
- [14] Ake Carlson, Jitka Fuhr, Gottfried Schemel, Franz Wegscheider: “Testing of Power Transformers - Routine tests, Type tests and Special tests”, ABB Business Area Power Transformers, 2003