

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**GIANCARLO DE SOUZA**

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM CONVERSOR  
ELETROMAGNÉTICO DE 3 PARA 5 FASES**

Porto Alegre  
2016

**GIANCARLO DE SOUZA**

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM CONVERSOR  
ELETROMAGNÉTICO DE 3 PARA 5 FASES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Alberto Pereira  
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner

Porto Alegre  
2016

GIANCARLO DE SOUZA

## **DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM CONVERSOR ELETROMAGNÉTICO DE 3 PARA 5 FASES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Luís Alberto Pereira, UFRGS

Doutor pela Universität Kaiserslautern – Alemanha

Co-orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University Of Wales College Of Cardiff – Cardiff, Gales

Prof. Dr. César Cataldo Scharlau, UFSC

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano, UFRGS

Doutor pela Universidade Politécnica de Madri – Madri, Espanha

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre, agosto de 2016.

Dedico este trabalho a minha linda esposa Nadia,  
por seu grande incentivo em todos os momentos e pela  
sua admiração ao trabalho desenvolvido no curso de  
mestrado.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelas oportunidades que surgiram para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, que sempre se dedicaram para que eu pudesse estudar.

Aos meus sogros, que me incentivaram a investir em minha formação acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade da realização de estudos dentro da área de pesquisa de transformadores.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Ao CNPq pelo imprescindível apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado (processo 130064/2015/7).

A empresa Schneider Electric do Brasil (Blumenau-SC), em especial ao Eng. Fernando Bernardes, pela parceria na fabricação do transformador.

## RESUMO

A dissertação aborda o desenvolvimento e testes de um conversor eletromagnético de 3 para 5 fases, sendo inicialmente avaliadas configurações conhecidas usando vários tipos de ligações. Foi desenvolvido um modelo baseado em resistências e indutâncias próprias e mútuas, para as quais caminhos de fluxo magnético através do núcleo de aço silício e também através do ar em torno dos enrolamentos foram considerados. Com base no modelo desenvolvido e nos resultados das simulações realizadas com o modelo, na sequência, foi projetado e construído um protótipo. O projeto levou em conta aspectos como equilíbrio de tensão nos secundários sob carga, aproveitamento do material dos enrolamentos e do núcleo, assim como a facilidade de conexão dos enrolamentos. Para as simulações do modelo utilizou-se o software Micro-Cap, tendo sido avaliado o equilíbrio nas tensões de saída do conversor sob carga equilibrada e desequilibrada, além de avaliar seu comportamento diante de falhas (abertura) de uma das fases da carga dos secundários. Os resultados das simulações foram comparados com os ensaios realizados no protótipo utilizando cargas resistivas e também um motor de indução pentafásico, tendo sido observada uma boa concordância entre ambos. Para as cargas resistivas utilizadas nos ensaios, as tensões ficaram muito próximas da simulação, mantendo as tensões nos secundários dentro de níveis aceitáveis de desequilíbrio. Contudo, na operação sob falha em uma das fases da carga, o nível de desequilíbrio de tensão apresentou-se acima do aceitável. Já para o motor de indução pentafásico utilizado nos ensaios, as tensões nos secundários apresentaram níveis aceitáveis de desequilíbrio, mesmo na operação sob falha em uma das fases da carga e independente da conexão dos enrolamentos primários. Finalmente, a indução no núcleo do conversor foi avaliada, sendo que em todos os ensaios e simulações, os valores máximos nas colunas do transformador não ultrapassaram os limites projetados, mostrando que não houve efeitos significativos de saturação e assim mantendo níveis aceitáveis de perdas no ferro.

**Palavras-chave:** transformador pentafásico, conversor eletromagnético de fases, equilíbrio de tensão sob carga.

## ABSTRACT

This work addresses the development and test of an electromagnetic converter which can convert a three-phase system into a five-phase system. Initially, known configurations are evaluated which use several different types of connections. A prototype was designed and built considering aspects such as (1) voltage balanced under load on the secondary side, (2) utilization of the conductor and core material, and (3) difficulty to connect the windings. In order to evaluate the performance of the converter, a model was developed which is based on resistances, self inductance, and mutual inductances; for the determination of these inductances, the flux paths through the yokes and also through the air space surrounding the windings have been considered, besides the iron characteristic. The model was implemented using the software Micro-Cap, being assessed the voltage balance on the secondary side under balanced and also unbalanced load; in addition, the performance was evaluated under the occurrence of a fault on the secondary side (loss of one phase). The results obtained through simulations were compared with practical results measured on the prototype connected to a resistive load and also to a five-phase induction machine, being a good agreement between both results observed. For the resistive loads used during the tests, the voltages were very close to the predicted values, being the output voltages within an acceptable level of unbalance. However, for the operation under fault in one phase, the secondary voltages showed not acceptable unbalance. For the operation of the induction machine, the secondary voltages showed acceptable unbalance, even for the operation under fault and for all types of connection on the primary side. Finally, the induction in the magnetic yokes of the converter was investigated; in all tests and simulations, the maximal values in the magnetic parts did not surpass the design limits, ensuring that no significant saturation effects took place and thus keeping the magnetic losses within acceptable limits.

**Keywords:** five-phase transformer, electromagnetic phase converter, high-phase electromagnetic device, voltage balance under load.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Construção dos enrolamentos primários e secundários sobre as $k$ colunas .....	19
Figura 2 – Conexões dos enrolamentos para o transformador do tipo S .....	20
Figura 3 – Conexões dos enrolamentos para o transformador do tipo L .....	20
Figura 4 – Conexões dos enrolamentos para o transformador do tipo G .....	21
Figura 5 – Circuito equivalente em T de um transformador trifásico convencional .....	23
Figura 6 – Transformador trifásico comum, com ligação Yz-1 .....	26
Figura 7 – Transformador trifásico com ligação Yz com defasagem de $40^\circ$ .....	27
Figura 8 – Arranjo entre os enrolamentos primários dos dois transformadores .....	29
Figura 9 – Diagrama fasorial dos enrolamentos secundários dos 2 transformadores monofásicos .....	30
Figura 10 – Diagrama fasorial dos enrolamentos secundários conectados em zig-zag .....	31
Figura 11 – Conexão dos enrolamentos secundários conectados em zig-zag .....	32
Figura 12 – Diagrama fasorial modificado dos secundários conectados em zig-zag .....	34
Figura 13 – Conexão modificada dos enrolamentos dos secundários conectados em zig-zag .....	34
Figura 14 – Diagrama fasorial dos secundários do modelo L-Dz5c .....	37
Figura 15 – Tipos de conexões disponíveis para o primário do protótipo .....	38
Figura 16 – Desenho esquemático da distribuição de espiras do enrolamento primário .....	40
Figura 17 – Desenho das bobinas em corte identificando os enrolamentos do transformador .....	41
Figura 18 – Foto do protótipo fabricado .....	43
Figura 19 – Área considerada do fluxo disperso para corrente em um dos enrolamentos do primário .....	44
Figura 20 – Área considerada do fluxo disperso para corrente em um dos enrolamentos do secundário .....	44
Figura 21 – Linhas de campo para o fluxo magnético pelo núcleo e pelo ar .....	45
Figura 22 – Modelo para cálculo dos fluxos para corrente nos enrolamentos da coluna B .....	46
Figura 23 – Circuito do modelo montado no software Micro-cap .....	51
Figura 24 – Visualização da transposição dos enrolamentos B3 e C3 e de B5 e C5 .....	67
Figura 25 – Transformador com as conexões adequadas para a realização dos testes .....	68
Figura 26 – Corrente de excitação do transformador .....	69
Figura 27 – Harmônicas na corrente de excitação nas fases A, B e C .....	69
Figura 28 – Perdas ativa, reativa e aparente do conversor em curto-circuito .....	70
Figura 29 – Bancos de resistências utilizados para os ensaios sob carga .....	71
Figura 30 – Corrente no primário em zig-zag com carga resistiva .....	79
Figura 31 – Tensão e corrente no secundário 1 com carga resistiva e primário em zig-zag .....	80
Figura 32 – Tensão e corrente no secundário 2 com carga resistiva e primário em zig-zag .....	80
Figura 33 – Tensão e corrente no secundário 3 com carga resistiva e primário em zig-zag .....	81
Figura 34 – Tensão e corrente no secundário 4 com carga resistiva e primário em zig-zag .....	81
Figura 35 – Tensão e corrente no secundário 5 com carga resistiva e primário em zig-zag .....	82
Figura 36 – Corrente no primário em zig-zag com carga resistiva com abertura da fase 5 .....	82
Figura 37 – Tensão e corrente no secundário 1 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	83



Figura 38 – Tensão e corrente no secundário 2 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	83
Figura 39 – Tensão e corrente no secundário 3 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	84
Figura 40 – Tensão e corrente no secundário 4 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	84
Figura 41 – Placa do motor pentafásico .....	86
Figura 42 – Motor pentafásico com os terminais de conexão .....	86
Figura 43 – Corrente no primário em delta com motor a vazio .....	90
Figura 44 – Corrente no primário em estrela com motor a vazio.....	90
Figura 45 – Corrente no primário em zig-zag com motor a vazio .....	90
Figura 46 – Tensão e corrente no secundário 1 com motor a vazio e primário em zig-zag.....	91
Figura 47 – Tensão e corrente no secundário 2 com motor a vazio e primário em zig-zag.....	91
Figura 48 – Tensão e corrente no secundário 3 com motor a vazio e primário em zig-zag.....	92
Figura 49 – Tensão e corrente no secundário 4 com motor a vazio e primário em zig-zag.....	92
Figura 50 – Tensão e corrente no secundário 5 com motor a vazio e primário em zig-zag.....	93
Figura 51 – Corrente no primário em delta com motor a vazio com abertura da fase 5 .....	94
Figura 52 – Corrente no primário em estrela com motor a vazio com abertura da fase 5.....	94
Figura 53 – Corrente no primário em zig-zag com motor a vazio com abertura da fase 5 .....	94
Figura 54 – Tensão e corrente no secundário 1 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	95
Figura 55 – Tensão e corrente no secundário 2 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	95
Figura 56 – Tensão e corrente no secundário 3 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	96
Figura 57 – Tensão e corrente no secundário 4 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5) .....	96
Figura 58 – Motor pentafásico acoplado ao gerador de corrente contínua utilizado nos testes	98
Figura 59 – Corrente no primário em delta com motor sob carga.....	102
Figura 60 – Corrente no primário em estrela com motor sob carga .....	102
Figura 61 – Corrente no primário em zig-zag com motor sob carga.....	102
Figura 62 – Harmônicas no primário A em zig-zag (sem neutro da rede) - motor sob carga	103
Figura 63 – Harmônicas no primário B em zig-zag (sem neutro da rede) - motor sob carga	103
Figura 64 – Harmônicas no primário C em zig-zag (sem neutro da rede) - motor sob carga	104
Figura 65 – Tensão no primário em delta com motor sob carga com abertura da fase 5 .....	105
Figura 66 – Tensão no primário em estrela com motor sob carga com abertura da fase 5 ...	105
Figura 67 – Tensão no primário em zig-zag com motor sob carga com abertura da fase 5 ...	106
Figura 68 – Tensão e corrente no secundário 1 com motor sob carga e primário em zig-zag	106
Figura 69 – Tensão e corrente no secundário 2 com motor sob carga e primário em zig-zag	107
Figura 70 – Tensão e corrente no secundário 3 com motor sob carga e primário em zig-zag	107
Figura 71 – Tensão e corrente no secundário 4 com motor sob carga e primário em zig-zag	108
Figura 72 – Tensão e corrente no secundário 5 com motor sob carga e primário em zig-zag	108
Figura 73 – Harmônicas no secundário 1 com motor sob carga e primário em zig-zag .....	109
Figura 74 – Harmônicas no secundário 2 com motor sob carga e primário em zig-zag .....	109
Figura 75 – Harmônicas no secundário 3 com motor sob carga e primário em zig-zag .....	109
Figura 76 – Harmônicas no secundário 4 com motor sob carga e primário em zig-zag .....	110
Figura 77 – Harmônicas no secundário 5 com motor sob carga e primário em zig-zag .....	110
Figura 78 – Harmônicas no secundário 1 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5).....	111

Figura 79 – Harmônicas no secundário 2 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5).....	111
Figura 80 – Harmônicas no secundário 3 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5).....	111
Figura 81 – Harmônicas no secundário 4 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5).....	112
Figura 82 – Conjunto de cargas para os testes com potência nominal .....	114
Figura 83 – Tensão e corrente no secundário 1 com carga nominal e primário em delta .....	115
Figura 84 – Tensão e corrente no secundário 2 com carga nominal e primário em delta .....	115
Figura 85 – Tensão e corrente no secundário 3 com carga nominal e primário em delta .....	116
Figura 86 – Tensão e corrente no secundário 4 com carga nominal e primário em delta .....	116
Figura 87 – Tensão e corrente no secundário 5 com carga nominal e primário em delta .....	117
Figura 88 – Harmônicas no secundário 1 com carga nominal e primário em delta .....	117
Figura 89 – Harmônicas no secundário 2 com carga nominal e primário em delta .....	118
Figura 90 – Harmônicas no secundário 3 com carga nominal e primário em delta .....	118
Figura 91 – Harmônicas no secundário 4 com carga nominal e primário em delta .....	118
Figura 92 – Harmônicas no secundário 5 com carga nominal e primário em delta .....	119
Figura 93 – Corrente no primário em delta com carga nominal.....	120
Figura 94 – Harmônicas no primário nas fases A, B e C com primário em delta e com carga nominal .....	120
Figura 95 – Tensão no primário em delta com carga nominal .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos modelos quanto ao equilíbrio de tensão e corrente.....	22
Tabela 2 – Relação de espiras do secundário conectado em zig-zag .....	42
Tabela 3 – Indutâncias próprias, de dispersão e resistências ôhmicas calculadas.....	49
Tabela 4 – Acoplamentos magnéticos entre cada um dos enrolamentos .....	50
Tabela 5 – Tensão e corrente para carga equilibrada .....	52
Tabela 6 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga equilibrada.....	54
Tabela 7 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga equilibrada	55
Tabela 8 – Tensão e corrente para carga desequilibrada .....	55
Tabela 9 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga desequilibrada.....	56
Tabela 10 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga desequilibrada .....	57
Tabela 11 – Valores máximos calculados da indução nas 3 colunas com carga equilibrada...	58
Tabela 12 – Valores máximos calculados da indução nas 3 colunas com carga desequilibrada .....	58
Tabela 13 – Tensão e corrente para carga equilibrada sem o neutro.....	59
Tabela 14 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga equilibrada sem o neutro ..	60
Tabela 15 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga equilibrada sem o neutro.....	61
Tabela 16 – Tensão e corrente para carga desequilibrada sem o neutro .....	61
Tabela 17 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga desequilibrada sem o neutro .....	62
Tabela 18 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga desequilibrada sem o neutro .....	63
Tabela 19 – Desvio de relação de tensão dos secundários a vazio.....	66
Tabela 20 – Desvio entre o valor da resistência dos enrolamentos medida x calculada .....	66
Tabela 21 – Tensão e corrente dos ensaios x simulação com carga resistiva .....	71
Tabela 22 – Tensão e corrente dos ensaios x simulação com carga resistiva sem o neutro....	72
Tabela 23 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios x simulação com carga resistiva .....	73
Tabela 24 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios x simulação com carga resistiva sem o neutro .....	75
Tabela 25 – Correntes primárias no transformador para falha de uma fase do secundário nos ensaios x simulação com carga resistiva .....	76
Tabela 26 – Tensão e corrente dos ensaios com carga resistiva para as 3 ligações do primário .....	77
Tabela 27 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios com carga resistiva sem o neutro .....	78
Tabela 28 – Distorção harmônica de corrente do primário nos ensaios com carga resistiva...	79
Tabela 29 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com carga resistiva sem o neutro .....	85
Tabela 30 – Tensão e corrente dos ensaios com motor a vazio para as 3 ligações do primário .....	87

Tabela 31 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios com motor a vazio .....	88
Tabela 32 – Distorção harmônica de corrente do primário nos ensaios com o motor a vazio .	89
Tabela 33 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com motor a vazio.....	97
Tabela 34 – Tensão e corrente dos ensaios com motor sob carga para as 3 ligações do primário.....	98
Tabela 35 – Percentual de corrente para falha nas fases nos ensaios com motor sob carga ....	99
Tabela 36 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios com motor sob carga.....	100
Tabela 37 – Distorção harmônica de corrente do primário nos ensaios com o motor sob carga .....	101
Tabela 38 – Distorção harmônica de tensão do primário nos ensaios com o motor sob carga .....	104
Tabela 39 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com motor sob carga.....	113
Tabela 40 – Tensão e corrente dos secundários nos ensaios com carga nominal .....	114
Tabela 41 – Corrente dos secundários na frequência fundamental e múltiplas.....	119
Tabela 42 – Corrente dos primários na frequência fundamental e múltiplas .....	121
Tabela 43 – Distorção harmônica de tensão do primário nos ensaios com carga nominal ....	121
Tabela 44 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com carga nominal .....	122

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

NEMA: National Electrical Manufacturers Association

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	RESULTADOS ESPERADOS	16
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
<b>2</b>	<b>VISÃO GERAL DAS TOPOLOGIAS DE CONVERSORES</b>	<b>26</b>
2.1	TOPOLOGIAS EXISTENTES PARA CONVERSÃO DE 3 PARA 5 FASES	26
2.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS	36
<b>3</b>	<b>PROJETO E MODELO DO CONVERSOR ELETROMAGNÉTICO</b>	<b>37</b>
3.1	PROJETO DO CONVERSOR DE 3 PARA 5 FASES	37
3.1	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO CONVERSOR	43
3.2	CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS E RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS	45
3.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MODELO	51
<b>4</b>	<b>COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL</b>	<b>65</b>
4.1	AValiação DOS VALORES NOMINAIS DO PROTÓTIPO	65
4.2	ENSAIOS DO CONVERSOR ALIMENTANDO CARGA RESISTIVA	70
4.3	ENSAIOS DO CONVERSOR ALIMENTANDO MOTOR A VAZIO	86
4.4	ENSAIOS DO CONVERSOR ALIMENTANDO MOTOR COM CARGA	97
4.5	ENSAIOS DO CONVERSOR COM CARGA NOMINAL	113
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS</b>	<b>123</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	124
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>126</b>
	<b>APÊNDICE</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXO</b>	<b>136</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação apresenta o projeto, a análise e os testes de um dispositivo eletromagnético que converte 3 fases de um sistema trifásico convencional em 5 fases. Sendo o mesmo conectado à carga diversa, preocupa-se com o equilíbrio de tensão e corrente e, principalmente, na sua funcionalidade durante a ocorrência de uma falta na carga alimentada. Também é analisado o comportamento da indução magnética nas diversas partes diante dos diversos modos de operação. A fim de comprovar experimentalmente os resultados obtidos nas simulações, foi desenvolvido e fabricado um protótipo que foi submetido a testes de laboratório.

O dispositivo abordado neste estudo é ainda pouco utilizado na indústria em geral, pois modifica o número de fases adotado para o sistema de transmissão e de distribuição da maioria dos países. Trata-se de um conversor eletromagnético de fases, que consiste basicamente de uma estrutura semelhante a um transformador convencional, porém apresenta em sua construção um maior número de enrolamentos e de conexões específicas, que possibilitam criar uma defasagem angular variada. A finalidade do mesmo, além de alterar os níveis de tensão e corrente, como em um transformador convencional, é de gerar um número de fases em seu secundário diferente do número de fases de seu primário, possibilitando criar sistemas multifásicos, ou seja, sistemas com mais de 3 fases.

A grande motivação em desenvolver o estudo deste dispositivo (um transformador com mais de 3 fases) está atrelada à falta de estudos aprofundados do comportamento deste tipo de dispositivo frente à falha de uma das fases da carga, seja em relação à corrente e tensão nos enrolamentos ou até mesmo à indução no núcleo.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é desenvolver um dispositivo que possibilite a conversão de fases, que tem como propósito básico viabilizar o funcionamento de outros sistemas com mais de 3 fases, como por exemplo, a alimentação de máquinas pentafásicas. Sendo assim, o objetivo principal desta dissertação é o estudo e desenvolvimento de um conversor eletromagnético de 3 para 5 fases, sendo seu primário conectado ao sistema trifásico convencional e seu secundário composto por 5 fases. O dispositivo será conectado à cargas distintas, com o intuito de avaliar seu comportamento quanto ao equilíbrio de tensão e

corrente nos terminais primários e secundários, assim como analisar a indução magnética no núcleo. Abaixo são detalhados os objetivos deste trabalho:

- estudo e definição de uma configuração para o conversor eletromagnético que possibilite o equilíbrio de tensão e corrente sob carga;
- projeto e construção de um protótipo do conversor;
- determinação de um circuito equivalente para o conversor eletromagnético, a fim de avaliar seu comportamento através de simulações computacionais;
- testes do protótipo alimentando carga equilibrada, com a finalidade de avaliar o equilíbrio de tensão e corrente nos enrolamentos primário e secundário e comparar com os resultados das simulações do modelo;
- testes do protótipo alimentando carga desequilibrada, com a finalidade de avaliar o equilíbrio de tensão e corrente nos enrolamentos primário e secundário e comparar com os resultados das simulações do modelo;
- testes do protótipo alimentando carga equilibrada, e na presença de falha de uma das fases da carga, avaliar o equilíbrio de tensão e corrente nos enrolamentos primário e secundário e comparar com os resultados das simulações do modelo. Este tipo de estudo ainda não foi realizado, apesar da importância;
- testes do protótipo alimentando carga desequilibrada, e na presença de falha de uma das fases da carga, avaliar o equilíbrio de tensão e corrente nos enrolamentos primário e secundário e comparar com os resultados das simulações do modelo;
- avaliar o comportamento do protótipo, comparando-o com um transformador trifásico convencional, quando ambos alimentam uma carga que sofre uma falha em uma de suas fases, comparando o desequilíbrio de tensão e de corrente, assim como a indução magnética do núcleo.



## 1.2 RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados esperados deste trabalho são detalhados abaixo:

- obter um conversor apto a operar com equilíbrio de tensão e corrente quando alimentando cargas distintas, balanceadas ou não;
- obter um conversor apto a operar com equilíbrio de tensão e corrente quando ocorrer a falta (abertura) em uma das fases da carga;
- determinação do comportamento da indução magnética nas 3 colunas do transformador quando o mesmo alimentar cargas distintas, balanceadas ou não;
- determinação do comportamento da indução magnética nas 3 colunas do transformador quando ocorrer a falta em uma das fases da carga.

## 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas multifásicos, ou seja, sistemas que possuem mais de 3 fases, são estudados há várias décadas. Alguns exemplos a citar são os sistemas de transmissão de energia elétrica através de linhas com múltiplas fases (6, 12, 18, 24), assim como acionamentos de máquinas elétricas com mais de 3 fases.

O conceito de transporte de energia através de linhas de transmissão multifásicas surgiu por volta de 1972, quando foram apresentados cálculos de densidade de potência para o sistema de linhas de transmissão (BARNES e BARTHOLD, 1973). A partir desse ponto, pode-se avaliar a curva de carga do sistema trifásico convencional e compará-la com cada um dos sistemas propostos, com 6, 12 e até 24 fases, assim como comparar os parâmetros das linhas (resistência, indutância, capacitância e condutância) a fim de analisar as faltas e a estabilidade em cada sistema. Devido à crescente importância ambiental global, que exigem rigorosos licenciamentos, aliada ao alto custo das terras para a instalação das torres e dos corredores de passagem das linhas de transmissão, estudos relacionados à transmissão multifásica surgiram. Um exemplo são as linhas de transmissão com 6 fases, que podem transportar a mesma quantidade de energia elétrica da rede convencional trifásica utilizando torres mais compactas, possuir tensões entre fases adjacentes inferiores, além de auxiliar na redução dos campos magnéticos (IQBAL et al., 2010; TIWARI et al., 1992). As linhas multifásicas possuem uma melhor estabilidade de tensão, especialmente durante o

carregamento pesado, além de requisitar uma menor potência reativa, quando comparadas as linhas trifásicas convencionais (TIWARI et al., 1992). Apesar das vantagens dessas linhas com mais de 3 fases, atualmente não são largamente utilizadas, visto que todos os demais equipamentos conectados à mesma teriam que ser compatíveis com o sistema, implicando uma drástica modificação do padrão global adotado há décadas.

Tradicionalmente, a energia elétrica é gerada a partir de geradores trifásicos. Contudo, estudos revelam que máquinas com 5 fases podem oferecer um melhor desempenho para inúmeras aplicações que exigem maior confiabilidade, pois apresentam uma redução na ondulação do torque, melhora a densidade do torque, assim como melhora a tolerância diante de falhas. O emprego desses sistemas multifásicos em máquinas melhora o aproveitamento do material ativo (enrolamento e núcleo) e, por possuírem mais do que 3 fases, são inerentemente tolerantes a falhas, mesmo considerando um menor desempenho sob carga (MOHAMMAD e FLETCHER, 2010; PARSA, 2005). Por oferecerem maior confiabilidade, estes sistemas são hoje utilizados em aplicações para a propulsão elétrica de navios, tração de locomotivas, veículos híbridos e elétricos, aeronaves elétricas e de equipamentos de alta potência utilizados na indústria (LEVI, 2008).

Uma vez que normalmente apenas a rede trifásica está disponível, existe a necessidade de desenvolver um sistema de transformação estática de fases para obter o fornecimento de múltiplas fases (IQBAL et al., 2010), caso se deseje acionar equipamentos, que possuam mais de 3 fases, diretamente da rede. Por exemplo, quando se necessita testar máquinas multifásicas a fim de avaliar o desempenho das mesmas, uma alimentação senoidal pura é exigida (KRAUSE, 1986).

O primeiro registro da transformação de fases deu-se por volta de 1894, quando S. P. Thompson descreveu o comportamento do fluxo alternado em um transformador através de dois conjuntos diferentes de enrolamentos ou através de um enrolamento com dois conjuntos de derivações (PARTON, 1952). Também em 1894, C. F. Scott descreveu sua histórica conexão com 2 transformadores monofásicos com fluxo alternado, que foi utilizado para ligar os alternadores de 2 fases com as linhas de transmissão de 3 fases (SCOTT, 1894 apud PARTON, 1952). No ano seguinte, em 1895, M. Leblanc, utilizando um esquema diferente, envolvendo apenas um transformador de 3 colunas, apresentou uma semelhante solução entre os alternadores de 2 fases e as linhas de transmissão de 3 fases (GARRETT, 1940 apud PARTON, 1952). Estes sistemas ainda são utilizados hoje em dia, por exemplo, quando uma

carga monofásica ou bifásica não pode ser conectada diretamente na rede trifásica por exceder o desequilíbrio das correntes determinado pelas concessionárias de energia. Desde então, sistemas de transformação de fases baseados nesses modelos vêm sendo estudados e propostos.

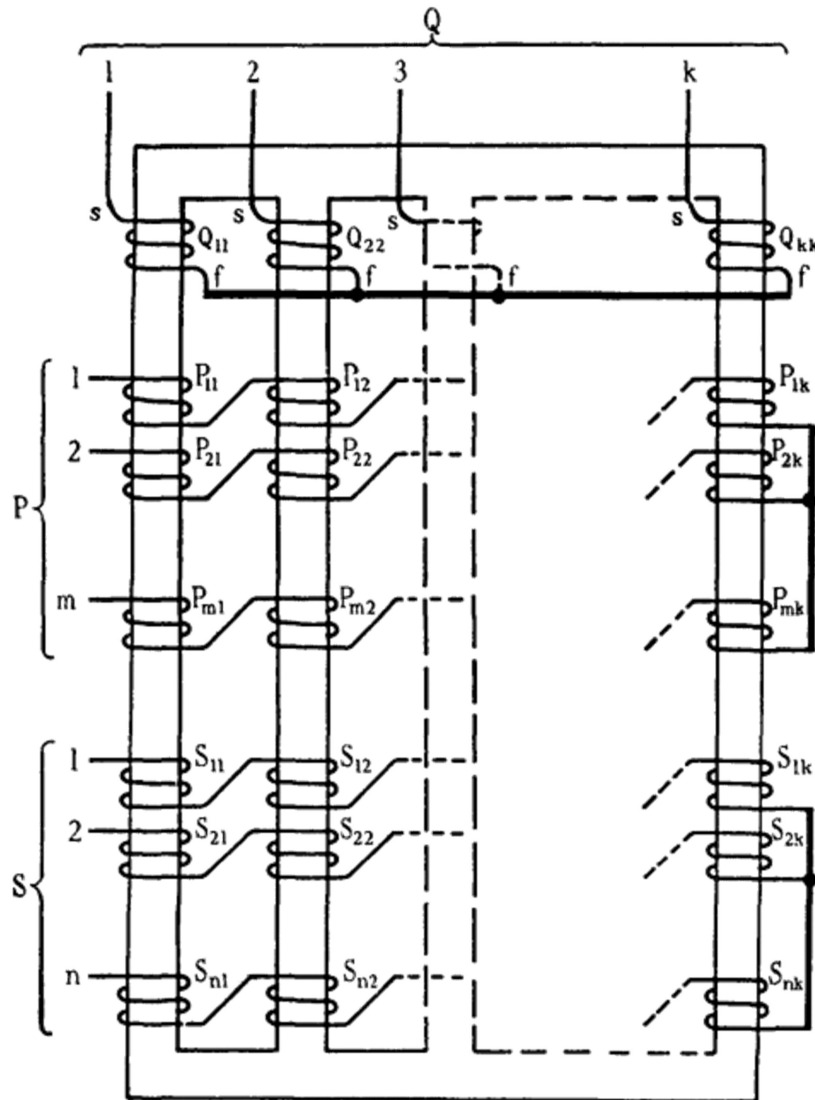
A transformação de fases é realizada normalmente por meio de equipamentos estáticos (transformadores), mesmo sendo possível efetuar tais mudanças com um equipamento rotativo, como por exemplo, um motor síncrono de 3 fases acionando um alternador de 2 fases. Esta ideia de um sistema passivo de conversão multifases, através do uso de transformadores, tem origem nos anos 50, onde a teoria geral da transformação de  $m$  fases para  $n$  fases foi apresentada (PARTON, 1952; PARTON e CHANT, 1971).

A teoria geral de conversão de fases, estabelecida por (PARTON, 1952), supõe o uso de um transformador com fluxo alternado para obter de uma saída de  $n$  fases equilibrada com uma entrada de  $m$  fases equilibrada, e que o transformador tenha uma quantidade  $k$  de colunas, sendo  $n$  e  $m$  e  $k$  números inteiros. Cada fase é constituída de uma ligação série entre os enrolamentos posicionados em cada coluna  $k$ . A Fig. 1 ilustra a construção dos enrolamentos primários (P) e secundários (S) dispostos nas  $k$  colunas do transformador. Os dois índices das letras mostradas na Fig. 1, correspondem, respectivamente, à quantidade de enrolamentos e à coluna ao qual o mesmo está posicionado. Os enrolamentos indicados pela letra Q, com início identificado pela letra s e o final pela letra f, simbolizam os enrolamentos convencionais de transformadores, que possuem balanceamento, onde ocorre a igualdade descrita pela Equação 1.

$$Q_{11} = Q_{22} = Q_{33} \dots = Q_{kk} \quad (1)$$

O problema geral consiste em encontrar o valor para o número de espiras de cada enrolamento do conjunto P e S, que possam constituir um sistema de  $n$  fases e  $m$  fases balanceado. Para que as tensões e as correntes sejam equilibradas, deve ser considerada a força eletromotriz e a força magnetomotriz gerada pelos conjuntos dos enrolamentos primário e secundário (PARTON, 1952). Conforme Parton e Chant (1971), também são importantes que os efeitos de sequência-zero não sejam transferidos entre os circuitos do primário para o secundário e vice-versa.

Figura 1 – Construção dos enrolamentos primários e secundários sobre as  $k$  colunas

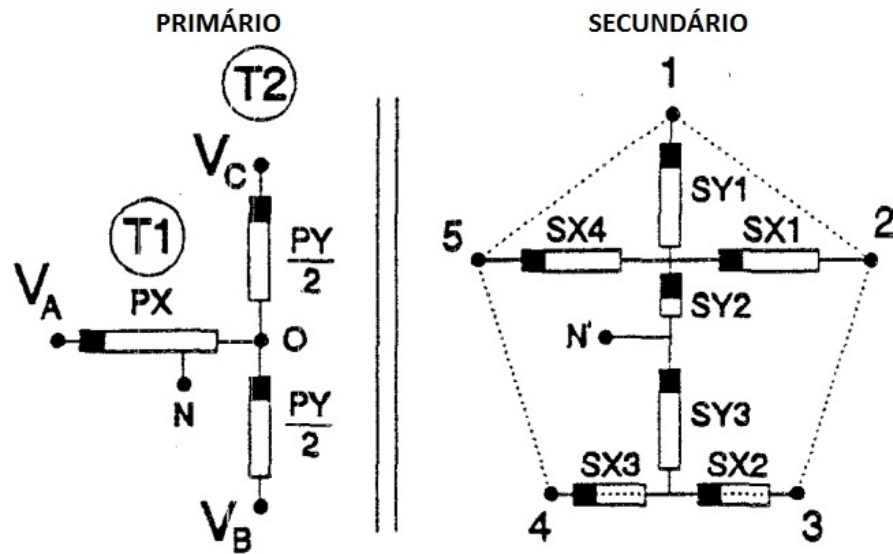


Fonte: Parton (1952).

Para transformar o sistema trifásico em um sistema de 5 fases, utilizando transformadores, existem três tipos de modelos possíveis (EL-KAHEL et al., 1995):

- modelo baseado na montagem Scott, utilizando apenas dois transformadores monofásicos, chamado de tipo S, conforme ilustrado na Fig. 2;
- modelo baseado na montagem Leblanc, utilizando um transformador trifásico com 3 colunas, chamado de tipo L, conforme ilustrado na Fig. 3;
- modelo baseado em um transformador trifásico com 5 colunas, utilizando uma ligação zig-zag no primário e estrela no secundário, chamado de tipo G, conforme ilustrado na Fig. 4.

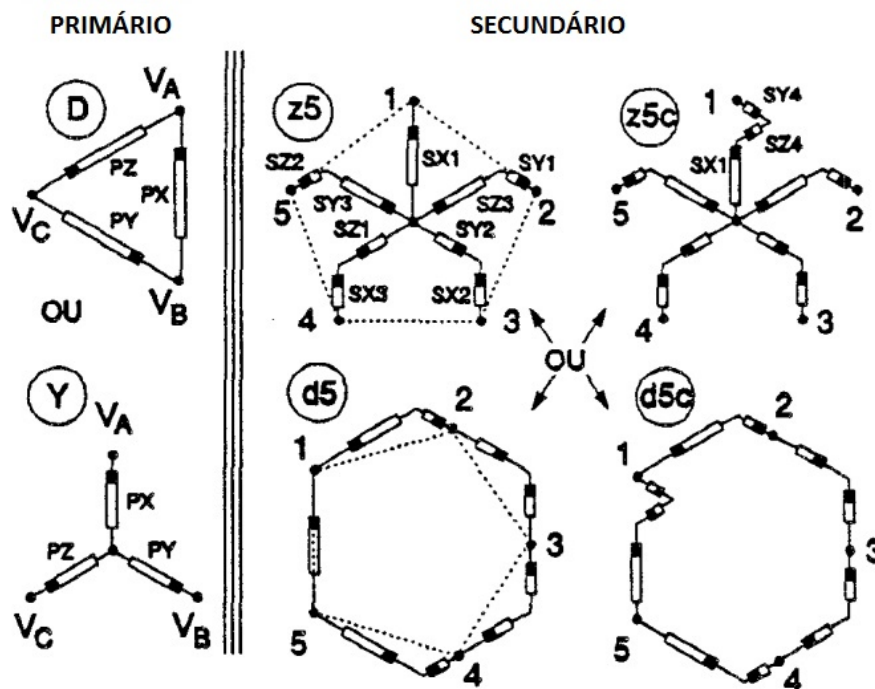
Figura 2 – Conexões dos enrolamentos para o transformador do tipo S



Fonte: El-kahel et al. (1995).

Como pode ser observado na Fig. 2, o primário do conversor é composto por 2 transformadores monofásicos, T1 e T2, sendo os enrolamentos primários representados pelas siglas PX e PY, e as siglas SX e SY os enrolamentos secundários. O arranjo do primário ao ser alimentado pelas tensões ( $V_A, V_B, V_C$ ) do sistema trifásico, gera tensões secundárias com os ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , possibilitando criar 5 fases através da soma de dois fasores.

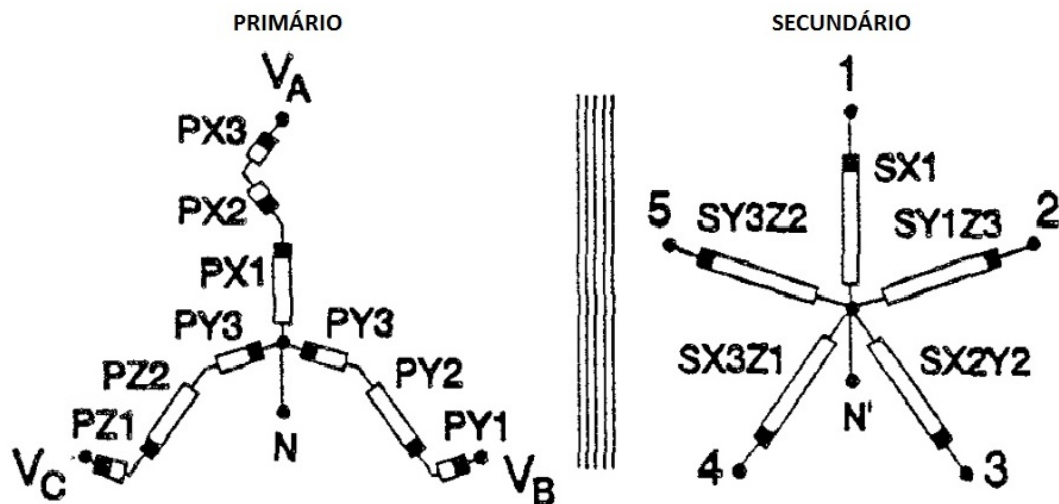
Figura 3 – Conexões dos enrolamentos para o transformador do tipo L



Fonte: El-kahel et al. (1995).

Para o modelo do tipo L, visto na Fig. 3, existem algumas possibilidades de conexões, tanto para o primário quanto para o secundário do transformador. O primário pode ser ligado em delta (D) ou estrela (Y) e o secundário pode ser ligado em zig-zag (z5), zig-zag com compensação (z5c), delta (d5) ou delta com compensação (d5c). As conexões com compensação, oferecem um ajuste a tensão de saída de número 1, que passa a ser composta por 3 tensões (SX1, SZ4 e SY4), ao invés de apenas uma (SX1) da ligação sem compensação. Estes enrolamentos de compensação servem para eliminar as correntes de sequência zero presentes no primário do modelo sem compensação. Este assunto será abordado com mais detalhes no Capítulo 2. As siglas PX, PY e PZ representam as tensões dos enrolamentos primários, e as siglas SX, SY e SZ representam as tensões dos enrolamentos secundários.

Figura 4 – Conexões dos enrolamentos para o transformador do tipo G



Fonte: El-kahel et al. (1995).

O modelo do tipo G, visto na Fig. 4, utiliza um transformador trifásico com 5 colunas em seu núcleo, conectando em série no primário 3 tensões (PX1, PX2 e PX3; PY1, PY2 e PY3; PZ1, PZ2 e PZ3), um de cada fase do sistema trifásico ( $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ ), formando a ligação primária em zig-zag. Os 5 enrolamentos secundários (1 à 5) são conectados em estrela, sendo cada fase representada pelas siglas SX1, SY1Z3, SX2Y2, SX3Z1 e SY3Z2.

Os 3 modelos apresentados foram classificados em relação ao seu equilíbrio de tensão e corrente quando submetidos à carga equilibrada e desequilibrada. A Tabela 1 apresenta a classificação geral dos 3 modelos, incluindo todas as possibilidades de conexões para o modelo do tipo L (EL-KAHEL et al., 1995).

Tabela 1 – Classificação dos modelos quanto ao equilíbrio de tensão e corrente

Tipo de Modelo e Conexão	Primário				Secundário			
	Tensão		Corrente		Tensão		Corrente	
	Fase	Linha	Fase	Linha	Fase	Linha	Fase	Linha
S – Tz5	E	E	E	E	E	E	E	E
L – Dz5	E	E	D	E	E	E	D	D
L – Dz5c	E	E	E	E	E	E	E	E
L – Dd5	E	E	D	E	E	E	D	E
L – Dd5c	E	E	E	E	E	E	E	E
L – Yz5	D	E	E	E	E	E	D	D
L – Yz5c	E	E	E	E	E	E	E	E
L – Yd5	D	E	E	E	E	E	D	E
L – Yd5c	E	E	E	E	E	E	E	E
G – Zy5	D	E	E	E	E	E	E	E

Fonte: El-kahel et al. (1995).

Notas: E = equilibrado; D = desequilibrado.

Cada tipo de conexão proposta na Tabela 1, afeta diretamente o comportamento da tensão ou da corrente, ou de ambos, tanto para o primário como secundário. Em todas as conexões do modelo tipo L sem os enrolamentos de compensação, por exemplo, ocorre o desequilíbrio de corrente das fases do secundário. Para o mesmo modelo tipo L sem os enrolamentos de compensação com primários em delta ocorre o desequilíbrio das correntes de fase do primário, já com os primários em estrela ocorre o desequilíbrio das tensões de fase do primário. Isso demonstra a importância na escolha do modelo do conversor diante das necessidades de operação.

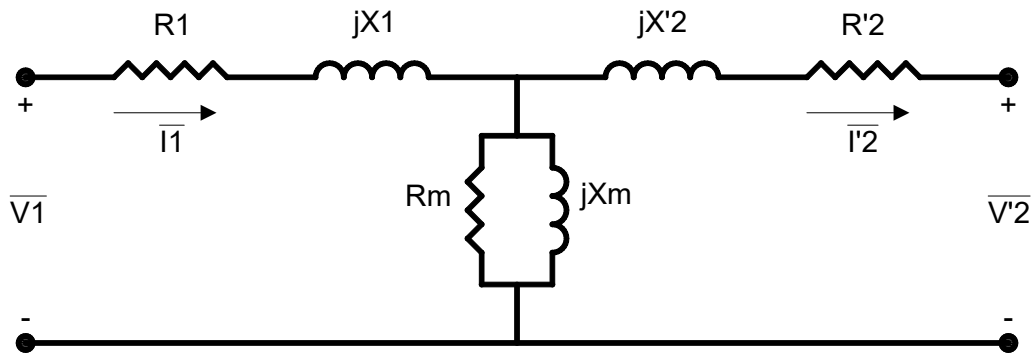
Utilizando 3 transformadores monofásicos, um arranjo de enrolamentos para uma saída com 5 fases é apresentado em (IQBAL et al., 2010), sendo composto por 2 transformadores possuindo um primário e três secundários e o outro transformador um primário e dois secundários. Este conjunto de transformadores, com 6 terminais primários e 16 terminais secundários, pode ser conectado em estrela ou delta no primário e em estrela ou delta no secundário, proposta similar ao do modelo L proposto por (EL-KAHEL et al., 1995), que utiliza um transformador trifásico de 3 colunas ao invés dos 3 transformadores monofásicos.

Outra topologia baseada na teoria geral da transformação de fases, apresentada por (PARTON, 1952), foi formulada a partir da ligação Scott, porém transformando 3 fases em 5 fases, simplificando em matrizes os dados dos fasores das  $m$  fases de entrada e das  $n$  fases de saída e propondo um circuito equivalente (ABDEL-KHALIK et al., 2013). O resultado proposto para a topologia é idêntico ao já descrito para o modelo do tipo S (EL-KAHEL et al.,

1995) e o circuito equivalente apenas ilustra as relações básicas entre as tensões, correntes, resistências e reatâncias entre os enrolamentos primário e secundário, não esclarecendo questões primordiais como a assimetria entre os enrolamentos, que ocorrem neste tipo de transformador.

Os transformadores trifásicos convencionais, assim como os monofásicos, possuem circuitos equivalentes bem conhecidos, conforme o exemplo ilustrado na Fig. 5 de um circuito equivalente em T de um transformador trifásico convencional, os quais representam de forma simplificada o funcionamento do mesmo, facilitando a interpretação dos fenômenos e os cálculos relativos ao transformador (MARTIGNONI, 1991).

Figura 5 – Circuito equivalente em T de um transformador trifásico convencional



Fonte: O autor (2016).

O circuito equivalente em T é constituído de:

- $R_1$  e  $jX_1$ : resistência e reatância dos enrolamentos primários, respectivamente;
- $R'_2$  e  $jX'_2$ : resistência e reatância dos enrolamentos secundários refletidas para o primário, respectivamente;
- $R_m$  e  $jX_m$ : resistência e reatância do núcleo magnético, respectivamente;
- $\overline{V_1}$ ,  $\overline{I_1}$ : tensão e corrente do primário, respectivamente;
- $\overline{V'_2}$ ,  $\overline{I'_2}$ : tensão e corrente do secundário refletida para o primário, respectivamente.

A relação de espiras ( $a$ ) é utilizada para refletir os valores do secundário para o primário e é calculada pela relação de espiras do primário ( $N_1$ ) com as espiras do secundário ( $N_2$ ). Sendo assim, a resistência do secundário refletida para o primário é obtida ( $R'_2 =$



$a^2R_2$ ), assim como a reatância do secundário refletida para o primário ( $jX'_2 = a^2jX_2$ ). Da relação de espiras também são obtidas a tensão do secundário refletida para o primário ( $\overline{V}'_2 = a\overline{V}_2$ ) e a corrente do secundário refletida para o primário ( $\overline{I}'_2 = \overline{I}_2/a$ ). Vale ressaltar que este circuito equivalente representa um transformador convencional trifásico, cujos primários e secundários possuem enrolamentos idênticos em cada uma de suas 3 colunas, ou seja, são simétricos, tornando simples os cálculos para a obtenção do circuito equivalente.

Com base nos circuitos equivalentes já existentes para os transformadores convencionais, foi concebido para transformadores com multi-enrolamentos um método para determinar o circuito equivalente considerando a saturação do núcleo e o efeito de histerese, utilizando uma nova forma de calcular a inversa da matriz de indutância nodal, tendo como resultado um circuito com indutâncias sem acoplamento mútuo, sendo algumas fixas e outras dependentes da relutância do núcleo. Este circuito equivalente pode ser usado para calcular os transitórios nos enrolamentos, ferro-ressonância, correntes de energização inicial (*Inrush*) e para análise em estado estacionário dos enrolamentos (MOHSENI, 1991).

Outro método para determinar o circuito equivalente de transformadores multi-enrolamentos, chamado de ortogonização, tem a vantagem de trabalhar apenas com indutâncias positivas, considerando um enrolamento de 2 camadas como sendo 2 enrolamentos acoplados e ligados externamente. Este modelo se mostrou útil apenas para o estudo de transformadores com baixo número de enrolamentos (KERADDEC et al., 1994), o que inviabiliza sua utilização para representar transformadores de 3 para 5 fases, que possuem em sua construção uma grande quantidade de enrolamentos.

Um estudo para criar um circuito equivalente, similar ao circuito em T, foi desenvolvido para transformadores com multi-enrolamentos e que geram alta dispersão. Este estudo trouxe mais vantagens quando comparado a outros modelos, primeiramente por identificar mais claramente os acoplamentos mútuos entre as bobinas, associando-as com espaços físicos dentro do dispositivo. Segundo, pelo exclusivo acoplamento mútuo entre os enrolamentos dos secundários, que demonstra os efeitos do mesmo sobre o acoplamento comum entre os enrolamentos primários e secundários, e as indutâncias de dispersão. A matriz de indutâncias é gerada a partir de específicos ensaios de circuito aberto e também de ensaios de acoplamentos em série (HAYES et al, 2003; 2004), o que torna a construção deste circuito equivalente possível apenas após a construção do transformador.

De forma geral, os circuitos equivalentes de transformadores multifásicos encontram problemas quando ocorre a assimetria entre os enrolamentos posicionados em cada uma das colunas do transformador, pois uma determinada tensão é fruto da ligação entre 2 ou mais enrolamentos diferentes entre si, tanto em relação à quantidade de espiras, como na distribuição ao longo da janela e de sua localização nas diferentes colunas do transformador, ou seja, possuindo ângulos de tensão distintos para cada coluna. Isso torna complexa a construção de um circuito equivalente para um transformador que possui 3 bobinas diferentes entre si, diferentemente dos transformadores monofásicos e trifásicos convencionais que já possuem circuitos equivalentes consolidados.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação de mestrado tem a seguinte estrutura:

- no capítulo 2, é apresentada uma visão geral das topologias existentes de conversores eletromagnéticos de 3 para 5 fases; e uma comparação entre os mesmos.
- no capítulo 3, é apresentado o projeto do protótipo, assim como o desenvolvimento do modelo e as simulações computacionais realizadas;
- no capítulo 4, é apresentado o resultado dos testes em laboratório do protótipo com carga equilibrada e desequilibrada, sendo os mesmos comparados ao modelo simulado no capítulo 3;
- no capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais e os trabalhos futuros a desenvolver.

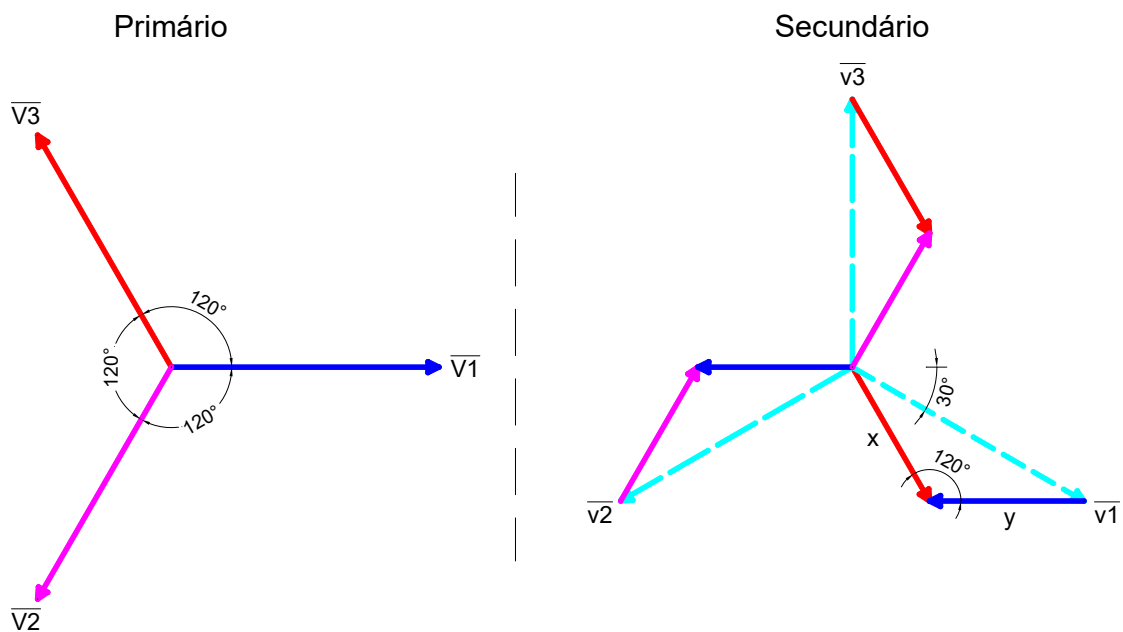
## 2 VISÃO GERAL DAS TOPOLOGIAS DE CONVERSORES

Neste capítulo apresentam-se as topologias empregadas em conversores estáticos de 3 para 5 fases e os métodos utilizados para o desenvolvimento do modelo simulado do protótipo, posteriormente fabricado e testado em laboratório. O projeto do protótipo, apresentado posteriormente no Capítulo 3, foi baseado na análise destas topologias.

### 2.1 TOPOLOGIAS EXISTENTES PARA CONVERSÃO DE 3 PARA 5 FASES

Para explicar o princípio básico de um conversor de 3 para 5 fases é preciso compreender inicialmente que o defasamento angular fixo existente entre as tensões do sistema trifásico é que possibilita criar tensões resultantes com ângulos específicos. O exemplo a seguir, ilustrado na Fig. 6, mostra a ligação de um transformador trifásico comum, com o primário conectado em estrela e o secundário conectado em zig-zag.

Figura 6 – Transformador trifásico comum, com ligação Yz-1

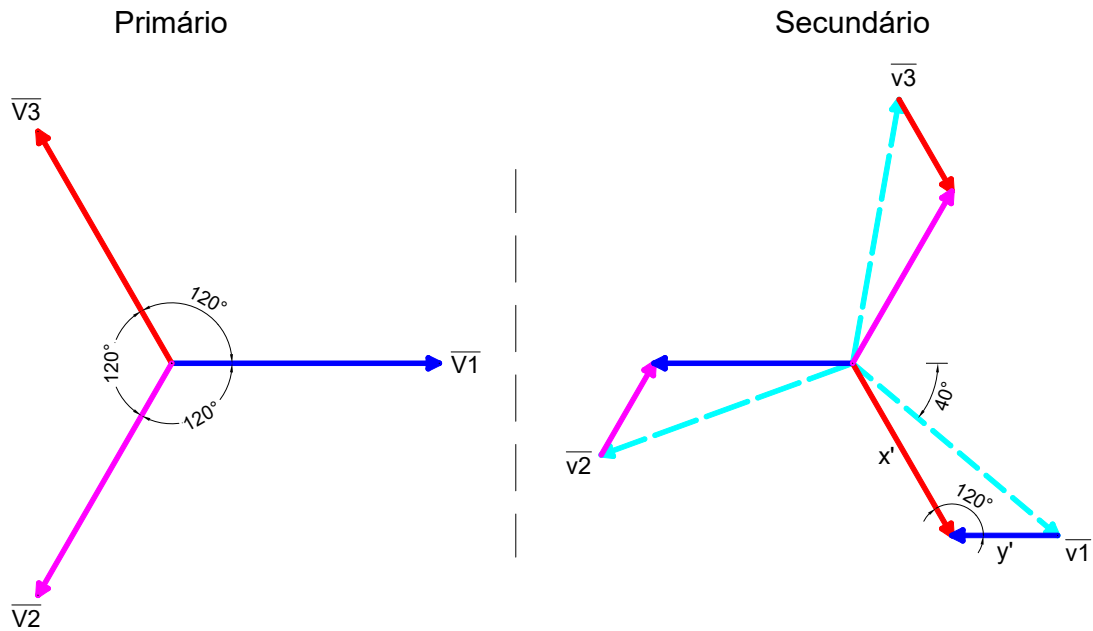


Fonte: O autor (2016).

Na Fig. 6, os fasores  $\overline{V1}$ ,  $\overline{V2}$  e  $\overline{V3}$  representam as tensões primárias do transformador conectadas em estrela e defasadas entre si em  $120^\circ$ . As cores azul escuro, vermelho e magenta são os fasores de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $240^\circ$  respectivamente. O secundário, neste caso, conectado em zig-zag possui os fasores  $\overline{v1}$ ,  $\overline{v2}$  e  $\overline{v3}$ , representados pela cor azul claro pontilhado, estando os mesmos  $30^\circ$  atrasados em relação aos enrolamentos correspondentes no primário. Os fasores do secundário são resultantes da soma fasorial de dois enrolamentos com a mesma quantidade

de espiras ( $x = y$ ), porém não estão na mesma fase. Para alterar o defasamento entre o primário e o secundário, ou seja, fazer com que a tensão na saída  $\bar{v}_1$  ocorra antes ou depois que a tensão de entrada  $\bar{V}_1$ , é necessário rotacionar os fasores  $\bar{v}_1$ ,  $\bar{v}_2$  e  $\bar{v}_3$ . Como exemplo, a Fig. 7 ilustra a alteração do secundário em zig-zag da Fig. 6 para atrasar em mais  $10^\circ$  a tensão secundária em relação a primária.

Figura 7 – Transformador trifásico com ligação Yz com defasagem de  $40^\circ$



Fonte: O autor (2016).

Para rotacionar em mais  $10^\circ$  os fasores resultantes dos secundários  $\bar{v}_1$ ,  $\bar{v}_2$  e  $\bar{v}_3$ , mantendo o mesmo módulo de tensão do secundário, é necessário alterar a quantidade de espiras em cada enrolamento secundário que o compõe, tornando-os desiguais ( $x' \neq y'$ ), conforme pode ser visualizado na Fig. 7. Desta forma é possível criar tensões com ângulos específicos utilizando a soma fasorial entre 2 ou mais enrolamentos.

No caso do conversor de 3 para 5 fases é preciso que as tensões do secundário tenham a mesma defasagem angular entre si, sendo este valor calculado conforme a Equação 2, onde  $(n)$  é a quantidade de fases do secundário e  $(\theta)$  o ângulo entre cada fase do secundário.

$$\theta = \frac{360^\circ}{n} = \frac{360^\circ}{5} = 72^\circ \quad (2)$$

De posse desta informação e considerando fixa a defasagem angular entre cada fase do sistema trifásico, são calculados os módulos de cada enrolamento que compõe cada tensão do secundário do conversor.

A tensão fixa da rede convencional trifásica pode ser transformada utilizando um arranjo específico de conexões nos enrolamentos (EL-KAHEL et al., 1995, 1996; IQBAL et al., 2010). Entre as diversas possibilidades de conexões, destaca-se:

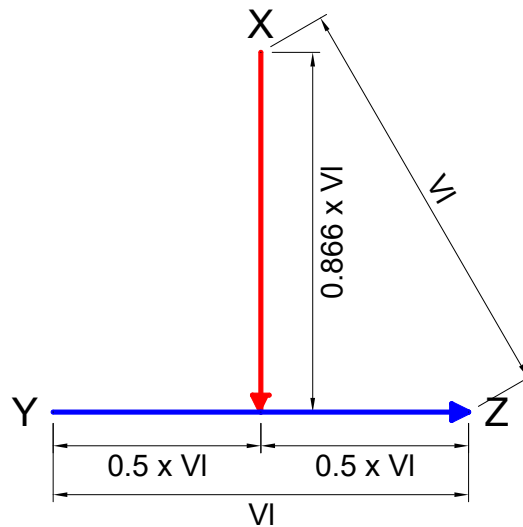
- entrada em estrela e saída em zig-zag;
- entrada em estrela e saída em polígono (ligação delta com mais de 3 fases);
- entrada em delta e saída em zig-zag;
- entrada em delta e saída em polígono.

A escolha da conexão primária e secundária pode interferir no equilíbrio de tensão e corrente, dependendo da construção adotada para o transformador, conforme já demonstrado por (EL-KAHEL et al., 1995) na Tabela 1, e definirá a quantidade de enrolamentos e seus respectivos valores de tensão.

Com o intuito de descrever as topologias possíveis para o desenvolvimento do projeto do protótipo, são apresentados a seguir alguns dos modelos propostos para o conversor de 3 para 5 fases.

Baseada na ligação Scott, que permite a conversão de 3 para 2 fases ou de 2 para 3 fases, uma modelagem é proposta em (ABDEL-KHALIK et al., 2013; EL-KAHEL et al., 1995). Neste modelo é utilizada a soma fasorial exemplificada nas Fig. 6 e 7 para construir um conversor de 3 para 5 fases, utilizando apenas dois transformadores monofásicos. Isso se torna possível porque os 2 transformadores são conectados entre si, e recebem em seu primário a alimentação do sistema trifásico, gerando fasores em seu secundário com os ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . A Fig. 8 ilustra o arranjo entre os enrolamentos primários dos dois transformadores, alimentados nos terminais X, Y e Z pelo sistema trifásico convencional.

Figura 8 – Arranjo entre os enrolamentos primários dos dois transformadores

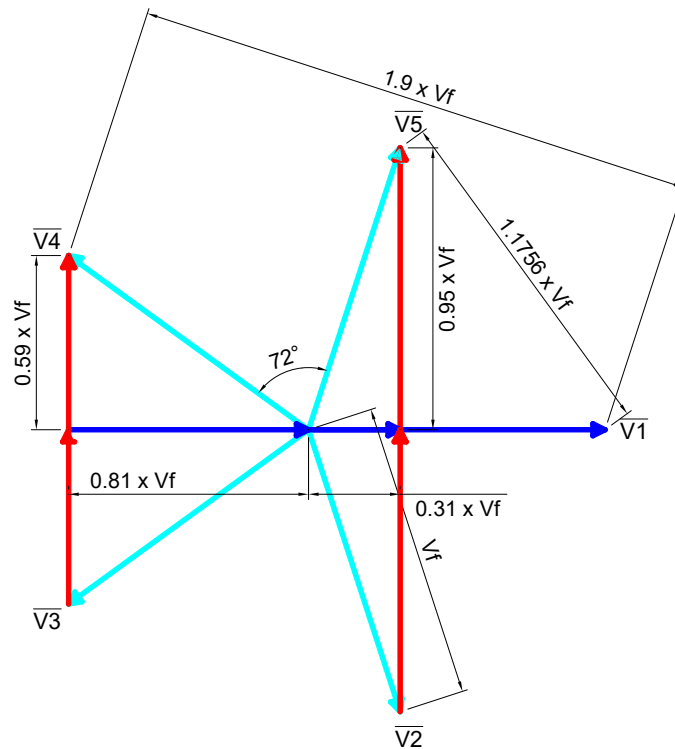


Fonte: O autor (2016).

Na Fig. 8, o fasor azul escuro representa o primário de um transformador, que possui uma derivação central, que por sua vez é conectada ao segundo transformador, representado pelo fasor vermelho. O módulo de cada fasor está relacionado diretamente à tensão de linha (VI) da alimentação disponível.

Com os fasores de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  gerados respectivamente nos secundários dos 2 transformadores monofásicos, é realizada a ligação entre ambos para obter 5 fases com defasamento angular de  $72^\circ$  entre cada fase. A Fig. 9 mostra o diagrama fasorial dos enrolamentos secundários dos 2 transformadores monofásicos para obter as 5 fases.

Figura 9 – Diagrama fasorial dos enrolamentos secundários dos 2 transformadores monofásicos

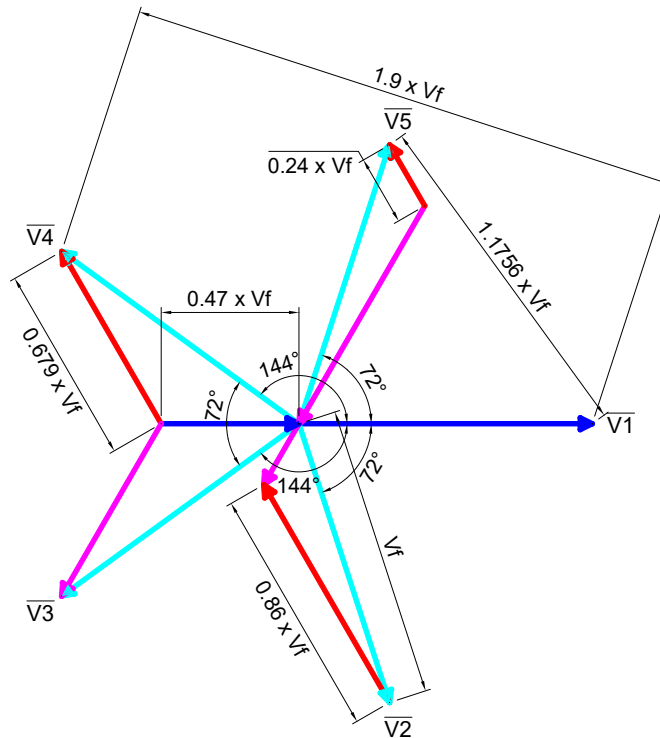


Fonte: O autor (2016).

Os fasores azuis claro, ilustrados na Fig. 9, representam cada uma das tensões resultantes de fase ( $V_f$ ), ou seja, cada um dos secundários  $\overline{V_2}$ ,  $\overline{V_3}$ ,  $\overline{V_4}$  e  $\overline{V_5}$ , obtidos pela soma fasorial de 2 bobinas, oriundas de cada um dos 2 transformadores monofásicos. Uma única tensão de fase, indicada como  $\overline{V_1}$  na Fig. 9, é gerada pela relação direta de espiras do primário para com o secundário de apenas um dos transformadores. As cores azul escuro e vermelho representam as tensões geradas nos secundários dos dois transformadores, com os ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  respectivamente, conforme explicado na Fig. 8.

Outro modelo composto por apenas um transformador trifásico ou por três transformadores monofásicos é utilizado para converter 3 para 5 fases (EL-KAHHEL et al., 1995, 1996; IQBAL et al., 2010). Da mesma forma que o anterior, também utiliza da soma fasorial, agrupando os fasores de tensão produzida nos enrolamentos de saída do transformador, para criar os defasamentos entre as 5 tensões de fase. O diagrama fasorial dos enrolamentos secundários conectados em zig-zag está ilustrado na Fig. 10.

Figura 10 – Diagrama fasorial dos enrolamentos secundários conectados em zig-zag

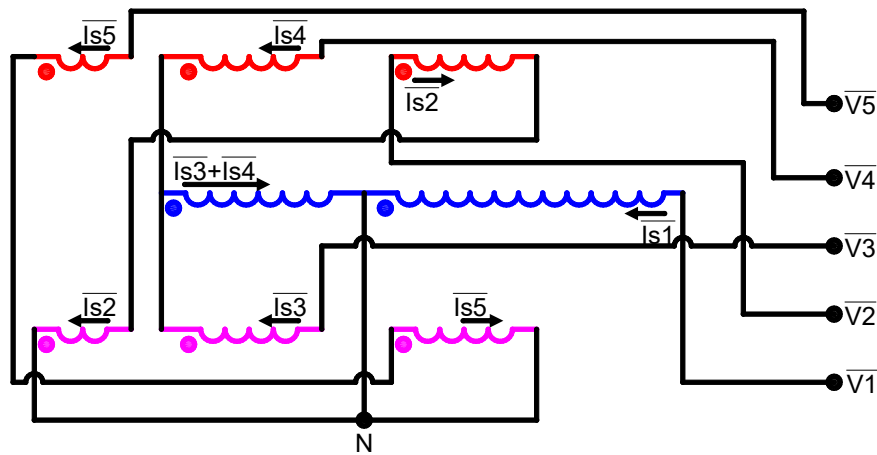


Fonte: O autor (2016).

Os fasores nas cores azul escuro, vermelho e magenta, ilustrados na Fig. 10, representam as fases do sistema trifásico de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $240^\circ$  respectivamente. Os fasores azuis claro representam cada uma das tensões resultantes de fase ( $V_f$ ), ou seja, cada um dos secundários  $\overline{V2}$ ,  $\overline{V3}$ ,  $\overline{V4}$  e  $\overline{V5}$ , obtidas pela soma fasorial de 2 bobinas secundárias adjacentes, ou seja, que não estão na mesma fase. Uma única tensão de fase, indicada como  $\overline{V1}$  na Fig. 10, é gerada pela relação direta de espiras do primário para com o secundário, ou seja, não dependerá de uma soma fasorial. A Fig. 11 mostra o arranjo das conexões dos enrolamentos secundários em zig-zag vistos no diagrama da Fig. 10.



Figura 11 – Conexão dos enrolamentos secundários conectados em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

A escolha da ligação zig-zag para o enrolamento secundário deve garantir o equilíbrio das tensões e correntes no primário e secundário. Por um lado, se o transformador é alimentado por um sistema trifásico com tensões equilibradas, seu secundário produz um sistema pentafásico com 5 tensões também equilibradas. Do mesmo modo, uma carga simétrica de 5 fases, provoca a circulação de correntes ( $\overline{Is1}, \overline{Is2}, \overline{Is3}, \overline{Is4}, \overline{Is5}$ ) balanceadas entre cada fase do secundário. Por outro lado, esta mesma carga simétrica gera nos enrolamentos primários do transformador um leve desequilíbrio nas correntes de fase ( $\overline{I_{AB}}, \overline{I_{BC}}, \overline{I_{CA}}$ ), conforme demonstrado nas Equações de 3 à 5 (EL-KAHEL et al., 1995). A sigla PX representa o enrolamento de fase do primário, ilustrada na Fig. 3.

$$\overline{I_{AB}} = \frac{(1 \cos(0^\circ) - 0,47 \cos(216^\circ) - 0,47 \cos(144^\circ)) + j(1 \sin(0^\circ) - 0,47 \sin(216^\circ) - 0,47 \sin(144^\circ))}{PX} \overline{Is1} = \frac{1,76}{PX} \overline{Is1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \overline{I_{BC}} &= \frac{(0,24 \cos(288^\circ) + 0,68 \cos(216^\circ) - 0,86 \cos(72^\circ)) + j(0,24 \sin(288^\circ) + 0,68 \sin(216^\circ) - 0,86 \sin(72^\circ))}{PX} \overline{Is1} \\ &= \frac{1,62}{PX} \overline{Is1} \angle -117,2^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

$$\overline{I_{CA}} = \frac{(0,68 \cos(144^\circ) + 0,24 \cos(72^\circ) - 0,86 \cos(288^\circ)) + j(0,68 \sin(144^\circ) + 0,24 \sin(72^\circ) - 0,86 \sin(288^\circ))}{PX} \overline{Is1} = \frac{1,62}{PX} \overline{Is1} \angle 117,2^\circ \quad (5)$$

O cálculo das correntes de fase ( $\bar{I}_{AB}, \bar{I}_{BC}, \bar{I}_{CA}$ ), visualizado nas Equações de 3 à 5, utiliza os valores das tensões em p.u. de cada um dos enrolamentos secundários e o ângulo, relativo ao ponto zero, da saída ao qual está conectado. Por exemplo, no caso da corrente  $\bar{I}_{AB}$ , os enrolamentos secundários gerados estão na fase de  $0^\circ$  (azul escuro) e participam da soma fasorial das saídas  $\bar{V}1$  com ângulo de  $0^\circ$ ,  $\bar{V}3$  com ângulo de  $216^\circ$  e  $\bar{V}4$  com ângulo de  $144^\circ$ , conforme visto na Fig. 10, sendo respectivamente suas tensões em p.u. de 1; 0,47 e 0,47. O sinal negativo utilizado nas equações indica a rotação em  $180^\circ$  do fasor relativo à sua conexão. Para as demais correntes de fase o processo é similar.

As Equações de 6 à 8, mostram as componentes de sequência ( $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$ ) calculadas para as correntes de fase ( $\bar{I}_{AB}, \bar{I}_{BC}, \bar{I}_{CA}$ ) e confirmam a presença de uma pequena componente de sequência zero, sendo  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

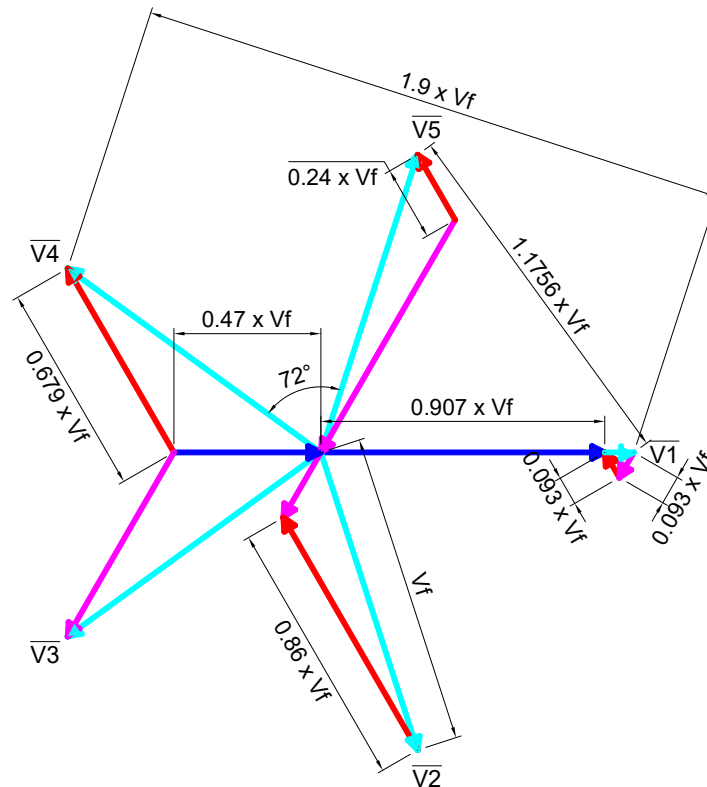
$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3} \times (\bar{I}_{AB} + a \times \bar{I}_{BC} + a^2 \times \bar{I}_{CA}) = \frac{1,67}{PX} \bar{I}_{S1} \quad (6)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} \times (\bar{I}_{AB} + a^2 \times \bar{I}_{BC} + a \times \bar{I}_{CA}) = 0 \quad (7)$$

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3} \times (\bar{I}_{AB} + \bar{I}_{BC} + \bar{I}_{CA}) = \frac{0,09}{PX} \bar{I}_{S1} \quad (8)$$

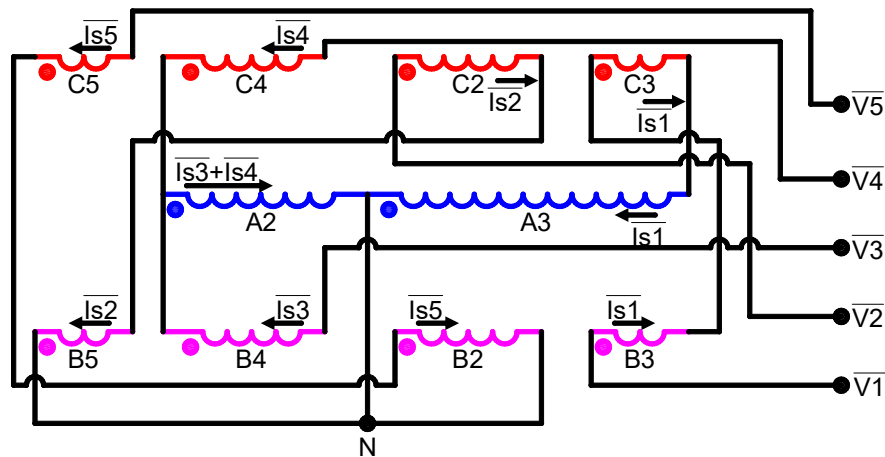
Para que ocorra o equilíbrio das correntes do primário, eliminando a corrente de sequência zero, é necessário modificar a obtenção da tensão secundária  $\bar{V}1$ , reduzindo algumas espiras do enrolamento que a compõe e adicionando mais dois enrolamentos de compensação em cada uma das outras colunas do transformador (EL-KAHEL et al., 1995). A Fig. 12 ilustra o diagrama fasorial dos enrolamentos secundários em zig-zag com os 2 enrolamentos de compensação e a Fig. 13 mostra as respectivas conexões modificadas dos enrolamentos em zig-zag do transformador com os 2 enrolamentos de compensação. Os 2 enrolamentos de compensação estão identificados com as siglas B3 e C3, e estão ligados ao enrolamento A3. Juntos, através da soma fasorial, formam a nova tensão secundária  $\bar{V}1$ .

Figura 12 – Diagrama fasorial modificado dos secundários conectados em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

Figura 13 – Conexão modificada dos enrolamentos dos secundários conectados em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

Para comprovar o equilíbrio das correntes de fase do primário após esta modificação dos enrolamentos, foram recalculadas as correntes das 3 fases ( $\bar{I}'_{AB}$ ,  $\bar{I}'_{BC}$ ,  $\bar{I}'_{CA}$ ), ilustradas nas Equações de 9 à 11.

$$\bar{I}'_{AB} = \frac{(0,907 \cos(0^\circ) - 0,47 \cos(216^\circ) - 0,47 \cos(144^\circ)) + j(0,907 \sin(0^\circ) - 0,47 \sin(216^\circ) - 0,47 \sin(144^\circ))}{PX} \bar{I}_{s1} = \frac{1,67}{PX} \bar{I}_{s1} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{BC} &= \frac{(0,24 \cos(288^\circ) + 0,68 \cos(216^\circ) - 0,86 \cos(72^\circ) - 0,093 \cos(0^\circ)) + j(0,24 \sin(288^\circ) + 0,68 \sin(216^\circ) - 0,86 \sin(72^\circ) - 0,093 \sin(0^\circ))}{PX} \bar{I}_{s1} \\ &= \frac{1,67}{PX} \bar{I}_{s1} \angle -120^\circ \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{CA} &= \frac{(0,68 \cos(144^\circ) + 0,24 \cos(72^\circ) - 0,86 \cos(288^\circ) - 0,093 \cos(0^\circ)) + j(0,68 \sin(144^\circ) + 0,24 \sin(72^\circ) - 0,86 \sin(288^\circ) - 0,093 \sin(0^\circ))}{PX} \bar{I}_{s1} \\ &= \frac{1,67}{PX} \bar{I}_{s1} \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (11)$$

Ao modificar a composição da tensão de saída  $\bar{V}1$ , adicionando mais 2 enrolamentos ao transformador, os valores das correntes em cada fase primária ( $\bar{I}'_{AB}, \bar{I}'_{BC}, \bar{I}'_{CA}$ ) passam a possuir o mesmo módulo e apresentam a defasagem angular entre si de  $120^\circ$ , próprias do sistema trifásico e portanto, em equilíbrio.

As Equações de 12 à 14, mostram as novas componentes de sequência ( $\bar{I}'_1, \bar{I}'_2, \bar{I}'_0$ ) calculadas para as correntes de fase ( $\bar{I}'_{AB}, \bar{I}'_{BC}, \bar{I}'_{CA}$ ) e validam praticamente a eliminação da componente de sequência zero.

$$\bar{I}'_1 = \frac{1}{3} \times (\bar{I}'_{AB} + a \times \bar{I}'_{BC} + a^2 \times \bar{I}'_{CA}) = \frac{1,67}{PX} \bar{I}_{s1} \quad (12)$$

$$\bar{I}'_2 = \frac{1}{3} \times (\bar{I}'_{AB} + a^2 \times \bar{I}'_{BC} + a \times \bar{I}'_{CA}) = 0 \quad (13)$$

$$\bar{I}'_0 = \frac{1}{3} \times (\bar{I}'_{AB} + \bar{I}'_{BC} + \bar{I}'_{CA}) = \frac{0,00026}{PX} \bar{I}_{s1} \quad (14)$$

## 2.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS

Dentre os modelos apresentados, o transformador trifásico com 3 colunas e com enrolamentos de compensação apresenta mais enrolamentos que o modelo com apenas dois transformadores monofásicos, porém apresenta maiores possibilidades de conexão, tanto para o primário quanto para o secundário, possibilitando modificar a defasagem angular entre o enrolamento primário e secundário, e até mesmo alterando a tensão de linha do primário, aumentando a disponibilidade de conexão a diversas tensões dos sistemas trifásicos.

Outra vantagem do transformador com 3 colunas e com enrolamentos de compensação, quando o primário conectado em delta, é o bloqueio das correntes harmônicas de terceira ordem injetadas na rede e também não transferidas para os secundários.

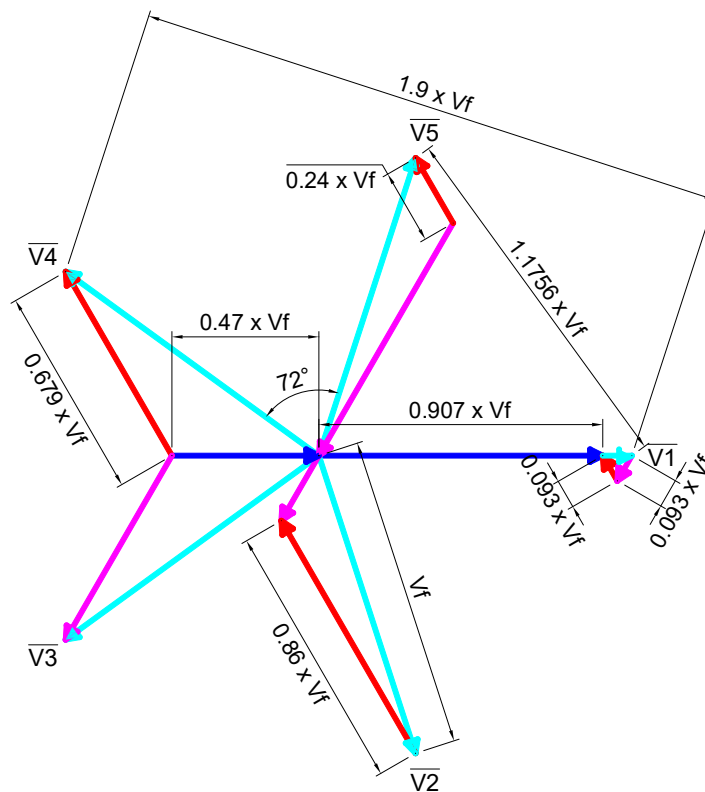
Dentre todos os modelos, alguns mantêm o equilíbrio de tensão e corrente, tanto para o primário quanto para o secundário, como no caso do L-Dz5c, L-Dd5c, L-Yz5c e do L-Yd5c, propostos por (EL-KAHEL et al., 1995), sendo esta a fundamental característica para o projeto do conversor desta dissertação, e, portanto, base para a construção do protótipo. Apesar dos 4 modelos anteriores apresentarem conexões distintas, todos são constituídos de enrolamentos idênticos, alternando apenas a forma de conexão entre os mesmos.

Considerando os modelos encontrados na literatura, decidiu-se pela construção de um transformador de 3 colunas com enrolamentos de compensação conforme proposto por (EL-KAHEL et al., 1995), que além de oferecer o equilíbrio de tensão e corrente pretendidos, permite a análise entre cada uma das possíveis conexões, já mencionadas anteriormente, e principalmente possibilita o acréscimo da ligação zig-zag para o primário, alteração explicada detalhadamente no Capítulo 3.

### 3 PROJETO E MODELO DO CONVERSOR ELETROMAGNÉTICO

Baseado nos modelos apresentados no Capítulo 2, a escolha da topologia, empregada na construção do protótipo, considera que o conversor mantenha tanto as tensões como as correntes em equilíbrio, independente da carga que esteja conectada em seu secundário. Uma das topologias para o conversor eletromagnético de 3 para 5 fases que atende as exigências de equilíbrio é o modelo L-Dz5c, que utiliza um núcleo trifásico com 3 colunas, com primário em delta e secundários em zig-zag com os enrolamentos de compensação proposto por (EL-KAHEL et al., 1995), conforme ilustrado na Fig. 14.

Figura 14 – Diagrama fasorial dos secundários do modelo L-Dz5c



Fonte: O autor (2016).

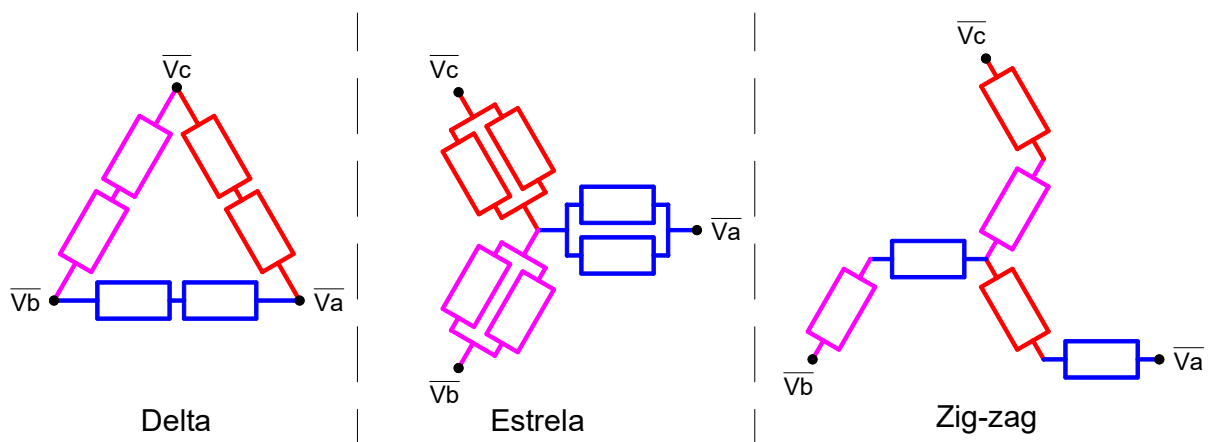
#### 3.1 PROJETO DO CONVERSOR DE 3 PARA 5 FASES

A topologia escolhida permite a análise do comportamento do conversor eletromagnético alimentando cargas equilibradas e desequilibradas, e principalmente para a análise do comportamento do mesmo frente à falha (abertura) em uma das fases da carga, estudo esse de relevância técnica e científica, pois elucida um assunto já conhecido para um

transformador trifásico convencional, mas ainda não realizado em um transformador pentafásico.

Para complementar a topologia escolhida, o primário do conversor foi projetado com 2 enrolamentos por coluna, totalizando 6 enrolamentos primários, permitindo a mudança da conexão do primário do conversor de delta para estrela ou até mesmo para zig-zag. A Fig. 15 ilustra os 3 tipos de conexão disponíveis para o primário do protótipo, assim como a ligação entre os enrolamentos primários para cada conexão.

Figura 15 – Tipos de conexões disponíveis para o primário do protótipo



Fonte: O autor (2016).

Conforme ilustrado na Fig. 15, sendo que as cores azul escuro, vermelho e magenta representam as fases do sistema trifásico de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $240^\circ$  respectivamente, a conexão delta, padrão do modelo adotado para o protótipo, possui uma ligação em série entre cada um dos enrolamentos da mesma coluna (fase), como se fosse um único enrolamento para cada fase. Para a conexão estrela, os enrolamentos da mesma coluna são conectados em paralelo, reduzindo pela metade tanto a quantidade de espiras, como o valor da tensão de cada fase quando comparada a conexão em delta. Já para a conexão zig-zag, os enrolamentos são novamente ligados em série, porém com enrolamentos de colunas diferentes, tendo como resultado uma tensão de fase de 0,866 vezes o valor da tensão de fase da conexão em delta. Essas mudanças na conexão do primário do protótipo visam permitir a comparação do comportamento do mesmo frente aos ensaios posteriormente apresentados no Capítulo 4.

Tendo em vista utilizar o protótipo do conversor eletromagnético proposto para alimentar cargas diversas, incluindo máquinas elétricas, em especial, um motor pentafásico com potência de 5,5 kW e com tensão de fase de 220 V, foi projetado um transformador com

potência aparente de 10 kVA, frequência de 60 Hz, com tensão primária de 254 V em delta e tensão secundária de 220 V em zig-zag, montado em um núcleo de três colunas (trifásico), utilizando a relação de espiras do modelo L-Dz5c proposta por (EL-KAHEL et al., 1995).

Para a escolha do núcleo do transformador, foi considerado o uso de chapas de aço silício de grão não orientado (GNO), padrão na indústria de transformadores a seco para esta potência. Essas chapas, do tipo E-230, são fabricadas nacionalmente pela empresa Aperam, e apresentam espessura de 0,5 mm, com perdas garantidas máximas de 2,91 W/kg para indução de 1 T e frequência de 60 Hz e perdas típicas de 1,95 W/kg para indução de 1 T e frequência de 60 Hz, conforme catálogo e curvas características disponíveis no Anexo.

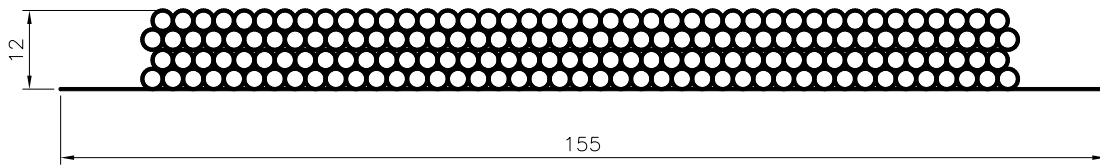
Uma vez definido o material do núcleo, a determinação da seção magnética do núcleo do transformador considerou o melhor ajuste de espiras inteiras em cada um dos enrolamentos para obter as tensões desejadas para o protótipo, considerando o valor máximo da indução magnética de 1,06 T, valor esse abaixo do utilizado na indústria para esta chapa (1,25 T). A escolha desta indução admite elevar a tensão primária de 254 V até 300 V sem ocorrer a saturação do núcleo, permitindo melhor ajuste de tensão no secundário quando este estiver alimentando uma carga qualquer.

Com base nos dados nominais do transformador, como potência aparente, frequência, tensão e corrente, foram definidas as seções dos condutores dos enrolamentos primários (externos) e secundários (internos).

Os enrolamentos representados por A1, B1 e C1, descritos no decorrer do texto, possuem tensão de 254 V e definem as tensões de cada fase do primário, que está conectado em delta. Cada um desses enrolamentos possui 172 espiras, oriundas da ligação em série descritas na Fig. 15, distribuídas em 4 camadas e compostas por 1 fio de alumínio com tamanho 9 AWG (6,633 mm<sup>2</sup>), possuindo uma densidade de corrente calculada de 1,978 A/mm<sup>2</sup>. A Fig. 16 mostra o desenho esquemático da distribuição de espiras do enrolamento primário, que possui 2 enrolamentos isolados entre si, contendo cada um 86 espiras, distribuídas em 2 camadas totalizando 172 espiras, tendo a bobina primária uma altura axial de 155 mm e uma espessura de 12 mm.



Figura 16 – Desenho esquemático da distribuição de espiras do enrolamento primário



Fonte: O autor (2016).

A área ocupada pelo enrolamento primário ( $A_b$ ) de uma coluna pode ser calculada multiplicando-se a seção do fio pelo número de espiras, o que equivale à 1140,876 mm<sup>2</sup>. Considerando que a potência aparente é igual ao produto dos valores eficazes da tensão pela corrente, visualizada na Equação 15, e sendo a tensão expressa pela Equação 16 e a corrente pela Equação 17, substituindo ambas obtemos a Equação 18.

$$S = V \times I \quad (15)$$

$$V = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \times \hat{B} \times S_f \times N \quad (16)$$

$$I = \frac{A_b}{N} \times J \quad (17)$$

$$S = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \times \hat{B} \times A_{\text{ferro}} \times A_b \times J \quad (18)$$

Sendo a frequência ( $f$ ) de 60 Hz, a indução máxima ( $\hat{B}$ ) de 1,06 T, a área da bobina ( $A_b$ ) de 1140,876 mm<sup>2</sup>, a densidade de corrente ( $J$ ) de 1,978 A/mm<sup>2</sup>, e a potência aparente ( $S$ ) de um terço da potência total de 10 kVA, equivalente a potência de uma bobina, calcula-se a seção magnética do núcleo de ferro ( $A_{\text{ferro}}$ ), sendo a mesma expressa na Equação 19. O número de espiras ( $N$ ) é eliminado na substituição, pois o mesmo está inserido na área da bobina.

$$A_{\text{ferro}} = \frac{S}{\frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \times \hat{B} \times A_b \times J} = \frac{\frac{10000}{3}}{\frac{2\pi 60}{\sqrt{2}} \times 1,06 \times 1140,876 \times 1,978} = 0,005227 \text{ m}^2 \quad (19)$$

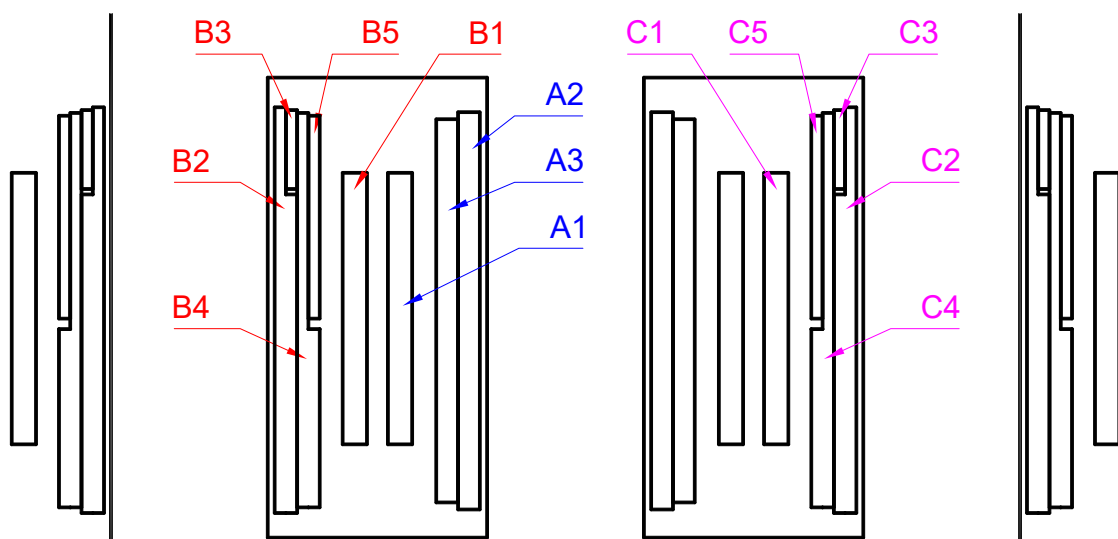
Considerando as perdas em virtude do empilhamento das chapas, considera-se um fator de empilhamento ( $k$ ) de 0,93. A seção geométrica mínima do núcleo de ferro ( $A_{g\text{ferro}}$ ) é calculada conforme a Equação 20.

$$A_{g\text{ferro}} = \frac{A_{\text{ferro}}}{k} = \frac{0,005227}{0,93} = 0,005621 \text{ m}^2 \quad (20)$$

O tamanho do núcleo escolhido para atender a seção geométrica mínima e também os padrões de cortes disponibilizados na indústria foi de uma chapa com largura e empilhamento de 75 mm, com seção geométrica equivalente à 0,005625 m<sup>2</sup> e magnética de 0,00523 m<sup>2</sup>.

Todos os enrolamentos secundários são compostos pelo fio de alumínio com tamanho 10 AWG (5,26 mm<sup>2</sup>), possuindo uma densidade de corrente calculada de 1,728 A/mm<sup>2</sup>. O enrolamento A2, por estar conectado a 2 secundários simultaneamente ( $\sqrt{3}$  e  $\sqrt{4}$ ), possui o dobro de fios dos demais enrolamentos. Para acomodar todas as espiras do secundário e primário, mais o canal de ventilação de 15 mm entre os enrolamentos, além da isolação elétrica entre cada um dos enrolamentos, foi necessário dimensionar a janela do núcleo do transformador com uma altura de 220 mm e largura de 105 mm. Essa distribuição também se reflete na refrigeração do transformador, atendendo a classe térmica F dos materiais (ABNT NBR 5356-11, 2016), que permite uma temperatura de trabalho de até 155 °C, sendo 40 °C de temperatura ambiente e 105 °C de elevação, com 10 °C de tolerância. Para uma melhor visualização da distribuição de espiras de cada um dos enrolamentos que compõem o transformador, a Fig. 17 ilustra um desenho das bobinas em corte posicionadas nas 3 colunas do transformador, sendo cada um dos enrolamentos identificados e considerando ainda a ligação em série dos enrolamentos primários de cada coluna, conforme já mencionado anteriormente.

Figura 17 – Desenho das bobinas em corte identificando os enrolamentos do transformador



Fonte: O autor (2016).

As bobinas posicionadas nas colunas externas do transformador são idênticas e possuem 5 enrolamentos cada, enquanto a bobina posicionada na coluna central possui apenas 3 enrolamentos. As cores azul escuro, vermelho e magenta, representam as fases do sistema trifásico de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $240^\circ$  respectivamente. Ocorre a simetria nas 3 colunas apenas entre as bobinas primárias (A1, B1 e C1).

Com base na tensão primária de 254 V, frequência da rede de 60 Hz, indução máxima de 1,06 T e seção magnética de  $0,00523 \text{ m}^2$ , foram calculadas a quantidade de espiras para cada um dos enrolamentos do transformador, de acordo com o modelo L-Dz5c proposto por (EL-KAHEL et al., 1995). A Tabela 2 apresenta os valores da relação de espiras dos enrolamentos secundários do protótipo relacionado à tensão nominal de fase de 220 V do secundário. As siglas dos enrolamentos descritos na tabela abaixo correspondem as ilustradas na Fig. 13.

**Tabela 2 – Relação de espiras do secundário conectado em zig-zag**

<b>Fase do Sistema Trifásico</b>	<b>Relação de Espiras do Secundário em zig-zag</b>			
Vermelho $120^\circ$	C2 = 0,859	C3 = 0,094	C4 = 0,678	C5 = 0,242
Azul $0^\circ$	A2 = 0,47	A3 = 0,906		
Magenta $240^\circ$	B2 = 0,859	B3 = 0,094	B4 = 0,678	B5 = 0,242

Fonte: O autor (2016).

Devido ao valor da tensão por espira do protótipo calculada, os valores da relação de espiras apresentam uma pequena variação em relação aos valores propostos por (EL-KAHEL et al., 1995), que implica um desvio calculado de 0,03 % para a tensão do secundário  $\bar{V}_1$ , um desvio de 0,23 % para a tensão dos secundários  $\bar{V}_2$  e  $\bar{V}_5$  e um desvio de  $-0,04$  % na tensão dos secundários  $\bar{V}_3$  e  $\bar{V}_4$ . Os percentuais dos desvios, mencionados anteriormente, implicam em magnitudes nas tensões dos secundários de 220,06 V para  $\bar{V}_1$ ; 220,5 V para  $\bar{V}_2$  e  $\bar{V}_5$  e de 219,92 V para  $\bar{V}_3$  e  $\bar{V}_4$ . Estes valores são desprezíveis quando comparados a tensão nominal a vazio de 220 V e por atender ao valor máximo de  $\pm 0,5$  % prescrito na norma (ABNT NBR 5356-11, 2016) para os ensaios de relação de tensão a vazio.

A Fig. 18 mostra uma foto do transformador montado posteriormente pela empresa Schneider Electric do Brasil, a qual fabricou o protótipo.

Figura 18 – Foto do protótipo fabricado



Fonte: O autor (2016).

### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO CONVERSOR

O desenvolvimento de um modelo que represente as interações entre os componentes do transformador e que possa ser utilizado computacionalmente para simular o comportamento do conversor, foi desenvolvido à partir dos dados do projeto, como seção magnética, número de espiras e seção dos fios. Baseado em circuitos indutivos acoplados magneticamente, representados por indutâncias mútuas entre os indutores acoplados, foi desenvolvido um modelo para o protótipo do conversor, considerando que cada um dos 13 enrolamentos, presentes nas 3 colunas do transformador, gera um fluxo magnético que passando pelos demais enrolamentos produz 12 indutâncias mútuas, totalizando 156 ( $13 \times 12$ ) acoplamentos entre os enrolamentos, ou 78 acoplamentos quando considerada a repetição das indutâncias mútuas entre os mesmos enrolamentos. Os cálculos de todas as indutâncias próprias e mútuas serão apresentados após as definições do modelo, na Seção 3.2.

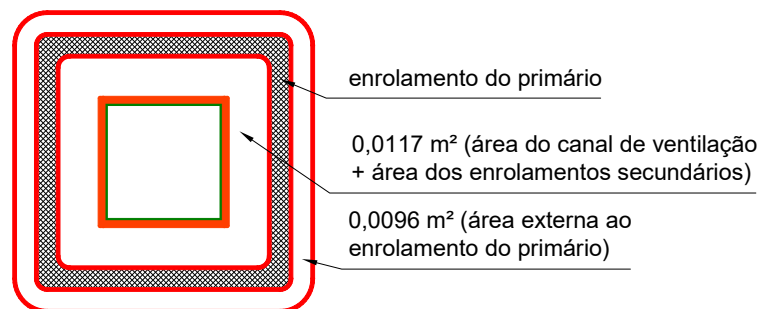
Além das indutâncias próprias e mútuas e da resistência ôhmica, o modelo pretende representar as indutâncias de dispersão no ar. Os métodos clássicos para o cálculo da dispersão no ar, abordados, por exemplo, em (MARTIGNONI, 1991; RIES, 2007) são de difícil aplicação neste caso, visto que não ocorre a simetria na construção das bobinas de cada uma das colunas do transformador como em um transformador trifásico convencional, além de que cada coluna possui segmentos de enrolamentos de várias fases. A quantidade de espiras e de enrolamentos diferentes entre cada uma das colunas do transformador e sua distribuição ao longo da janela prejudica a aplicação dos cálculos clássicos de dispersão.

Assim, foram feitas simplificações para o cálculo da distribuição dos fluxos, uma vez que é considerada corrente em apenas um enrolamento de cada vez. Também são consideradas regiões fictícias para a dispersão no ar, uma vez que o cálculo das indutâncias de dispersão seria extremamente difícil se considerada corrente simultânea em todos os enrolamentos existentes do transformador.

Para o referido cálculo da indutância de dispersão, foi adotado que em cada bobina existem duas áreas às quais são percorridas pelo fluxo disperso gerado tanto pelos enrolamentos do primário (externos), como pelos enrolamentos secundários (internos).

A Fig. 19 mostra a vista superior de uma das bobinas e apresenta as áreas adotadas para a dispersão do fluxo quando considerada corrente em apenas um dos enrolamentos do primário do transformador.

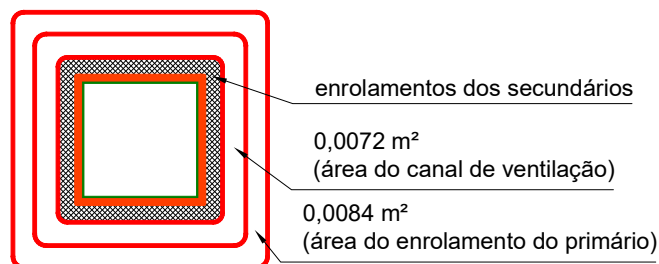
Figura 19 – Área considerada do fluxo disperso para corrente em um dos enrolamentos do primário



Fonte: O autor (2016).

A Fig. 20 mostra a vista superior de uma das bobinas e apresenta as áreas adotadas para a dispersão do fluxo quando considerada corrente em apenas um dos enrolamentos do secundário do transformador.

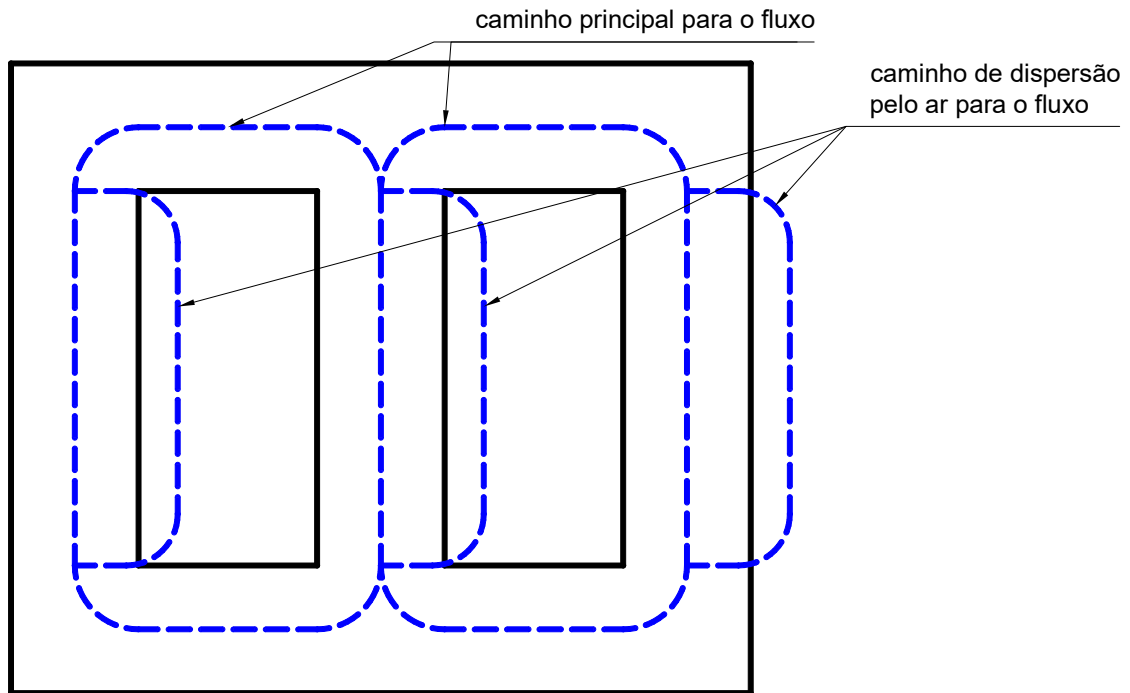
Figura 20 – Área considerada do fluxo disperso para corrente em um dos enrolamentos do secundário



Fonte: O autor (2016).

Adotada as regiões ilustradas anteriormente, a Fig. 21 representa as linhas de campo consideradas para o cálculo da distribuição dos fluxos magnéticos, tanto no núcleo do transformador como para o fluxo disperso no ar. A área de dispersão no ar, para corrente no primário, foi considerada como a soma das áreas mostradas na Fig. 19, ou seja,  $0,0213 \text{ m}^2$ , e para corrente no secundário como a soma das áreas da Fig. 20, ou seja,  $0,0156 \text{ m}^2$ .

Figura 21 – Linhas de campo para o fluxo magnético pelo núcleo e pelo ar



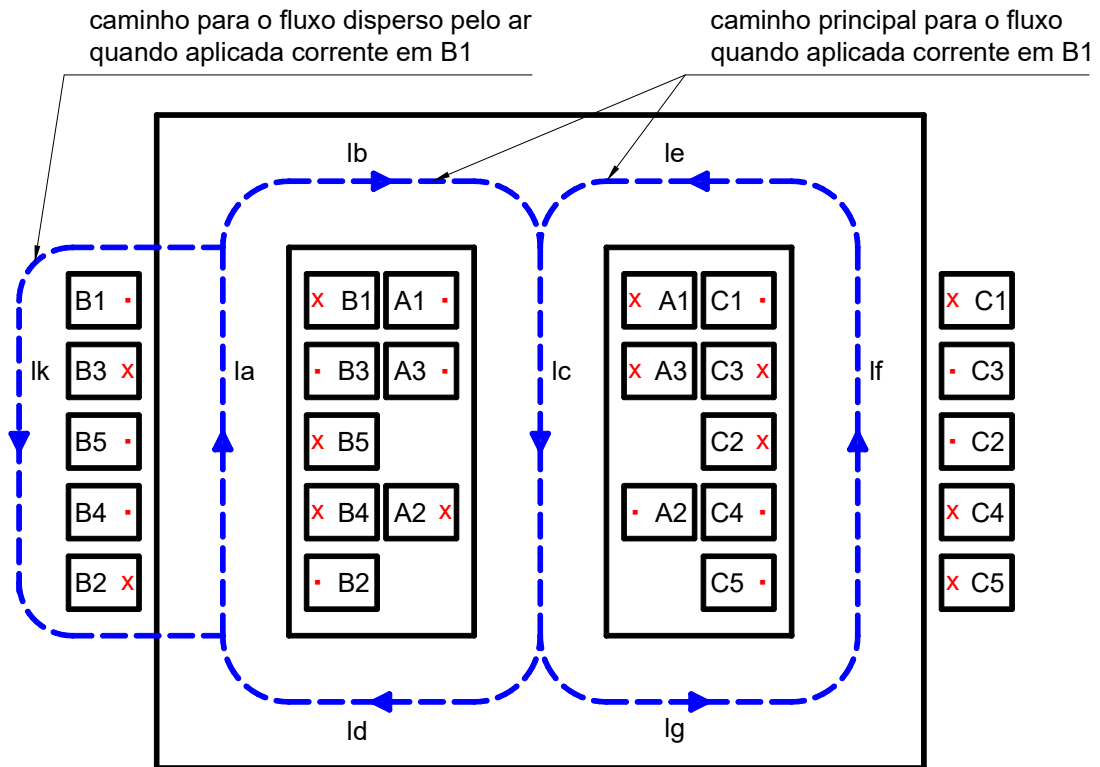
Fonte: O autor (2016).

### 3.2 CÁLCULO DAS INDUTÂNCIAS E RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS

Uma vez definidos os caminhos e as áreas para a distribuição dos fluxos magnéticos, foram calculados os fluxos para cada uma das 3 colunas do transformador e também para o fluxo disperso pelo ar, existindo sempre 3 caminhos fechados, conforme ilustrado na Fig. 22, que exemplifica o modelo utilizado para o cálculo dos fluxos em cada uma das 3 colunas ( $l_a, l_c, l_f$ ) do transformador, e também pelo ar ( $l_k$ ), todas indicadas na Fig. 22, quando considerada corrente em apenas um dos enrolamentos da coluna B de cada vez.

Os símbolos ( $\cdot$  e  $\times$ ), visualizados em cada enrolamento da Fig. 22, representam respectivamente a saída e a entrada da corrente no plano, considerando as ligações entre os enrolamentos do transformador.

Figura 22 – Modelo para cálculo dos fluxos para corrente nos enrolamentos da coluna B



Fonte: O autor (2016).

Através da lei de Ampère, ilustrada na Equação 21, são calculadas as equações para os 3 caminhos fechados quando considerada corrente no enrolamento B1, por exemplo, conforme mostra a Equação 22, sendo (N) o número de espiras do enrolamento com corrente, (I) o valor da corrente do enrolamento, (H) o valor da intensidade de campo magnético e (dl) o elemento de caminho percorrido pelo campo.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I \quad (21)$$

$$\begin{cases} N_{B1} \cdot I_{B1} = H_a \cdot l_a + H_b \cdot l_b + H_c \cdot l_c + H_d \cdot l_d \\ N_{B1} \cdot I_{B1} = H_a \cdot l_a + H_k \cdot l_k \\ 0 = H_c \cdot l_c + H_g \cdot l_g + H_f \cdot l_f + H_e \cdot l_e \end{cases} \quad (22)$$

Conforme a Equação 22, existem 3 equações, uma para cada um dos caminhos fechados ilustrados na Fig. 22, sendo cada trecho do caminho identificado com uma letra ( $l_a, l_b, l_c, l_d, l_e, l_f, l_g, l_k$ ) e possuindo um comprimento conforme visualizado nas Equações 23 à 25.

$$l_a = l_c = l_f = 0,278905 \text{ m} \quad (23)$$

$$l_b = l_d = l_e = l_g = 0,163905 \text{ m} \quad (24)$$

$$l_k = 0,22 \text{ m} \quad (25)$$

Analisando todos os caminhos percorridos pela intensidade de campo magnético (H), algumas simplificações são necessárias, considerando o fluxo magnético ( $\phi$ ) igual entre determinados trechos. Sendo  $\phi = B \times A$ , onde (B) é a indução magnética e (A) a seção por onde circula o fluxo, e ainda  $B = \mu H$ , onde ( $\mu$ ) é a permeabilidade magnética do meio, as Equações 26 à 28 demonstram essas simplificações. Isso se torna possível devido à construção do núcleo do transformador, que apresenta a mesma seção magnética em todo o núcleo e a permeabilidade que foi considerada constante.

$$\phi_b \approx \phi_d \therefore B_b A_{\text{ferro}} = B_d A_{\text{ferro}} \therefore \mu H_b A_{\text{ferro}} = \mu H_d A_{\text{ferro}} \therefore H_b = H_d \quad (26)$$

$$\phi_e \approx \phi_f \approx \phi_g \therefore H_e = H_f = H_g \quad (27)$$

$$\phi_f \approx \phi_c - \phi_d \therefore H_f = H_c - H_d \quad (28)$$

Outra simplificação, descrita na Equação 29, envolve o fluxo entre o núcleo do transformador e o disperso pelo ar. Como neste caso existem meios e áreas distintas, as Equações 30 e 31 apresentam respectivamente a permeabilidade magnética no vácuo e também a relativa no núcleo do transformador, que é calculada a partir da curva B x H característica da chapa de aço silício, disponível no Anexo, sendo a indução máxima ( $\hat{B}$ ) do projeto de 1,06 T e o valor correspondente da intensidade do campo (H) de 246 A/m.

$$\phi_a \approx \phi_d + \phi_k \therefore \mu H_a A_{\text{ferro}} = \mu H_d A_{\text{ferro}} + \mu_0 H_k A_{\text{ar}} \therefore H_d = H_a - H_k \left( \frac{A_{\text{ar}}}{\mu_r A_{\text{ferro}}} \right) \quad (29)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m} \quad (30)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1,06}{4\pi 10^{-7} \cdot 246} = \frac{0,00430951}{4\pi 10^{-7}} = 3428,95 \quad (31)$$

Substituindo as Equações de 26 à 29 na Equação 22, é simplificado o sistema com 3 equações para calcular os fluxos em todos os caminhos ( $\phi_a, \phi_c, \phi_f, \phi_k$ ), conforme mostrado na Equação 32.



$$\left\{ \begin{array}{l} N_{B1} \cdot I_{B1} = H_a(l_a + l_b + l_d) + H_c \cdot l_c - H_k(l_b + l_d) \left( \frac{A_{ar}}{\mu_r A_{ferro}} \right) \\ N_{B1} \cdot I_{B1} = H_a \cdot l_a + H_k \cdot l_k \\ 0 = -H_a(l_e + l_f + l_g) + H_c(l_c + l_e + l_f + l_g) + H_k(l_e + l_f + l_g) \left( \frac{A_{ar}}{\mu_r A_{ferro}} \right) \end{array} \right. \quad (32)$$

Considerando a corrente de 13,12 A para o enrolamento B1, equivalente a corrente nominal de fase do primário do transformador, tendo este enrolamento 172 espiras, e conhecendo a seção magnética do núcleo de 0,00523 m<sup>2</sup> e a seção para o fluxo disperso no ar de 0,0213 m<sup>2</sup> e ainda considerando os valores das Equações de 23 à 25 e as Equações 30 e 31, são calculados os fluxos para cada coluna do transformador e também para o disperso pelo ar, conforme visualizado na Equação 33.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_a = 2834,12 \text{ A/m} \therefore \phi_a = 0,06389 \text{ Wb} \\ H_c = 1936,16 \text{ A/m} \therefore \phi_c = 0,04365 \text{ Wb} \\ H_k = 6665,75 \text{ A/m} \therefore \phi_k = 0,000178 \text{ Wb} \\ H_f = -890,05 \text{ A/m} \therefore \phi_f = -0,02006 \text{ Wb} \end{array} \right. \quad (33)$$

Com os valores dos fluxos calculados é obtida, neste exemplo, a indutância própria do enrolamento B1, visualizada na Equação 34, assim como as indutâncias mútuas entre B1 e todos os outros 12 enrolamentos, exemplificada apenas entre B1 e A1 na Equação 35, assim como a parcela da indutância de dispersão gerada pela bobina B1, ilustrada na Equação 36.

$$L_{B1} = \frac{N_{B1} \phi_a}{I_{B1}} \therefore L_{B1} = \frac{172 \times 0,06389}{13,12} = 0,837 \text{ H} \quad (34)$$

$$M_{B1A1} = \frac{N_{A1} \phi_c}{I_{A1}} \therefore M_{B1A1} = \frac{172 \times -0,04365}{13,12} = -0,5722 \text{ H} \quad (35)$$

$$L_{dB1} = \frac{N_{B1} \phi_k}{I_{B1}} \therefore L_{dB1} = \frac{172 \times 0,000178}{13,12} = 2,34 \text{ mH} \quad (36)$$

O sinal negativo apresentado na Equação 35 é devido ao acoplamento entre os enrolamentos B1 e A1, pois ao circular corrente no enrolamento B1 o mesmo produz um fluxo que ao passar pelo enrolamento A1 induz um fluxo oposto ao gerado em B1, considerando o sentido do fluxo adotado como positivo em cada bobina.

De forma similar para as demais bobinas, foram calculadas as indutâncias próprias de todos os 10 enrolamentos secundários e também dos 3 enrolamentos que compõem o primário

do transformador, assim como as indutâncias mútuas entre todos os enrolamentos, além de incluir as indutâncias de dispersão no ar.

Para o cálculo das resistências ôhmicas foram considerados os comprimentos médios de cada enrolamento ( $L_m$ ), assim como seu respectivo número de espiras ( $N$ ), a seção do condutor ( $A_{fio}$ ) e a resistividade do fio ( $\rho$ ). A Equação 37 mostra como exemplo o cálculo do enrolamento B1. Todos os valores calculados foram referenciados a temperatura de 130 °C, considerando a temperatura ambiente de 40 °C e a elevação térmica de 90 °C projetada para o equipamento, totalizando os 130 °C. O cálculo para referenciar a resistência a temperatura de 130 °C é demonstrado na Equação 38.

$$R_{B1(20\text{ }^\circ\text{C})} = \frac{\rho \times L_m \times N}{A_{fio}} = \frac{0,0279 \times 0,47086 \times 172}{6,633} = 0,3406 \ \Omega \quad (37)$$

$$R_{B1(130\text{ }^\circ\text{C})} = \frac{130 + 225}{20 + 225} \times R_{B1(20\text{ }^\circ\text{C})} = 0,494 \ \Omega \quad (38)$$

A Tabela 3 apresenta os valores calculados das indutâncias próprias e das indutâncias de dispersão de cada enrolamento, assim como os valores das resistências ôhmicas calculadas.

**Tabela 3 – Indutâncias próprias, de dispersão e resistências ôhmicas calculadas**

<b>Enrolamento</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
Indutância Própria (H)	1,146	0,190	0,706
Indutância de Dispersão (H)	1,87x10 <sup>-3</sup>	2,27x10 <sup>-4</sup>	8,46x10 <sup>-4</sup>
Resistência à 130 °C (Ω)	0,491	0,097	0,394
<b>Enrolamento</b>	<b>B1 e C1</b>	<b>B2 e C2</b>	<b>B3 e C3</b>
Indutância Própria (H)	0,837	0,464	0,005
Indutância de Dispersão (H)	2,34x10 <sup>-3</sup>	9,49x10 <sup>-4</sup>	1,13x10 <sup>-5</sup>
Resistência à 130 °C (Ω)	0,494	0,356	0,039
<b>Enrolamento</b>	<b>B4 e C4</b>	<b>B5 e C5</b>	
Indutância Própria (H)	0,289	0,037	
Indutância de Dispersão (H)	5,91x10 <sup>-4</sup>	7,51x10 <sup>-5</sup>	
Resistência à 130 °C (Ω)	0,296	0,106	

Fonte: O autor (2016).

Os valores das indutâncias mútuas entre cada um dos enrolamentos podem ser representados através do acoplamento magnético entre as indutâncias, sendo este valor compreendido entre 0 e 1, sendo 0 para nenhum acoplamento e 1 para máximo acoplamento magnético. Para calcular o acoplamento entre 2 indutâncias é utilizada a Equação 39, onde o valor da indutância mútua é dividido pela raiz quadrada do produto entre as indutâncias próprias que geram esta mesma indutância mútua. A Equação 40 ilustra o cálculo do acoplamento entre os enrolamentos B1 e A1.

$$k = \frac{M}{\sqrt{(L_1 \times L_2)}} \quad (39)$$

$$k_{B_1A_1} = \frac{-0,5722}{\sqrt{(0,837 \times 1,146)}} = -0,584 \quad (40)$$

De posse dos valores das indutâncias próprias e suas respectivas indutâncias mútuas entre os demais enrolamentos, foram calculados todos os 58 acoplamentos. A Tabela 4 apresenta os valores destes acoplamentos entre cada um dos enrolamentos do transformador.

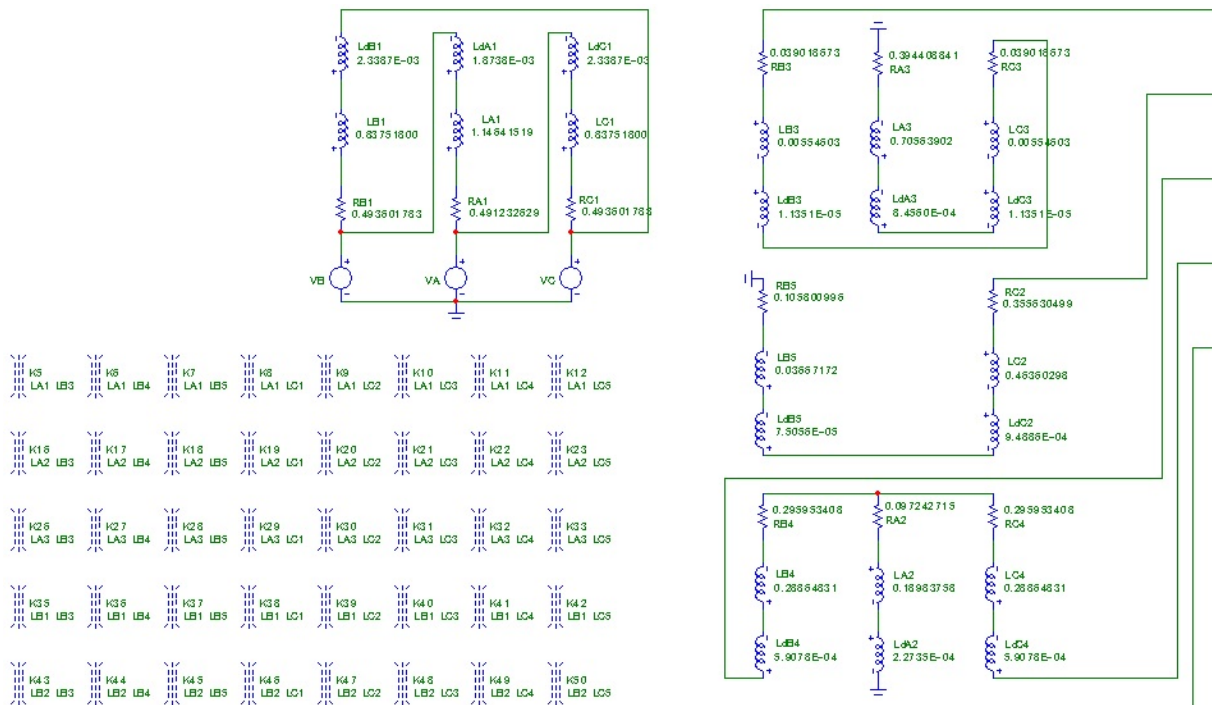
**Tabela 4 – Acoplamentos magnéticos entre cada um dos enrolamentos**

	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>B1 e C1</b>	<b>B2 e C2</b>	<b>B3 e C3</b>
<b>A1</b>	-1	1	-0,584	0,584	0,584
<b>A2</b>		-1	0,584	-0,584	-0,584
<b>A3</b>			-0,584	0,584	0,584
	<b>B4 e C4</b>	<b>B5 e C5</b>			
<b>A1</b>	-0,584	-0,584			
<b>A2</b>	0,584	0,584			
<b>A3</b>	-0,584	-0,584			
	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	
<b>B1</b>	-1	-1	1	1	
<b>B2</b>		1	-1	-1	
<b>B3</b>			-1	-1	
<b>B4</b>				1	
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>B1</b>	-0,314	0,314	0,314	-0,314	-0,314
<b>B2</b>	0,314	-0,314	-0,314	0,314	0,314
<b>B3</b>	0,314	-0,314	-0,314	0,314	0,314
<b>B4</b>	-0,314	0,314	0,314	-0,314	-0,314
<b>B5</b>	-0,314	0,314	0,314	-0,314	-0,314
	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	
<b>C1</b>	-1	-1	1	1	
<b>C2</b>		1	-1	-1	
<b>C3</b>			-1	-1	
<b>C4</b>				1	

Fonte: O autor (2016).

Com todos os valores calculados, montou-se o circuito elétrico no software Micro-Cap, ilustrado na Fig. 23, e realizaram-se as simulações computacionais com carga indutiva mais resistiva. Visto a inexistência de um modelo de indutâncias para o motor pentafásico, apenas foram apresentadas simulações utilizando carga indutiva e resistiva.

Figura 23 – Circuito do modelo montado no software Micro-cap



Fonte: O autor (2016).

### 3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MODELO

O principal objetivo da simulação com carga indutiva mais resistiva é a verificação do equilíbrio de tensão em cada fase do secundário para carga equilibrada, desequilibrada e principalmente diante da abertura de uma das fases do secundário. Para tal, foi considerada uma impedância de  $23,6 \Omega$  por fase, valor este correspondente à circulação de corrente nominal nos secundários, sendo metade do valor da impedância indutiva e a outra resistiva, ou seja, uma indutância de  $44,298 \text{ mH}$  em série com uma resistência de  $16,7 \Omega$  em cada fase. Nesta primeira simulação a carga foi conectada em estrela, sendo seu neutro conectado ao neutro do secundário do transformador.

As tensões dos secundários com a carga equilibrada tiveram regulação de tensão média ( $R_{tm}$ ) de  $7,32 \%$ , cálculo realizado conforme a Equação 41, sendo a maior parcela de queda atribuída a resistência dos enrolamentos do transformador, e o restante à indutância de dispersão no ar.

$$R_{tm} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(V_0^i - V_L^i)}{V_L^i}}{N} \quad (41)$$

Para a Equação 41, as siglas utilizadas representam:

- $R_{tm}$ : regulação de tensão média;
- N: quantidade de secundários do transformador, neste caso 5;
- $V_0^i$ : módulo da tensão de operação do secundário i sem carga, ou seja, tensão a vazio;
- $V_L^i$ : módulo da tensão de operação do secundário i com carga;

A Tabela 5 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, quando conectada à carga equilibrada.

**Tabela 5 – Tensão e corrente para carga equilibrada**

Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	205,28	29,8	8,69	164,8
2	204,23	-42,5	8,65	92,4
3	205,39	-114,3	8,70	20,7
4	204,57	173,4	8,66	-51,6
5	204,46	101,4	8,66	-123,6

Fonte: O autor (2016).

Como podem ser observados, os valores de tensão, apesar de apresentarem um valor inferior ao nominal de 220 V devido à queda de tensão ocasionada pela resistência dos enrolamentos aliada as indutâncias de dispersão, possuem valores muito próximos entre si, e podem ser considerados equilibrados. Assim como a tensão, as correntes de cada secundário também estão equilibradas. É importante observar que os ângulos entre cada um dos secundários se mantem com a diferença muito próxima aos 72°.

Outra forma para avaliar o equilíbrio de tensão é a utilização da norma (NEMA MG-1, 2014), que define o fator de desequilíbrio de tensão como sendo a relação entre o máximo desvio da tensão média e a tensão média, dado em percentual conforme a Equação 42. O valor considerado aceitável para o desequilíbrio de tensão em boa parte das normas internacionais e nacionais é de 2 %, sendo este o valor considerado nas simulações e ensaios.

$$F_D = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100 \quad (42)$$

Para a Equação 42, as siglas utilizadas representam:

- $F_D$ : fator de desequilíbrio de tensão NEMA;
- $\Delta U$ : máximo desvio em relação a tensão média;
- $U_m$ : tensão média;

Considerando as tensões simuladas dos secundários mostradas na Tabela 5 e executando o cálculo do fator de desequilíbrio da Equação 42, tem-se o valor de 0,3 %, conforme Equação 43, mostrando o reduzido desequilíbrio de tensão entre os secundários.

$$F_D = \frac{205,39 - 204,79}{204,79} \times 100 = 0,3 \% \quad (43)$$

Após a avaliação das tensões e correntes do conversor para uma carga equilibrada, foram simuladas aberturas de fases para cada um dos secundários, com o objetivo de avaliar o comportamento do conversor frente a falhas na carga. A Tabela 6 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, frente a essas aberturas nas respectivas 5 fases com carga equilibrada. Também são apresentados os valores das regulações médias ( $R_{tm}$ ) e os fatores de desequilíbrios ( $F_D$ ) das tensões dos secundários que permanecem conectadas à carga.

Nota-se que ao abrir uma das fases da carga, provocando uma falha na alimentação da mesma, as tensões ainda conectadas à carga permanecem próximas entre si, passando a apresentar um fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) máximo de 1,01 %, valor esse maior quando comparado ao valor com as 5 fases conectadas, mas inferior ao limite de 2 % estabelecido pela norma. Embora o fator de desequilíbrio das 4 tensões dos secundários ainda conectados à carga tenha aumentado, o valor da regulação média ( $R_{tm}$ ) dos mesmos foi menor que a regulação média das 5 fases conectadas, ou seja, as tensões dos secundários tiveram uma pequena elevação de seus módulos. Apesar disso, os ângulos das tensões permaneceram com a defasagem de aproximadamente  $72^\circ$  entre si. A consequência da abertura de uma das fases do secundário pode ser observada pelo valor da corrente na conexão de alimentação do primário do transformador, que se torna desequilibrada para manter o equilíbrio de tensão em seus secundários.

Tabela 6 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga equilibrada

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	V1	214,22	29,8		
	V2	204,40	-42,3	8,65	92,7
	V3	208,03	-114,7	8,81	20,3
	V4	206,56	174,0	8,75	-51,0
	V5	204,84	101,2	8,67	-123,8
	R <sub>tm</sub>	6,72 %	F <sub>D</sub>	1,01 %	
2	V1	205,65	29,6	8,71	164,6
	V2	213,74	-42,3		
	V3	205,46	-114,0	8,70	21,0
	V4	207,74	173,1	8,80	-51,9
	V5	206,47	102,1	8,74	-122,9
	R <sub>tm</sub>	6,49 %	F <sub>D</sub>	0,68 %	
3	V1	207,27	30,4	8,78	165,4
	V2	204,95	-42,9	8,68	92,1
	V3	213,60	-114,2		
	V4	205,15	174,0	8,69	-51,0
	V5	207,63	101,1	8,79	-123,9
	R <sub>tm</sub>	6,60 %	F <sub>D</sub>	0,67 %	
4	V1	207,89	29,4	8,80	164,4
	V2	206,35	-41,8	8,74	93,2
	V3	206,14	-114,9	8,73	20,1
	V4	212,75	173,6		
	V5	204,52	101,8	8,66	-123,2
	R <sub>tm</sub>	6,60 %	F <sub>D</sub>	0,83 %	
5	V1	205,45	30,0	8,70	165,0
	V2	207,13	-42,9	8,77	92,1
	V3	207,53	-113,6	8,79	21,4
	V4	205,29	173,1	8,69	-51,9
	V5	213,97	101,6		
	R <sub>tm</sub>	6,49 %	F <sub>D</sub>	0,57 %	

Fonte: O autor (2016).

A Tabela 7 apresenta os valores de corrente de sequência zero, positiva e negativa na alimentação do primário do transformador quando ocorre a abertura de uma fase na carga equilibrada.

**Tabela 7 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga equilibrada**

Abertura na fase	Corrente de Sequência	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	zero	0	
	positiva	18,05	132,7
	negativa	4,36	12,2
2	zero	0,01	-170,3
	positiva	18,07	132,8
	negativa	4,20	-126,9
3	zero	0	
	positiva	18,08	132,8
	negativa	4,09	84,0
4	zero	0	
	positiva	18,08	132,8
	negativa	4,40	-57,1
5	zero	0	
	positiva	18,08	132,8
	negativa	4,00	159,0

Fonte: O autor (2016).

Para avaliar o equilíbrio do transformador alimentando uma carga indutiva mais resistiva desequilibrada, foi realizada uma segunda simulação sendo considerada a mesma impedância para a fase 1, 10 % a mais para as fases 2 e 4 e 10 % a menos para as fases 3 e 5. As tensões dos secundários com a carga desequilibrada tiveram regulação de tensão média de 7,39 %. A Tabela 8 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, quando conectada à carga desequilibrada.

**Tabela 8 – Tensão e corrente para carga desequilibrada**

Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	205,31	29,6	8,69	164,6
2	204,87	-42,4	7,89	92,6
3	204,37	-114,4	9,62	20,6
4	205,43	173,4	7,91	-51,6
5	203,30	101,5	9,56	-123,5

Fonte: O autor (2016).

Novamente as tensões dos secundários possuem valores muito próximos entre si, e podem ser consideradas equilibradas, apesar das correntes de cada secundário obedecerem as necessidades da carga que agora é desequilibrada. Também ocorre aqui a diferença de 72° entre os ângulos de cada um dos secundários. Da mesma forma que com carga equilibrada, o fator de desequilíbrio de tensão para carga desequilibrada mostrou-se baixo, com valor de 0,66 %, mostrando o equilíbrio das tensões dos secundários do transformador quando alimentando carga desequilibrada.



Para as mesmas aberturas realizadas com a carga equilibrada, foram repetidas com a carga desequilibrada. A Tabela 9 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, frente a aberturas nas respectivas fases com carga desequilibrada. Também são apresentados os valores das regulações médias ( $R_{tm}$ ) e os fatores de desequilíbrios ( $F_D$ ) das tensões dos secundários que permanecem conectadas à carga.

**Tabela 9 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga desequilibrada**

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	V1	214,26	29,6		
	V2	205,03	-42,2	7,89	92,8
	V3	206,99	-114,8	9,74	20,2
	V4	207,43	174,0	7,98	-51,0
	V5	203,66	101,3	9,58	-123,7
	$R_{tm}$	6,82 %	$F_D$	1,03 %	
2	V1	205,66	29,4	8,71	164,4
	V2	213,53	-42,2		
	V3	204,43	-114,1	9,62	20,9
	V4	208,34	173,1	8,02	-51,9
	V5	205,12	102,1	9,65	-122,9
	$R_{tm}$	6,72 %	$F_D$	1,19 %	
3	V1	207,52	30,3	8,79	165,3
	V2	205,65	-42,7	7,92	92,3
	V3	213,44	-114,3		
	V4	206,07	174,0	7,93	-51,0
	V5	206,78	101,1	9,73	-123,9
	$R_{tm}$	6,46 %	$F_D$	0,49 %	
4	V1	207,69	29,3	8,79	164,3
	V2	206,81	-41,7	7,96	93,3
	V3	205,05	-114,9	9,65	20,1
	V4	212,89	173,5		
	V5	203,36	101,8	9,57	-123,2
	$R_{tm}$	6,86 %	$F_D$	1,15 %	
5	V1	205,50	29,9	8,70	164,9
	V2	208,08	-42,8	8,01	92,2
	V3	206,71	-113,6	9,73	21,4
	V4	206,23	173,1	7,94	-51,9
	V5	213,81	101,7		
	$R_{tm}$	6,34 %	$F_D$	0,70 %	

Fonte: O autor (2016).

Mesmo as demais fases estando submetidas a cargas diferentes entre si, próprias de um sistema desequilibrado, as tensões nos secundários com carga desequilibrada e ainda conectada apresentaram um fator de desequilíbrio de tensão ( $F_D$ ) máximo de 1,19 %, ou seja, mantiveram equilíbrio em suas tensões secundárias, mantendo inclusive os ângulos de

defasagem entre as fases de aproximadamente  $72^\circ$ . Da mesma forma que com carga equilibrada, apresentaram uma melhora no valor da regulação média ( $R_{tm}$ ) dos 4 enrolamentos ainda conectados à carga, novamente surgindo correntes na conexão de alimentação do primário do transformador desequilibradas, para possibilitar o equilíbrio dos secundários. A Tabela 10 apresenta os valores de corrente de sequência zero, positiva e negativa na alimentação do primário do transformador quando ocorre a abertura de uma fase na carga desequilibrada.

**Tabela 10 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga desequilibrada**

Abertura na fase	Corrente de Sequência	Corrente (A)	Ângulo de Corrente ( $^\circ$ )
1	zero	0	
	positiva	18,21	132,7
	negativa	4,62	-3,8
2	zero	0	
	positiva	18,60	132,8
	negativa	4,71	-114,2
3	zero	0	
	positiva	17,80	132,7
	negativa	3,40	76,1
4	zero	0	
	positiva	18,60	132,8
	negativa	5,25	-61,2
5	zero	0	
	positiva	17,79	132,8
	negativa	3,82	174,4

Fonte: O autor (2016).

Diante das simulações aqui realizadas é demonstrada que a resistência elétrica dos enrolamentos, aliada a indutância de dispersão ocasionada pelo fluxo disperso no ar, ocasiona uma queda de tensão uniforme em todos os secundários, mantendo equilibradas as tensões dos mesmos, diante de carga equilibrada, desequilibrada e até mesmo para aberturas em uma das fases do secundário. Além disso, confirma que tanto os ângulos das tensões do secundário, como os ângulos das correntes dos secundários, mantêm-se com a diferença entre cada uma das fases de aproximadamente  $72^\circ$ .

Outro aspecto analisado durante as simulações anteriores, foi a indução máxima nas 3 colunas do transformador, principalmente quando este tem apenas 4 dos seus 5 secundários alimentando uma carga, gerando as correntes desbalanceadas no primário do transformador. A Tabela 11 mostra os valores máximos calculados das induções magnéticas presentes nas três

colunas do transformador durante meio ciclo (8,33 ms) quando alimentando uma carga equilibrada.

**Tabela 11 – Valores máximos calculados da indução nas 3 colunas com carga equilibrada**

Abertura na fase	Coluna B (T)	Coluna A (T)	Coluna C (T)
sem abertura	1,0386	1,0379	1,0422
1	1,0398	1,05	1,0459
2	1,0438	1,036	1,0483
3	1,0427	1,0449	1,0423
4	1,0405	1,0389	1,0503
5	1,0489	1,0402	1,0424

Fonte: O autor (2016).

Independente da abertura das fases, a indução magnética presente nas 3 colunas do transformador não ultrapassou o valor do projeto de 1,06 T, garantindo que não ocorrerá saturação do núcleo e principalmente mantendo os níveis de perdas no núcleo iguais.

Da mesma forma foi calculada a indução quando o transformador alimenta uma carga desequilibrada. A Tabela 12 apresenta os valores máximos calculados das induções magnéticas presentes nas três colunas do transformador durante meio ciclo (8,33 ms) quando alimentando uma carga desequilibrada.

**Tabela 12 – Valores máximos calculados da indução nas 3 colunas com carga desequilibrada**

Abertura na fase	Coluna B (T)	Coluna A (T)	Coluna C (T)
sem abertura	1,0379	1,0352	1,0434
1	1,0386	1,0487	1,0474
2	1,0425	1,0354	1,0499
3	1,0412	1,0443	1,0439
4	1,039	1,0369	1,0511
5	1,0476	1,0384	1,0432

Fonte: O autor (2016).

Também para carga desequilibrada, a indução magnética presente nas 3 colunas do transformador não ultrapassou o valor do projeto de 1,06 T. As induções magnéticas máximas em cada coluna foram calculadas através da somatória de todos os fluxos concatenados gerados pela passagem de corrente nos 13 enrolamentos. Sendo considerada uma indutância própria, 12 mútuas e a indutância de dispersão. O incremento de tempo utilizado foi de 0,556 ms e variou de 0 à 8,33 ms. Dentro deste espaço de tempo, os máximos valores por coluna foram extraídos.

Nas simulações a seguir, foi alterado um detalhe bem significativo, a fim de analisar a mudança de comportamento do transformador conversor de fases. O neutro da carga, anteriormente conectado ao neutro do transformador, agora é suprimido, eliminando este

caminho de retorno da corrente. Isso foi feito para avaliar o comportamento do conversor diante da alimentação de cargas sem neutro, como por exemplo um motor elétrico. As mesmas análises foram realizadas novamente, para a mesma carga equilibrada e para a mesma carga desequilibrada.

A Tabela 13 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, quando conectada à carga equilibrada sem o neutro.

**Tabela 13 – Tensão e corrente para carga equilibrada sem o neutro**

Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	205,28	29,8	8,69	164,8
2	204,23	-42,6	8,65	92,4
3	205,39	-114,3	8,70	20,7
4	204,57	173,4	8,67	-51,5
5	204,46	101,4	8,65	-123,6

Fonte: O autor (2016).

Analisando os valores encontrados, sendo os mesmos similares aos já apresentados na Tabela 5, pode-se afirmar que para uma carga equilibrada sem o neutro, tanto as tensões como as correntes se comportam de maneira semelhante, independente da conexão do neutro da carga ao neutro do secundário do transformador.

Novamente foram simuladas aberturas de fases para cada um dos secundários, com o objetivo de avaliar o comportamento do conversor frente a falhas na carga, agora sem o neutro conectado. A Tabela 14 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, frente a essas aberturas nas respectivas 5 fases com carga equilibrada sem o neutro. Também são apresentados os valores das regulações médias ( $R_{tm}$ ) e os fatores de desequilíbrios ( $F_D$ ) das tensões dos secundários que permanecem conectadas à carga.

Tabela 14 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga equilibrada sem o neutro

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	V1	215,26	29,8		
	V2	203,93	-42,6	9,57	105,5
	V3	209,74	-115,0	7,14	30,6
	V4	208,28	174,4	7,09	-61,4
	V5	204,61	101,5	9,63	-136,5
	R <sub>tm</sub>	6,38 %	F <sub>D</sub>	1,50 %	
2	V1	205,58	29,9	9,64	151,9
	V2	214,83	-42,3		
	V3	204,90	-114,2	9,63	33,7
	V4	209,60	172,8	7,14	-41,6
	V5	208,14	102,4	7,08	-133,2
	R <sub>tm</sub>	6,12 %	F <sub>D</sub>	1,23 %	
3	V1	208,93	30,7	7,11	155,1
	V2	204,81	-42,6	9,63	79,5
	V3	214,31	-114,1		
	V4	204,72	173,8	9,62	-38,2
	V5	209,47	100,8	7,13	-113,7
	R <sub>tm</sub>	6,23 %	F <sub>D</sub>	1,20 %	
4	V1	209,43	29,1	7,14	174,7
	V2	208,03	-41,5	7,08	82,9
	V3	206,05	-114,6	9,68	7,6
	V4	213,45	173,6		
	V5	204,02	101,5	9,57	-110,5
	R <sub>tm</sub>	6,26 %	F <sub>D</sub>	1,38 %	
5	V1	204,89	29,8	9,62	177,8
	V2	208,91	-43,2	7,11	102,4
	V3	209,29	-113,2	7,12	11,2
	V4	205,18	173,4	9,65	-64,5
	V5	215,07	101,7		
	R <sub>tm</sub>	6,13 %	F <sub>D</sub>	1,07 %	

Fonte: O autor (2016).

Ao provocar as mesmas aberturas das fases da carga, porém agora eliminando o retorno de corrente através do neutro da carga, observa-se que as tensões ainda conectadas a carga sofrem maior desequilíbrio quando comparadas as tensões apresentadas na Tabela 6. Isso pode ser avaliado quando comparado o fator de desequilíbrio (F<sub>D</sub>) máximo de 1,50 % quando da falta na fase 1, sendo esse valor maior do que o encontrado de 1,01 %, obtido com o neutro da carga conectado. Mesmo assim, pode-se dizer que as tensões estão equilibradas, pois o fator de desequilíbrio está abaixo do limite de 2 % estabelecido pela norma. É importante salientar que apesar do aumento do desequilíbrio de tensão, os ângulos das tensões permaneceram com a defasagem de aproximadamente 72° entre si. Diferentemente do que ocorreu com a tensão sem a presença do neutro, as correntes nos secundários apresentaram

módulos e ângulos distintos para cada fase e diferentes dos apresentados na Tabela 6. Novamente a corrente na conexão de alimentação do primário do transformador tornou-se desequilibrada para manter o equilíbrio de tensão em seus secundários. A Tabela 15 apresenta os valores de corrente de sequência zero, positiva e negativa na alimentação do primário do transformador quando ocorre a abertura de uma fase na carga equilibrada sem o neutro.

**Tabela 15 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga equilibrada sem o neutro**

Abertura na fase	Corrente de Sequência	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	zero	0	
	positiva	16,97	132,5
	negativa	5,44	12,7
2	zero	0	
	positiva	17,00	132,7
	negativa	5,28	-127,5
3	zero	0	
	positiva	17,01	132,6
	negativa	5,17	84,5
4	zero	0	
	positiva	17,01	132,6
	negativa	5,47	-57,2
5	zero	0	
	positiva	17,00	132,7
	negativa	5,07	158,9

Fonte: O autor (2016).

Ao comparar com a simulação com neutro, apresentada na Tabela 7, com a retirada do neutro da carga ocorreu um aumento da corrente de sequência negativa e uma diminuição da corrente de sequência positiva, ou seja, comprovando o maior desequilíbrio na corrente.

Utilizando a carga desequilibrada já mencionada anteriormente, foi realizada nova simulação com a retirada do neutro da carga. A Tabela 16 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, quando conectada à carga desequilibrada sem o neutro.

**Tabela 16 – Tensão e corrente para carga desequilibrada sem o neutro**

Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão (°)	Corrente (A)	Ângulo de Corrente (°)
1	205,32	29,7	8,71	163,8
2	204,80	-42,4	8,00	92,4
3	204,32	-114,4	9,69	21,3
4	205,48	173,4	7,83	-51,0
5	203,38	101,5	9,44	-123,8

Fonte: O autor (2016).

A retirada do neutro, neste caso, não alterou o comportamento do conversor, que apresentou valores de tensões e correntes similares aos mostrados na Tabela 8, mantendo as diferenças de  $72^\circ$  dos ângulos de cada um dos secundários.

Para as mesmas aberturas realizadas com a carga desequilibrada com o neutro, foram repetidas com a carga desequilibrada sem o neutro. A Tabela 17 mostra os valores eficazes de tensão e seus respectivos ângulos, assim como os valores eficazes de corrente e seus respectivos ângulos, frente a essas aberturas nas respectivas 5 fases com carga desequilibrada sem o neutro. Também são apresentados os valores das regulações médias ( $R_{tm}$ ) e os fatores de desequilíbrios ( $F_D$ ) das tensões dos secundários que permanecem conectadas à carga.

**Tabela 17 – Tensão e corrente para abertura nas fases com carga desequilibrada sem o neutro**

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)	Ângulo de Tensão ( $^\circ$ )	Corrente (A)	Ângulo de Corrente ( $^\circ$ )
1	V1	215,32	29,7		
	V2	204,55	-42,4	8,86	105,2
	V3	208,65	-115,2	8,01	31,4
	V4	209,21	174,3	6,38	-60,5
	V5	203,46	101,6	10,49	-136,9
	$R_{tm}$	6,47 %	$F_D$	1,46 %	
2	V1	205,60	29,7	9,57	152,3
	V2	214,55	-42,1		
	V3	203,84	-114,4	10,61	33,0
	V4	210,02	172,8	6,59	-42,2
	V5	206,84	102,5	7,87	-132,5
	$R_{tm}$	6,37 %	$F_D$	1,67 %	
3	V1	209,43	30,7	6,98	152,1
	V2	205,54	-42,5	9,07	78,2
	V3	214,44	-114,2		
	V4	205,66	173,8	8,85	-35,9
	V5	209,31	100,8	7,51	-112,3
	$R_{tm}$	5,97 %	$F_D$	0,94 %	
4	V1	208,98	29,1	7,32	172,0
	V2	208,00	-41,4	6,75	84,4
	V3	204,91	-114,7	10,60	9,7
	V4	213,33	173,6		
	V5	202,95	101,6	10,28	-112,0
	$R_{tm}$	6,62 %	$F_D$	1,58 %	
5	V1	204,88	29,7	9,75	178,2
	V2	209,86	-43,1	6,45	103,6
	V3	208,74	-113,2	7,73	10,8
	V4	206,15	173,4	8,83	-65,4
	V5	215,03	101,8		
	$R_{tm}$	5,95 %	$F_D$	1,22 %	

Fonte: O autor (2016).

Com a retirada do neutro da carga, novamente as tensões ainda conectadas sofrem maior desequilíbrio quando comparadas as tensões apresentadas na Tabela 9, na qual o neutro da carga estava conectado ao neutro do secundário do transformador. O valor máximo do fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) foi de 1,19 % (com o neutro) para 1,67 %, porém ainda abaixo do limite de 2 % da norma e, portanto, admite-se que as tensões estão equilibradas. Também neste caso, os ângulos das tensões permaneceram com a defasagem de aproximadamente  $72^\circ$  entre si.

Ocorre novamente o surgimento de correntes desequilibradas na conexão de alimentação do primário do transformador. A Tabela 18 apresenta os valores de corrente de sequência zero, positiva e negativa na alimentação do primário do transformador quando ocorre a abertura de uma fase na carga desequilibrada sem o neutro.

**Tabela 18 – Corrente de sequência primária para abertura de uma fase com carga desequilibrada sem o neutro**

Abertura na fase	Corrente de Sequência	Corrente (A)	Ângulo de Corrente ( $^\circ$ )
1	zero	0	
	positiva	17,12	132,6
	negativa	5,70	-1,8
2	zero	0	
	positiva	17,60	132,7
	negativa	5,68	-117,1
3	zero	0	
	positiva	16,37	132,6
	negativa	4,80	81,1
4	zero	0	
	positiva	17,83	132,7
	negativa	6,01	-59,8
5	zero	0	
	positiva	16,60	132,7
	negativa	4,97	170,0

Fonte: O autor (2016).

Da mesma forma que para a carga equilibrada sem o neutro, houve um aumento do desequilíbrio de corrente.

Considerando os resultados das simulações realizadas, pode-se afirmar que o conversor projetado mantém o equilíbrio de tensão em seus secundários, independentemente da carga conectada ao mesmo, com ou sem o neutro conectado e, principalmente, diante de falhas em uma das fases da carga. Mesmo com o aumento dos fatores de desequilíbrios das tensões ao abrir uma das fases da carga, o valor calculado está abaixo do limite estabelecido pela norma (NEMA MG-1, 2014).



Os valores máximos de indução magnética nas 3 colunas do transformador, quando desconectado o neutro da carga, apresentaram coerências aos apresentados nas Tabelas 11 e 12, não superando o valor nominal do projeto do conversor.

## 4 COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, apresentam-se os testes realizados no protótipo construído do conversor eletromagnético de 3 para 5 fases, com o intuito de avaliar o comportamento das tensões e correntes do mesmo, principalmente diante das falhas das fases da carga, e validar os resultados obtidos nas simulações desenvolvidas através do modelo criado.

### 4.1 AVALIAÇÃO DOS VALORES NOMINAIS DO PROTÓTIPO

Inicialmente, foram verificados todos os valores das tensões a vazio dos secundários quando aplicada tensão nominal nos terminais primários do transformador, a fim de calcular os desvios de relação de tensão do conversor, ou seja, a diferença entre o valor real medido e o valor calculado de cada secundário para obter a tensão nominal dos 5 secundários do conversor através da soma fasorial. Para isso, foram realizados dois ensaios sem nenhuma carga conectada aos secundários do transformador, com o primário conectado em delta e com tensão nominal de 254 V. Utilizando uma fonte ligada ao primário do transformador, foram aplicadas no ensaio 1 as tensões de 253,6 V entre  $\bar{V}_{ab}$ , 255,5 V entre  $\bar{V}_{bc}$  e de 251 V entre  $\bar{V}_{ca}$ , e no ensaio 2 as tensões de 253,5 V entre  $\bar{V}_{ab}$ , 254 V entre  $\bar{V}_{bc}$  e de 256 V entre  $\bar{V}_{ca}$ . As identificações mencionadas anteriormente seguem as mostradas na Fig. 15.

A Tabela 19 mostra os valores das tensões medidas nos 2 ensaios. São apresentados os desvios de relação de tensão de cada enrolamento individualmente, assim como o desvio de relação de tensão após o agrupamento destes mesmos enrolamentos para formar cada uma das 5 tensões do secundário do conversor, sendo esta a de maior importância para o conversor e para a carga. Também são apresentados a média dos valores das tensões dos 5 secundários e o respectivo fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão.

Pode-se observar que o desvio máximo encontrado nas 5 tensões do secundário do conversor é de 0,59 % no ensaio 1 e de 0,67 % no ensaio 2 para os enrolamentos 5 e 2, respectivamente, com um desvio de 0,51 % para o enrolamento 3 no ensaio 1, e todos os demais desvios abaixo de 0,5 %. Ainda que alguns secundários em cada ensaio, mostrados na Tabela 19, apresente um desvio acima do valor prescrito na norma (ABNT NBR 5356-11, 2016) para os ensaios de relação de tensão a vazio de  $\pm 0,5$  %, o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão calculado define as tensões dos 5 secundários do conversor como equilibrada.

Tabela 19 – Desvio de relação de tensão dos secundários a vazio

Secundário	Enrolamento	Tensão Calculada (V)	Tensão Medida (V)		Desvio 1	Desvio 2
			Ensaio 1	Ensaio 2		
<b>1</b>	A3	199,39	199,20	198,80	-0,09 %	-0,29 %
	B3	20,68	20,80	20,60	0,59 %	-0,37 %
	C3	20,68	20,50	20,80	-0,86 %	0,59 %
		<b>220,06</b>	<b>219,85</b>	<b>219,50</b>	<b>-0,10 %</b>	<b>-0,26 %</b>
<b>2</b>	B5	53,17	53,80	53,40	1,19 %	0,43 %
	C2	189,05	187,80	190,40	-0,66 %	0,71 %
		<b>220,50</b>	<b>219,70</b>	<b>221,97</b>	<b>-0,36 %</b>	<b>0,67 %</b>
<b>3</b>	B4	149,17	150,20	149,40	0,69 %	0,15 %
	A2	103,39	103,60	103,20	0,21 %	-0,18 %
		<b>219,92</b>	<b>221,03</b>	<b>219,97</b>	<b>0,51 %</b>	<b>0,03 %</b>
<b>4</b>	C4	149,17	148,50	150,30	-0,45 %	0,76 %
	A2	103,39	103,60	103,20	0,21 %	-0,18 %
		<b>219,92</b>	<b>219,48</b>	<b>220,80</b>	<b>-0,20 %</b>	<b>0,40 %</b>
<b>5</b>	B2	189,05	190,50	189,00	0,77 %	-0,03 %
	C5	53,17	53,00	53,70	-0,32 %	1,00 %
		<b>220,50</b>	<b>221,80</b>	<b>220,80</b>	<b>0,59 %</b>	<b>0,14 %</b>
<b>Média dos 5 secundários</b>		<b>220,18</b>	<b>220,37</b>	<b>220,61</b>		
<b>Fator de equilíbrio (F<sub>D</sub>)</b>		<b>0,144 %</b>	<b>0,649 %</b>	<b>0,617 %</b>		
<b>NEMA</b>						

Fonte: O autor (2016).

Outras informações analisadas, através das medições do protótipo, foram os valores das resistências ôhmicas de todos os enrolamentos. A Tabela 20 mostra os valores medidos na temperatura de 18,4 °C, sendo os mesmos referenciados à temperatura de 130 °C para o cálculo do desvio considerando os valores calculados e já apresentados na Tabela 3.

Tabela 20 – Desvio entre o valor da resistência dos enrolamentos medida x calculada

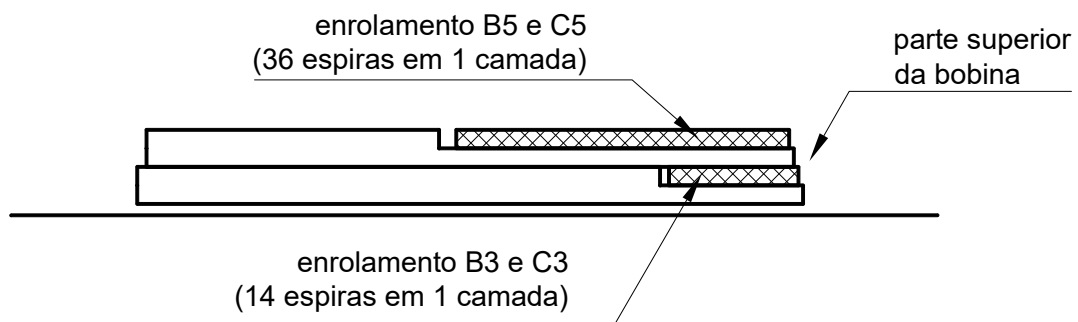
Enrolamento / número de espiras	Resistência Medida		Calculada $\Omega$ à 130 °C	Desvio
	$\Omega$ à 18,4 °C	$\Omega$ à 130 °C		
A1 / 172	0,39375	0,57429	0,49123	-14,46 %
A2 / 70	0,06682	0,09746	0,09724	-0,22 %
A3 / 135	0,27684	0,40377	0,39441	-2,32 %
B1 / 172	0,39711	0,57919	0,49360	-14,78 %
B2 / 128	0,23749	0,34638	0,35563	2,67 %
B3 / 14	0,03029	0,04418	0,03902	-11,68 %
B4 / 101	0,20784	0,30314	0,29595	-2,37 %
B5 / 36	0,08030	0,11712	0,10580	-9,66 %
C1 / 172	0,39878	0,58162	0,49360	-15,13 %
C2 / 128	0,23873	0,34819	0,35563	2,14 %
C3 / 14	0,03077	0,04488	0,03902	-13,06 %
C4 / 101	0,20850	0,30410	0,29595	-2,68 %
C5 / 36	0,08082	0,11788	0,10580	-10,25 %

Fonte: O autor (2016).

Para compreender melhor os desvios encontrados para os valores das resistências de cada enrolamento, é necessário analisar a distribuição de espiras em cada bobina. Por exemplo, para os enrolamentos A1, B1 e C1, é importante frisar que os mesmos são compostos por 2 enrolamentos ligados em série, tendo 86 espiras cada. Sendo assim, o comprimento dos cabos na entrada e saída de cada enrolamento contribuem para um maior desvio entre o valor do comprimento medido e o calculado. Além disso, esses enrolamentos sofrem influência relacionada à sua posição, pois são bobinados externamente, ou seja, sobre os canais de ventilação e dos enrolamentos internos, sofrendo aumentos radiais conforme a acomodação dos enrolamentos anteriores.

Já para os enrolamentos B3 e C3, que possuem 14 espiras e os para enrolamentos B5 e C5, que possuem 36 espiras, a explicação deve-se a necessidade de transposição dos fios ocorrida durante a bobinagem, conforme pode ser observado na Fig. 24.

Figura 24 – Visualização da transposição dos enrolamentos B3 e C3 e de B5 e C5

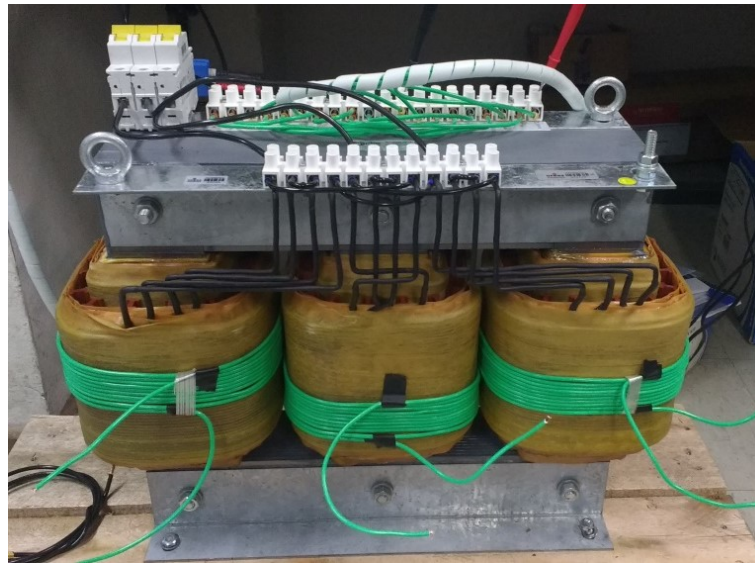


Fonte: O autor (2016).

Conforme pode ser observado nas partes destacadas, cada enrolamento sofreu um acréscimo em seu comprimento em virtude da necessidade da transposição dos fios para que tanto o início como o final do enrolamento estivesse na parte superior da bobina. Para uma melhor visualização, pode ser utilizado o projeto do protótipo, disponível no Apêndice.

Uma vez confirmados os valores nominais das tensões do transformador, foram realizadas as conexões físicas dos enrolamentos secundários, conforme ilustrado na Fig. 13, para a realização dos demais testes. A Fig. 25 mostra o transformador depois de realizada as conexões e com o acréscimo de 10 espiras sobre cada uma das bobinas, essas com o propósito de monitorar a indução máxima presente em cada coluna do transformador durante a execução dos testes.

Figura 25 – Transformador com as conexões adequadas para a realização dos testes

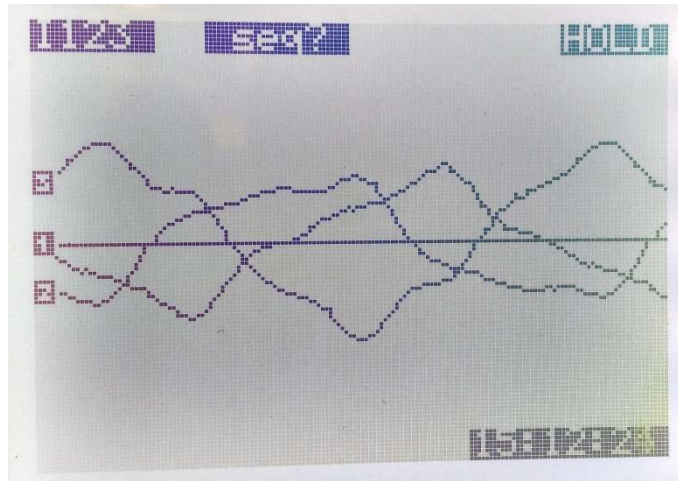


Fonte: O autor (2016).

Antes da realização dos testes com as cargas, o conversor foi submetido aos ensaios a vazio e em curto-circuito, com o intuito de avaliar as correntes de excitação, as perdas a vazio e também nos enrolamentos.

No ensaio a vazio, com o primário conectado em delta, foram aplicadas as tensões de 253,3 V entre  $\bar{V}_{ab}$ , 252,8 V entre  $\bar{V}_{bc}$  e de 256 V entre  $\bar{V}_{ca}$ . Durante o ensaio foi realizada a medição das perdas no ferro, sendo a mesma de 113 W. O valor calculado das perdas no ferro, considerando a massa do núcleo de 64,55 kg e as perdas típicas de 1,95 W/kg (60 Hz e 1 T), é de 126 W. Este valor está muito próximo do encontrado nos ensaios. Também foram medidas as correntes de excitação em cada fase, sendo seu valor máximo de 2,886 % da corrente nominal (22,73 A). A Fig. 26 apresenta a forma de onda no tempo da corrente nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta e sem carga no secundário.

Figura 26 – Corrente de excitação do transformador



Fonte: O autor (2016).

Para melhor análise da corrente de excitação, a Fig. 27 mostra os valores de corrente na frequência fundamental e a total (RMS), o percentual da distorção harmônica de corrente, assim como as frequências presentes no espectro das harmônicas nas fases A, B e C, respectivamente.

Figura 27 – Harmônicas na corrente de excitação nas fases A, B e C



Fonte: O autor (2016).

A corrente da componente de 3ª ordem medida foi de 0,08 A para a fase A; de 0,089 A para a fase B e de apenas 0,007 A para a fase C. Para a corrente da componente de 5ª ordem, o valor foi de 0,051 A para a fase A; de 0,053 A para a fase B e 0,08 A para a fase C. Já para a corrente da componente de 7ª ordem, o valor foi de 0,011 A para a fase A; de 0,013 A para a fase B e 0,016 A para a fase C.

No ensaio com todos os secundários conectados, ou seja, em curto-circuito, foram medidas as perdas em carga, assim como os valores das tensões de impedância. A Fig. 28

apresenta os valores das perdas ativa, reativa e aparente do conversor, com a temperatura ambiente de aproximadamente 18 °C.

Figura 28 – Perdas ativa, reativa e aparente do conversor em curto-circuito

U=	L1	L2	L3	U
I=	21.80	22.56	22.57	A
P=	+0.118	+0.129	+0.124	kW
S=	0.185	0.205	0.189	kVA
Q=	+0.142	+0.158	+0.142	kVar
PF=	0.64i	0.64i	0.66i	
φ=	-----	0.63	-----	
U1=	16.7	16.7	16.0	V
Pt=	+0.373	kW	f=	60.01
St=	0.578	kVA	It=	6.2
Qt=	+0.442	kVar	Pft=	0.651

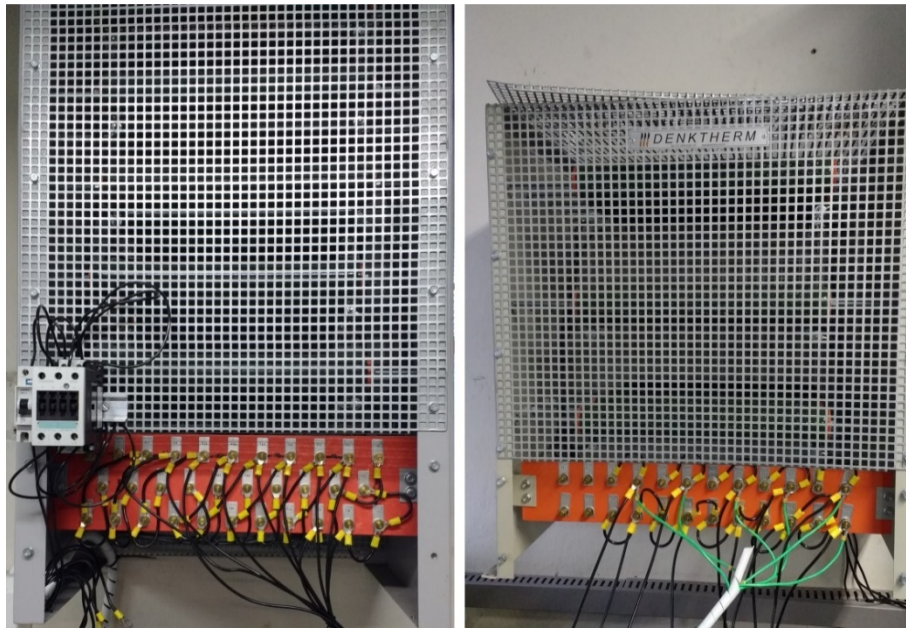
Fonte: O autor (2016).

Os valores de tensão medidos no primário do conversor foram de 16,42 V entre  $\bar{V}_{ab}$ , 16,44 V entre  $\bar{V}_{bc}$  e de 15,83 V entre  $\bar{V}_{ca}$ . Considerando a tensão nominal de 254 V, a impedância média calculada do conversor é de 6,38 % na temperatura de 18 °C.

## 4.2 ENSAIOS DO CONVERSOR ALIMENTANDO CARGA RESISTIVA

O primeiro teste com carga realizado utilizou-se de dois bancos de resistências, que por suas características nominais limitaram os valores de tensão e corrente abaixo dos nominais do transformador, mas que na prática não prejudicaram a análise do comportamento do transformador, como pode ser visto no decorrer desta seção. Cada fase da carga foi composta por 5 resistências em paralelo, sendo 2 resistências de 80 Ω e 3 resistências de 500 Ω, totalizando uma resistência equivalente de 32,26 Ω, limitada à corrente de 6,2 A e, portanto, à uma tensão de 200 V. Cada fase da carga foi conectada a uma das saídas do transformador, sendo o neutro da carga inicialmente conectado ao neutro do secundário do transformador. Em virtude da limitação de corrente da carga utilizada, no decorrer dos ensaios, a tensão aplicada ao primário do transformador sofreu alterações; visando não ultrapassar a corrente máxima na carga. A Fig. 29 ilustra os bancos de resistências utilizados nos testes.

Figura 29 – Bancos de resistências utilizados para os ensaios sob carga



Fonte: O autor (2016).

Para comparar os valores obtidos nos ensaios realizados com a carga resistiva com os resultados do modelo desenvolvido, foram necessárias novas simulações adequando o valor da carga e principalmente utilizando as tensões aplicadas no primário do transformador em cada etapa.

Na Tabela 21 são apresentados os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios com carga resistiva equilibrada, e os valores extraídos das simulações computacionais, sendo apresentados os desvios percentuais entre ambos, os valores médios, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão entre os secundários. Os valores das tensões aplicadas ao primário do transformador, utilizados nas simulações, foram ajustados conforme os valores medidos durante os ensaios e apresentavam desequilíbrio entre cada uma das fases, visto que a fonte utilizada é a própria rede da concessionária.

**Tabela 21 – Tensão e corrente dos ensaios x simulação com carga resistiva**

Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
	Ensaio	Simulação	Desvio	Ensaio	Simulação	Desvio
1	194,30	192,51	-0,92 %	6,04	5,97	-1,21 %
2	191,40	190,99	-0,21 %	5,88	5,92	0,68 %
3	193,50	192,39	-0,58 %	5,88	5,96	1,43 %
4	193,20	191,87	-0,69 %	5,88	5,95	1,16 %
5	193,00	191,76	-0,64 %	5,90	5,94	0,75 %
Média	193,08	191,90	-0,61 %	5,92	5,95	0,55 %
$F_D$	0,87 %	0,47 %				

Fonte: O autor (2016).



Considerando as aproximações realizadas na determinação do modelo para simulação, assim como dos valores calculados das indutâncias próprias, mútuas e de dispersão, pode-se concluir que os valores encontrados na simulação estão muito próximos dos obtidos nos ensaios. Mesmo com as variações das resistências ôhmicas provocadas pela variação da temperatura no decorrer dos ensaios, tanto na carga como nos enrolamentos do transformador, o modelo desenvolvido representou o comportamento do protótipo nos ensaios. Independente da oscilação e desequilíbrio da tensão encontrada na alimentação do primário do transformador, que utiliza a rede da concessionária ao invés de um gerador dedicado, as tensões nos 5 secundários estão equilibradas, visto o valor do fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) estar abaixo de 2 %.

Para avaliar a interferência do neutro da carga, o mesmo foi desconectado do neutro do transformador. A Tabela 22 apresenta os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios com carga resistiva equilibrada sem o neutro, e os valores extraídos das simulações computacionais correspondentes, sendo apresentados os desvios percentuais entre ambos, os valores médios, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão entre os secundários. Novamente, os valores das tensões aplicadas ao primário do transformador, utilizados nas simulações, foram ajustados conforme os valores medidos durante os ensaios e apresentavam desequilíbrio entre cada uma das fases, visto que a fonte utilizada é a própria rede da concessionária.

**Tabela 22 – Tensão e corrente dos ensaios x simulação com carga resistiva sem o neutro**

Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
	Ensaio	Simulação	Desvio	Ensaio	Simulação	Desvio
1	193,20	192,27	-0,48 %	5,97	5,96	-0,18 %
2	190,60	192,43	0,96 %	5,82	5,97	2,53 %
3	192,60	192,35	-0,13 %	5,83	5,97	2,32 %
4	191,60	192,55	0,50 %	5,86	5,97	1,84 %
5	192,10	192,75	0,34 %	5,87	5,97	1,74 %
Média	192,02	192,47	0,23 %	5,87	5,97	1,64 %
$F_D$	0,74 %	0,14 %				

Fonte: O autor (2016).

Como era esperada, a retirada da conexão entre o neutro da carga e o neutro do transformador, praticamente, não modificou o resultado dos ensaios e da simulação, pois a carga utilizada é equilibrada. A influência desta conexão passa a ser notada nos próximos resultados exibidos, quando ocasionamos as falhas nas fases da carga, tornando o sistema desequilibrado.

Novamente, são provocadas aberturas (falhas) nas fases da carga para cada um dos secundários individualmente. A Tabela 23 mostra os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios de aberturas (falhas) nas fases do secundário com carga resistiva equilibrada com o neutro da carga conectado ao neutro do transformador, e os valores extraídos das simulações computacionais correspondentes, sendo apresentados os desvios percentuais entre ambos, os valores médios, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão entre os secundários ainda conectados à carga.

**Tabela 23 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios x simulação com carga resistiva**

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
		Ensaio	Simulação	Desvio	Ensaio	Simulação	Desvio
1	V1	199,80	196,88	-1,46 %			
	V2	190,30	189,08	-0,64 %	5,84	5,86	0,36 %
	V3	191,90	192,25	0,18 %	5,77	5,96	3,28 %
	V4	196,50	192,12	-2,23 %	5,95	5,96	0,08 %
	V5	188,40	189,32	0,49 %	5,79	5,87	1,36 %
	Média	191,78	190,69	-0,56 %	5,84	5,91	1,26 %
	$F_D$	2,46 %	0,85 %				
2	V1	196,90	197,15	0,13 %	6,04	6,11	1,18 %
	V2	203,50	201,75	-0,86 %			
	V3	198,60	196,78	-0,91 %	6,06	6,10	0,66 %
	V4	197,30	198,97	0,85 %	6,04	6,17	2,12 %
	V5	202,20	198,02	-2,07 %	6,14	6,14	-0,03 %
	Média	198,75	197,73	-0,51 %	6,07	6,13	0,98 %
	$F_D$	1,74 %	0,63 %				
3	V1	194,80	190,44	-2,24 %	5,98	5,90	-1,29 %
	V2	184,40	186,96	1,39 %	5,63	5,80	2,93 %
	V3	195,40	193,68	-0,88 %			
	V4	190,20	187,63	-1,35 %	5,78	5,82	0,62 %
	V5	187,70	189,64	1,04 %	5,69	5,88	3,32 %
	Média	189,28	188,67	-0,32 %	5,77	5,85	1,36 %
	$F_D$	2,92 %	0,94 %				
4	V1	198,50	198,85	0,18 %	6,05	6,16	1,88 %
	V2	202,30	196,93	-2,66 %	6,14	6,10	-0,59 %
	V3	195,00	196,83	0,94 %	5,90	6,10	3,41 %
	V4	204,10	202,11	-0,98 %			
	V5	197,90	195,30	-1,31 %	6,02	6,05	0,56 %
	Média	198,43	196,98	-0,73 %	6,03	6,11	1,30 %
	$F_D$	1,95 %	0,95 %				
5	V1	196,90	194,28	-1,33 %	6,06	6,02	-0,63 %
	V2	194,10	194,78	0,35 %	5,88	6,04	2,69 %
	V3	202,10	195,58	-3,23 %	6,11	6,06	-0,77 %
	V4	193,60	193,84	0,12 %	5,92	6,01	1,50 %
	V5	196,68	194,62	-1,04 %			
	Média	197,82	195,56	-1,14 %	5,99	6,03	0,68 %
	$F_D$	2,76 %	0,49 %				

Fonte: O autor (2016).

Com a presença da conexão entre o neutro da carga e o neutro do secundário do transformador, ocorre a circulação de corrente no mesmo diante das aberturas provocadas nas fases e, portanto, estabelece o equilíbrio de corrente nos secundários do transformador. Em relação as tensões ainda conectadas à carga, há um aumento do fator de desequilíbrio, que dependendo da fase com falha, aproxima-se ou ultrapassa o limite tolerado pela norma (NEMA MG-1, 2014).

A Tabela 24 mostra os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios de aberturas (falhas) nas fases do secundário com carga resistiva equilibrada, porém com o neutro da carga desconectado do neutro do transformador, e os valores extraídos das simulações computacionais correspondentes, sendo apresentados os desvios percentuais entre ambos, os valores médios, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão entre os secundários ainda conectados à carga.

Quando ocorre a retirada do caminho para a circulação de corrente, no caso o caminho entre o neutro da carga e o neutro do secundário do transformador, ocorre um deslocamento do neutro, surgindo correntes no secundário do transformador também desequilibradas. Em relação às tensões ainda conectadas à carga, diferentemente do que ocorre com o neutro conectado, o fator de desequilíbrio é superior ao recomendado em todos os casos e pode-se afirmar que o sistema é desequilibrado, segundo a norma (NEMA MG-1, 2014).

**Tabela 24 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios x simulação com carga resistiva sem o neutro**

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		Desvio
		Ensaio	Simulação	Desvio	Ensaio	Simulação	
1	V1	186,90	183,67	-1,73 %			
	V2	174,10	175,92	1,05 %	6,04	6,03	-0,20 %
	V3	175,60	179,84	2,41 %	4,25	4,47	5,15 %
	V4	182,40	179,18	-1,77 %	4,49	4,48	-0,18 %
	V5	171,30	174,97	2,14 %	5,79	6,05	4,47 %
	Média	175,85	177,48	0,93 %	5,14	5,26	2,23 %
	F <sub>D</sub>	3,72 %	1,41 %				
2	V1	173,20	173,59	0,22 %	5,84	5,97	2,26 %
	V2	180,10	178,70	-0,78 %			
	V3	175,70	174,09	-0,91 %	5,98	5,96	-0,38 %
	V4	173,50	177,06	2,05 %	4,32	4,43	2,55 %
	V5	179,70	175,32	-2,44 %	4,40	4,39	-0,11 %
	Média	175,53	175,01	-0,29 %	5,13	5,19	1,04 %
	F <sub>D</sub>	2,38 %	1,17 %				
3	V1	184,50	176,31	-4,44 %	4,60	4,41	-4,19 %
	V2	172,50	171,56	-0,55 %	5,79	5,91	2,11 %
	V3	183,50	178,89	-2,51 %			
	V4	178,70	173,33	-3,00 %	6,12	5,95	-2,73 %
	V5	175,00	175,81	0,46 %	4,28	4,38	2,31 %
	Média	177,68	174,25	-1,93 %	5,20	5,16	-0,67 %
	F <sub>D</sub>	3,84 %	1,55 %				
4	V1	177,50	180,20	1,52 %	4,42	4,50	1,81 %
	V2	183,30	177,49	-3,17 %	4,52	4,44	-1,71 %
	V3	174,30	176,61	1,32 %	5,86	6,09	3,98 %
	V4	183,90	182,24	-0,90 %			
	V5	177,10	175,90	-0,68 %	6,00	6,01	0,22 %
	Média	178,05	177,55	-0,28 %	5,20	5,26	1,20 %
	F <sub>D</sub>	2,95 %	1,49 %				
5	V1	173,10	172,46	-0,37 %	5,97	5,91	-1,07 %
	V2	169,50	173,18	2,17 %	4,21	4,32	2,61 %
	V3	178,30	173,44	-2,72 %	4,36	4,34	-0,46 %
	V4	168,80	171,02	1,32 %	5,64	5,88	4,18 %
	V5	176,90	176,36	-0,30 %			
	Média	172,43	172,53	0,06 %	5,05	5,11	1,30 %
	F <sub>D</sub>	3,41 %	0,87 %				

Fonte: O autor (2016).

Em ambos os casos, com ou sem o neutro, diante das aberturas nas fases da carga, ocorre o desequilíbrio das correntes no primário do transformador. A Tabela 25 mostra os valores das correntes nas linhas de alimentação do primário do transformador medidos durante os ensaios de aberturas (falhas) nas fases do secundário com carga resistiva equilibrada, com o neutro e sem o neutro da carga conectado ao neutro do transformador, e os

valores extraídos das simulações computacionais correspondentes, sendo apresentados os desvios percentuais entre ambos.

**Tabela 25 – Correntes primárias no transformador para falha de uma fase do secundário nos ensaios x simulação com carga resistiva**

Abertura na fase	Fase	Corrente (com neutro)			Corrente (sem neutro)		
		Ensaio	Simulação	Desvio	Ensaio	Simulação	Desvio
1	A	10,79 A	10,74 A	-0,49 %	9,31 A	9,21 A	-1,05 %
	B	10,52 A	10,73 A	1,97 %	9,04 A	9,07 A	0,35 %
	C	14,48 A	14,69 A	1,45 %	13,58 A	13,63 A	0,35 %
2	A	12,19 A	12,03 A	-1,34 %	10,27 A	10,06 A	-2,03 %
	B	14,86 A	15,29 A	2,87 %	13,12 A	13,49 A	2,81 %
	C	10,14 A	10,21 A	0,66 %	7,92 A	7,98 A	0,77 %
3	A	13,78 A	13,71 A	-0,50 %	12,60 A	12,54 A	-0,50 %
	B	9,08 A	9,24 A	1,77 %	7,10 A	7,23 A	1,76 %
	C	12,64 A	12,66 A	0,14 %	11,37 A	11,31 A	-0,55 %
4	A	9,53 A	9,20 A	-3,48 %	7,25 A	6,93 A	-4,40 %
	B	14,08 A	14,47 A	2,80 %	12,53 A	12,86 A	2,61 %
	C	13,40 A	13,64 A	1,78 %	11,79 A	12,02 A	1,88 %
5	A	14,73 A	14,60 A	-0,92 %	13,03 A	12,89 A	-1,05 %
	B	12,16 A	12,48 A	2,61 %	10,30 A	10,57 A	2,59 %
	C	9,89 A	9,72 A	-1,65 %	7,66 A	7,44 A	-2,86 %

Fonte: O autor (2016).

Os desvios nas medições das correntes do primário estão dentro da mesma faixa dos desvios apresentados nas medições nos secundários do transformador; e podem ser considerados adequados para representar as leituras dos ensaios no protótipo.

Para avaliar a interferência da conexão dos enrolamentos primários, até então ligados em delta, sobre o comportamento das tensões e correntes nos secundários do transformador, foram realizados os mesmos ensaios com a carga resistiva sem o neutro, porém alterando a ligação do primário para estrela e também para zig-zag. A Tabela 26 apresenta os valores de tensão e corrente no secundário do transformador medidos durante os ensaios com carga resistiva equilibrada sem o neutro, comparando as 3 ligações dos enrolamentos do primário, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão para cada caso.

**Tabela 26 – Tensão e corrente dos ensaios com carga resistiva para as 3 ligações do primário**

Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
	Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
1	193,20	192,40	193,10	5,97	5,97	5,96
2	190,60	189,80	191,50	5,82	5,79	5,86
3	192,60	193,50	192,60	5,83	5,88	5,90
4	191,60	190,80	192,50	5,86	5,84	5,96
5	192,10	192,10	192,30	5,87	5,85	5,90
Média	192,02	191,72	192,40	5,87	5,87	5,92
F <sub>D</sub>	0,74 %	1,00 %	0,47 %			

Fonte: O autor (2016).

É importante salientar que a comparação anterior deve se ater apenas ao fator de desequilíbrio (F<sub>D</sub>) de tensão, uma vez que as tensões nos secundários foram ajustadas manualmente para não ultrapassar o limite da corrente dos resistores. Sendo assim, pode-se afirmar que para as 3 ligações do primário, delta, estrela e zig-zag, há o equilíbrio de tensão, sendo a ligação zig-zag a que apresenta o melhor equilíbrio.

Como já visualizado na Tabela 24, ao ser provocada a abertura de uma das fases da carga, as tensões do secundário tornam-se desequilibradas em 3 dos 5 casos de falhas, estando o primário conectado em delta. A Tabela 27 mostra os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios de aberturas (falhas) nas fases do secundário com carga resistiva equilibrada sem o neutro para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como o fator de desequilíbrio (F<sub>D</sub>) de tensão entre os secundários ainda conectados à carga.

Mais uma vez, a conexão em zig-zag no primário do transformador se mostrou eficiente no equilíbrio de tensão dos secundários, agora com apenas 2 dos 5 secundários conectados à carga. Diante das aberturas nas fases da carga, apenas pode-se considerar equilibradas as tensões secundárias do transformador com o primário em zig-zag e apenas para as falhas das fases 2 e 3, pois foi o único a apresentar valores do fator de desequilíbrio (F<sub>D</sub>) de tensão dentro dos limites aceitáveis.

Tabela 27 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios com carga resistiva sem o neutro

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
		Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
1	V1	186,90	188,30	180,20			
	V2	174,10	176,20	168,60	6,04	6,09	5,90
	V3	175,60	179,30	174,70	4,25	4,31	4,22
	V4	182,40	185,70	176,70	4,49	4,48	4,03
	V5	171,30	177,40	173,30	5,79	6,10	5,95
	Média	175,85	179,65	173,33	5,14	5,24	5,02
	F <sub>D</sub>	3,72 %	3,37 %	2,73 %			
2	V1	173,20	172,30	179,10	5,84	5,79	5,97
	V2	180,10	180,10	182,10			
	V3	175,70	176,10	176,50	5,98	5,99	5,99
	V4	173,50	171,60	176,70	4,32	4,29	4,64
	V5	179,70	180,90	178,90	4,40	4,56	4,79
	Média	175,53	175,23	177,80	5,13	5,16	5,35
	F <sub>D</sub>	2,38 %	3,24 %	0,73 %			
3	V1	184,50	180,90	175,50	4,60	4,47	4,23
	V2	172,50	168,00	169,70	5,79	5,64	5,75
	V3	183,50	181,80	177,00			
	V4	178,70	174,10	172,30	6,12	6,00	6,05
	V5	175,00	172,00	170,90	4,28	4,15	4,16
	Média	177,68	173,75	172,10	5,20	5,06	5,05
	F <sub>D</sub>	3,84 %	4,12 %	1,98 %			
4	V1	177,50	175,00	176,00	4,42	4,37	4,35
	V2	183,30	181,00	178,50	4,52	4,46	4,32
	V3	174,30	172,10	172,30	5,86	5,78	5,85
	V4	183,90	181,10	179,30			
	V5	177,10	175,50	172,50	6,00	6,00	6,02
	Média	178,05	175,90	174,83	5,20	5,15	5,13
	F <sub>D</sub>	2,95 %	2,90 %	2,10 %			
5	V1	173,10	172,80	177,50	5,97	5,99	6,00
	V2	169,50	169,20	181,80	4,21	4,38	4,70
	V3	178,30	182,20	186,40	4,36	4,52	4,83
	V4	168,80	168,30	179,40	5,64	5,52	5,97
	V5	176,90	181,00	186,10			
	Média	172,43	173,13	181,28	5,05	5,10	5,38
	F <sub>D</sub>	3,41 %	5,24 %	2,83 %			

Fonte: O autor (2016).

Em contra partida, ao analisar as correntes nas fases do primário do transformador, percebe-se além do desequilíbrio das correntes já visualizados na Tabela 25, que existe distorção harmônica considerável para a ligação zig-zag. A Tabela 28 mostra as correntes e as distorções harmônicas das correntes medidas nas linhas de alimentação do primário do transformador durante os ensaios com carga resistiva equilibrada sem o neutro, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

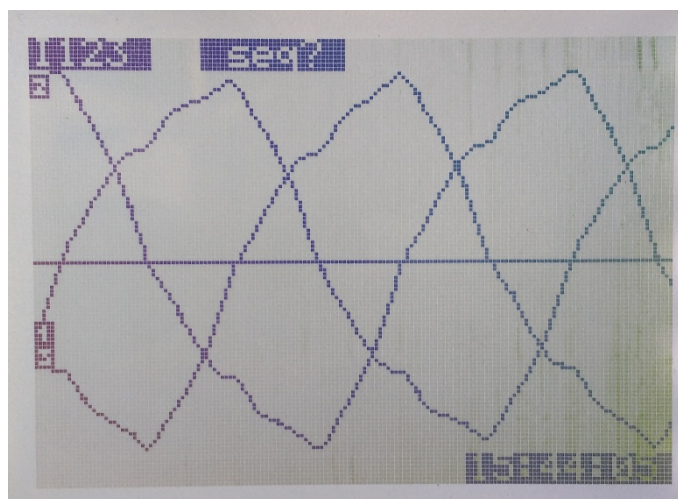
**Tabela 28 – Distorção harmônica de corrente do primário nos ensaios com carga resistiva**

Abertura na fase	Fase	Corrente de linha (A)			Distorção harmônica de corrente		
		Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
sem abertura	A	14,99	17,51	9,87	0,64 %	1,49 %	11,95 %
	B	14,90	17,11	10,25	0,61 %	1,40 %	11,47 %
	C	14,92	16,70	9,88	0,66 %	1,56 %	12,09 %
1	A	9,31	6,96	5,79	0,79 %	3,44 %	18,36 %
	B	9,04	14,17	6,30	0,71 %	1,84 %	16,98 %
	C	13,58	15,18	8,81	0,75 %	1,46 %	12,21 %
2	A	10,27	14,94	6,75	0,73 %	1,67 %	16,03 %
	B	13,12	13,73	9,36	0,65 %	1,59 %	11,47 %
	C	7,92	7,18	5,07	0,68 %	3,24 %	21,33 %
3	A	12,60	11,95	8,13	0,64 %	1,92 %	12,66 %
	B	7,10	9,27	5,11	0,66 %	2,52 %	20,39 %
	C	11,37	14,58	7,50	0,75 %	1,53 %	14,06 %
4	A	7,25	11,54	4,72	0,83 %	2,31 %	22,83 %
	B	12,53	15,46	8,79	0,65 %	1,47 %	11,91 %
	C	11,79	9,25	7,35	0,67 %	2,31 %	14,46 %
5	A	13,03	15,89	9,02	0,64 %	1,49 %	11,95 %
	B	10,30	7,08	7,41	0,65 %	2,85 %	14,68 %
	C	7,66	12,22	5,42	0,75 %	2,19 %	20,68 %

Fonte: O autor (2016).

Apesar da conexão primária em zig-zag disponibilizar tensões equilibradas à carga resistiva, até mesmo diante das falhas, ela é a que possui maior distorção harmônica de corrente. A Fig. 30 mostra a forma de onda no tempo da corrente nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação zig-zag alimentando carga resistiva.

Figura 30 – Corrente no primário em zig-zag com carga resistiva



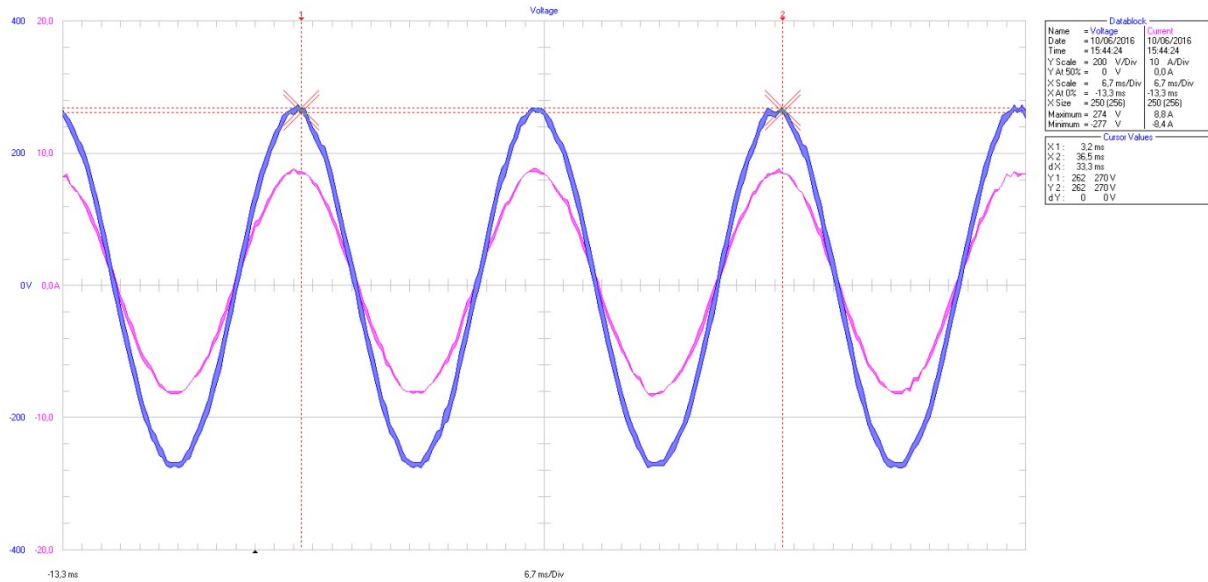
Fonte: O autor (2016).

Ainda que exista alta distorção harmônica de corrente no primário em zig-zag, as tensões e correntes nos 5 secundários do transformador quando conectado à carga resistiva



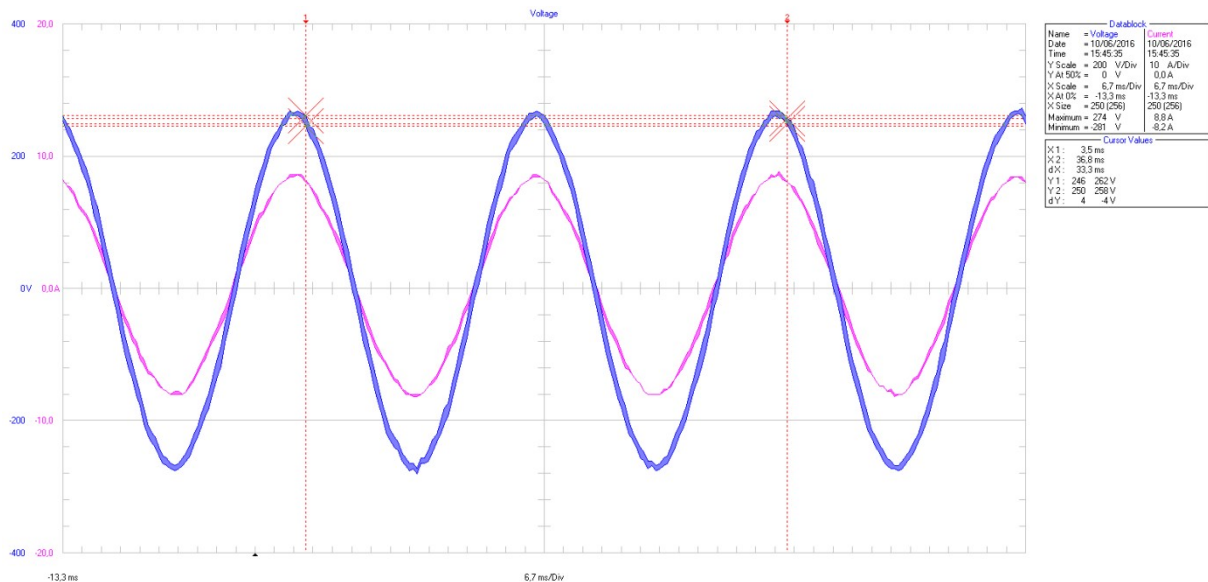
não são significativas. As Fig. 31 à 35 mostram as formas de onda no tempo da tensão (azul) e corrente (magenta) nos 5 secundários do transformador alimentando a carga resistiva com o primário do transformador conectado em zig-zag.

Figura 31 – Tensão e corrente no secundário 1 com carga resistiva e primário em zig-zag



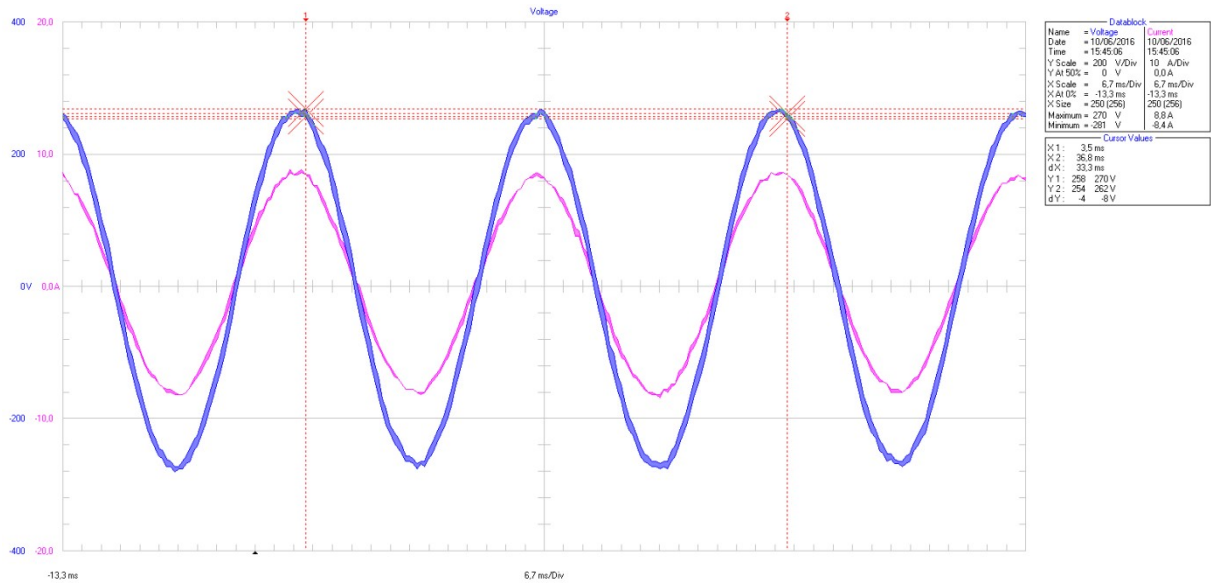
Fonte: O autor (2016).

Figura 32 – Tensão e corrente no secundário 2 com carga resistiva e primário em zig-zag



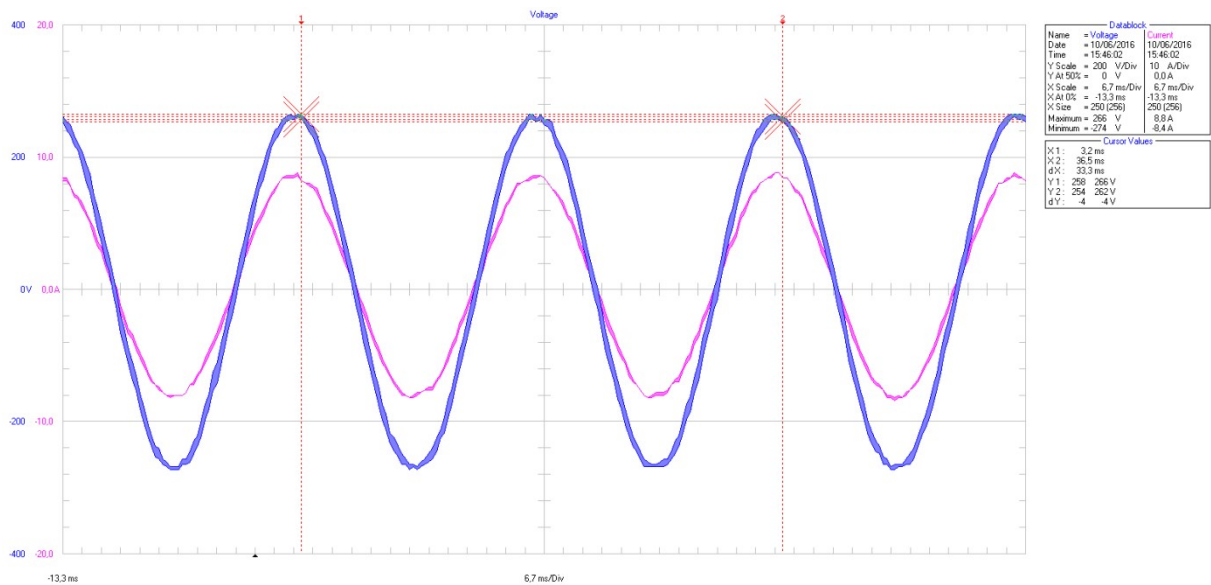
Fonte: O autor (2016).

Figura 33 – Tensão e corrente no secundário 3 com carga resistiva e primário em zig-zag



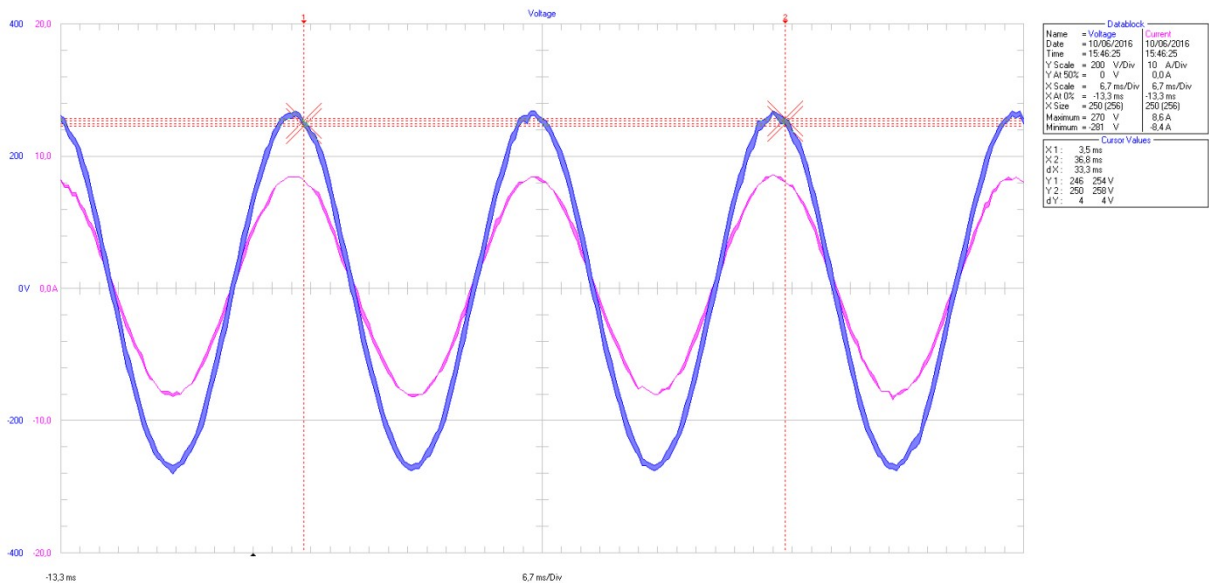
Fonte: O autor (2016).

Figura 34 – Tensão e corrente no secundário 4 com carga resistiva e primário em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

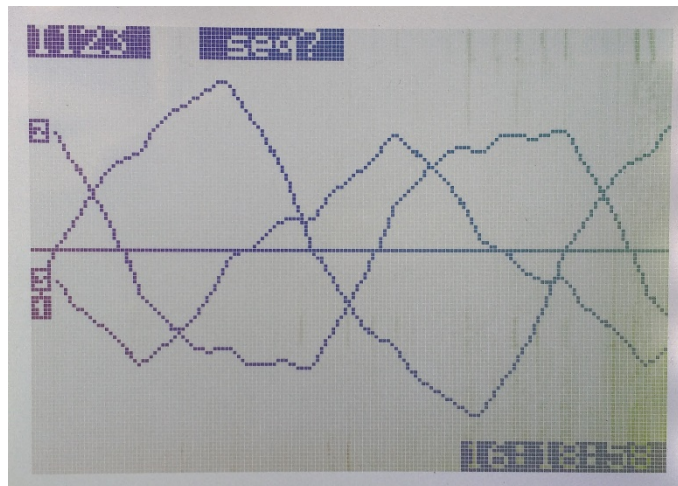
Figura 35 – Tensão e corrente no secundário 5 com carga resistiva e primário em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

Ao provocar a abertura em uma das fases do secundário, por exemplo, abrindo o secundário 5, a distorção harmônica da corrente no primário do transformador aumenta ainda mais, como pode ser visto na Fig. 36, que apresenta a forma de onda no tempo da corrente quando ocorre a abertura (falha) no secundário 5.

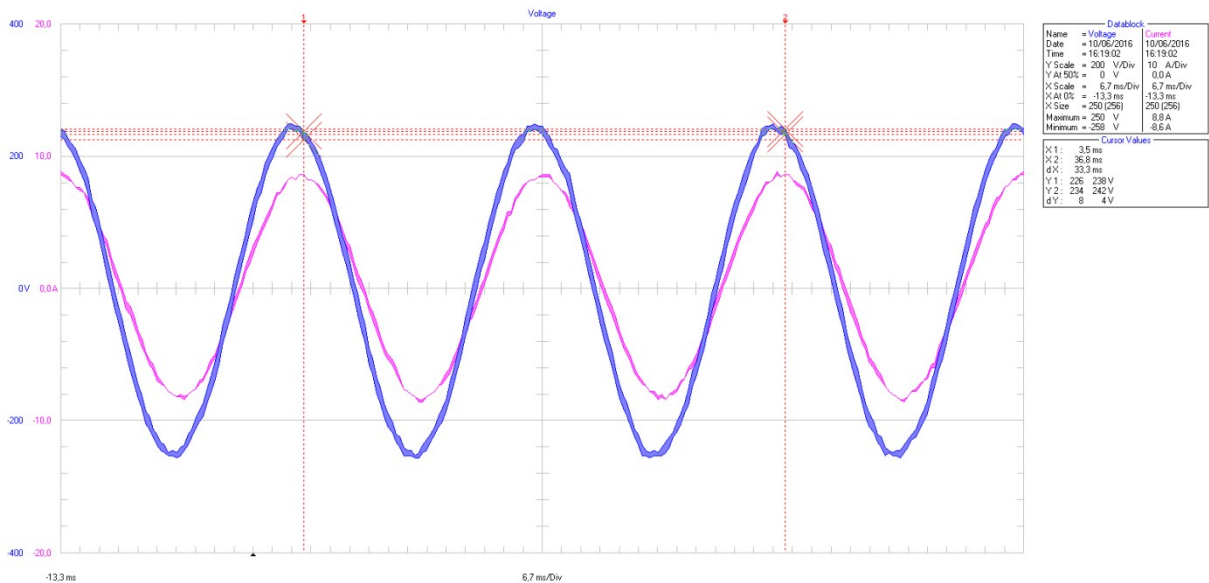
Figura 36 – Corrente no primário em zig-zag com carga resistiva com abertura da fase 5



Fonte: O autor (2016).

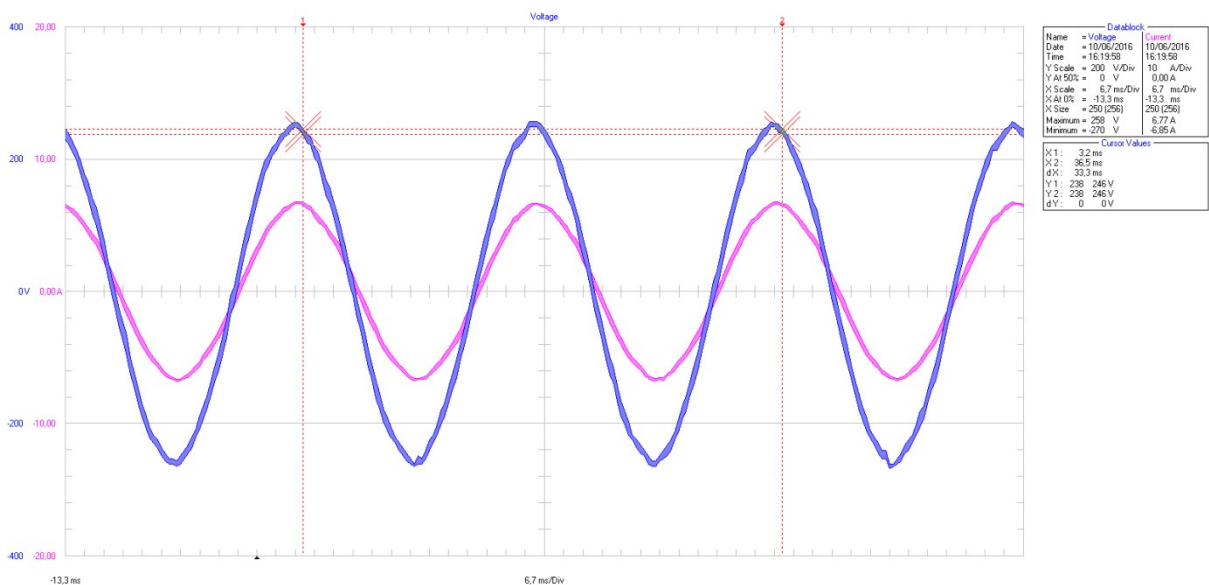
Considerando a mesma fase 5 com falha, as Fig. 37 à 40 mostram as formas de onda no tempo da tensão (azul) e corrente (magenta) nos 4 secundários do transformador que ainda alimentam a carga resistiva com o primário do transformador conectado em zig-zag.

Figura 37 – Tensão e corrente no secundário 1 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

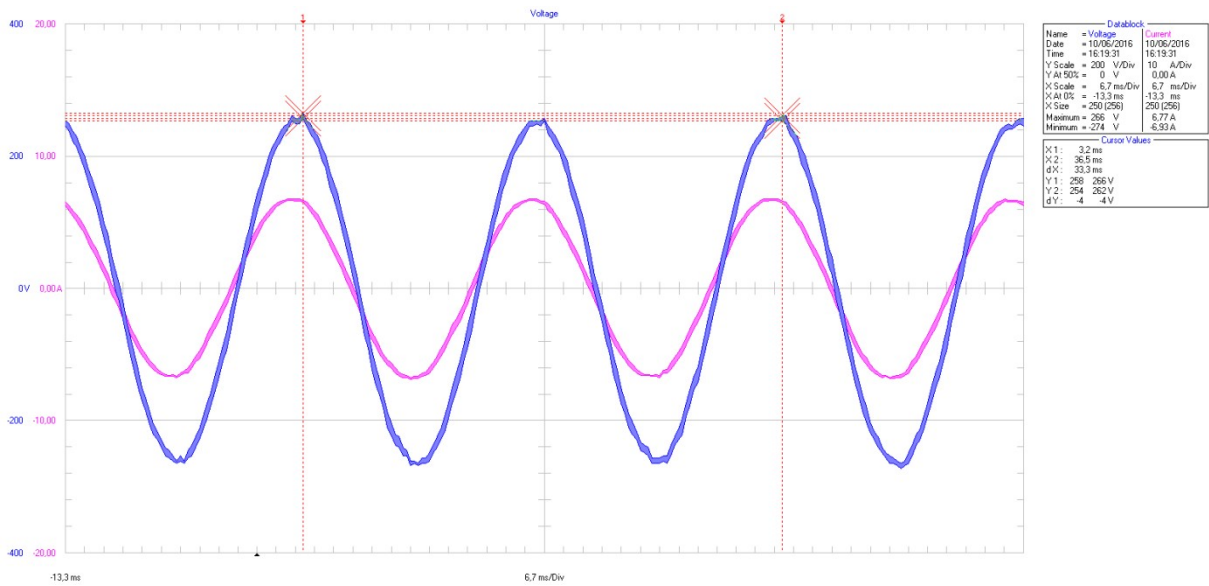
Figura 38 – Tensão e corrente no secundário 2 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

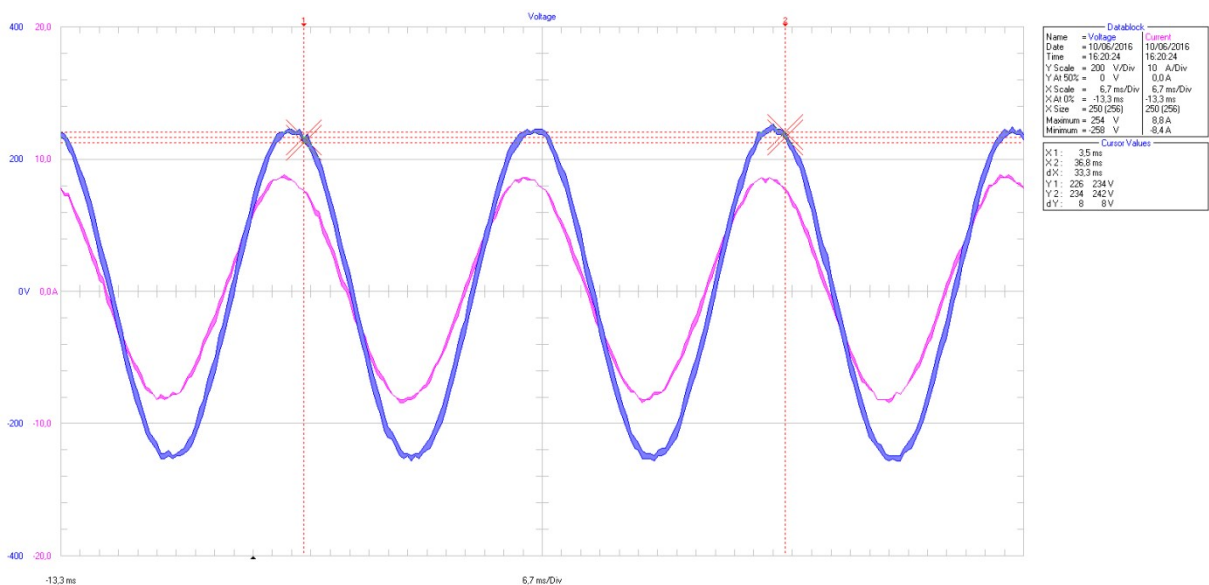
Em virtude da abertura de uma das fases da carga, no caso a fase 5, ocorre apenas o deslocamento entre as ondas de tensão e corrente, ou seja, ambas passam a não estar mais em fase, porém não é expressiva a distorção harmônica, tanto de corrente como de tensão, em comparação a distorção de corrente do primário quando conectado em zig-zag. O deslocamento da corrente deve-se a não existência da conexão do neutro do transformador com o neutro da carga.

Figura 39 – Tensão e corrente no secundário 3 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

Figura 40 – Tensão e corrente no secundário 4 com carga resistiva e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

Para avaliar os valores máximos de indução magnética nas 3 colunas do transformador durante a realização dos ensaios com carga resistiva sem o neutro, foram realizadas medições de tensão nas 10 espiras adicionadas externamente em cada bobina do transformador, calculando através da Equação 44 o valor da indução máxima ( $\hat{B}$ ) em cada uma das 3 colunas, sendo a frequência ( $f$ ) de 60 Hz, a seção magnética do núcleo de ferro ( $A_{\text{ferro}}$ ) de 0,00523 m<sup>2</sup>, o número de espiras ( $N$ ) de 10 e o valor da tensão ( $V$ ) o medido em cada etapa dos ensaios.

$$\hat{B} = \frac{V}{\frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \times A_{\text{ferro}} \times N} \quad (44)$$

A Tabela 29 mostra os valores máximos de indução magnética presentes em cada coluna do transformador durante a realização dos ensaios com carga resistiva sem o neutro, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

**Tabela 29 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com carga resistiva sem o neutro**

Abertura na fase	Conexão Primária	Coluna B (T)	Coluna A (T)	Coluna C (T)
sem abertura	Delta	0,938	0,951	0,942
1		0,853	0,904	0,876
2		0,863	0,848	0,868
3		0,867	0,892	0,848
4		0,856	0,874	0,892
5		0,863	0,855	0,836
sem abertura	Estrela	0,943	0,945	0,936
1		0,870	0,916	0,871
2		0,868	0,849	0,866
3		0,867	0,847	0,869
4		0,849	0,861	0,882
5		0,882	0,846	0,832
sem abertura	Zig-zag	0,937	0,952	0,948
1		0,863	0,874	0,823
2		0,851	0,883	0,884
3		0,845	0,851	0,842
4		0,835	0,871	0,874
5		0,906	0,869	0,908

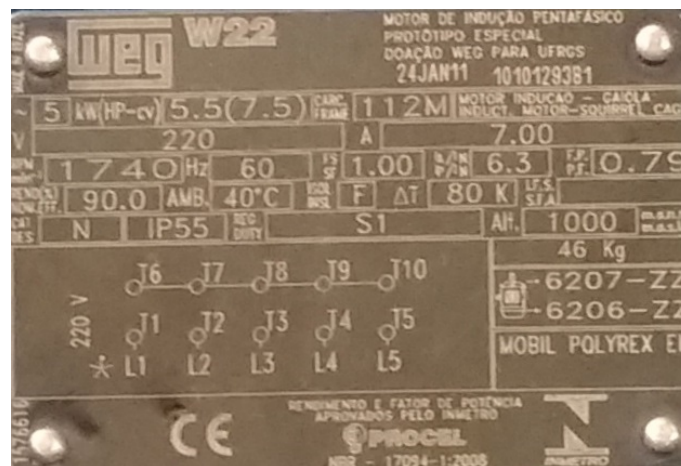
Fonte: O autor (2016).

Vale destacar que, nos ensaios com carga resistiva, a tensão nos secundários foi ajustada abaixo da tensão nominal para não ultrapassar a corrente máxima dos resistores. Conseqüentemente, a indução magnética foi reduzida por conta da tensão menor aplicada aos enrolamentos primários. Independente disto, os valores mostrados na Tabela 29 para a indução magnética, presente nas 3 colunas do transformador, permanecem muito próximos, inclusive diante da abertura das fases na carga, garantindo a não saturação do núcleo e principalmente mantendo os níveis de perdas no mesmo, conforme os resultados das simulações que foram mostrados no Capítulo 3.

### 4.3 ENSAIOS DO CONVERSOR ALIMENTANDO MOTOR A VAZIO

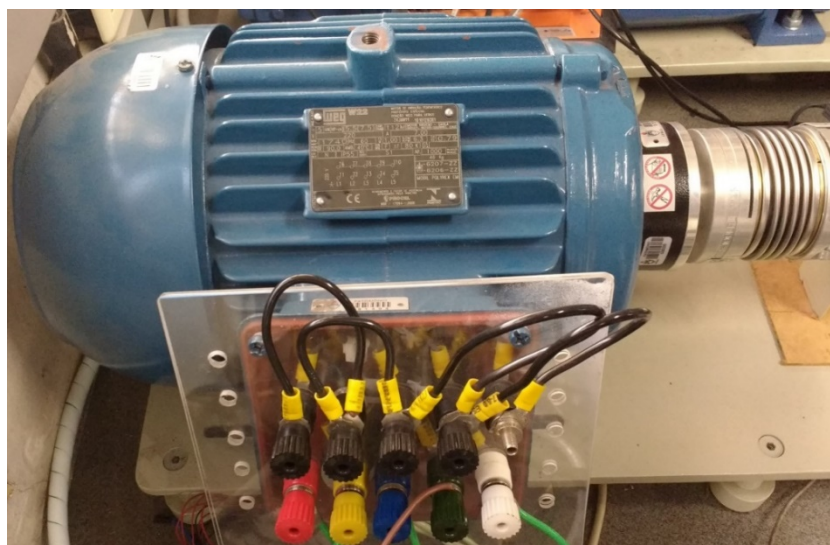
Outro ensaio realizado com o conversor foi com os secundários alimentando um motor de indução de gaiola pentafásico, com potência de 5,5 kW, frequência de 60 Hz, 4 polos, com tensão de 220 V por fase, e sem nenhuma carga acoplada ao seu eixo, tornando a carga do conversor praticamente indutiva. Neste ensaio não ocorreu limitações das correntes e os testes puderam ser realizados aplicando-se as tensões nominais no transformador. Cada uma das 5 fases do secundário do transformador foi conectada ao respectivo terminal do motor, que por sua vez está conectado em estrela. O neutro do secundário do transformador e também do motor não foram conectados. A Fig. 41 mostra os dados nominais da placa do motor de indução pentafásico e a Fig. 42 ilustra o motor pentafásico com os terminais de conexão.

Figura 41 – Placa do motor pentafásico



Fonte: O autor (2016).

Figura 42 – Motor pentafásico com os terminais de conexão



Fonte: O autor (2016).

Da mesma forma que nos ensaios com as resistências, os testes com o motor a vazio foram realizados com as 3 configurações na conexão dos enrolamentos primários (delta, estrela e zig-zag). A Tabela 30 apresenta os valores de tensão e corrente no secundário do transformador medidos durante os ensaios com o motor a vazio, comparando as 3 ligações dos enrolamentos do primário, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão para cada caso.

**Tabela 30 – Tensão e corrente dos ensaios com motor a vazio para as 3 ligações do primário**

Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
	Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
1	217,20	213,50	216,10	4,76	4,53	4,64
2	215,30	211,70	215,00	4,33	3,93	4,45
3	215,90	213,30	215,00	4,22	4,36	4,19
4	216,30	211,90	215,50	4,97	4,64	4,94
5	215,40	212,90	214,50	4,80	4,74	4,75
Média	216,02	212,66	215,22	4,62	4,44	4,60
$F_D$	0,55 %	0,45 %	0,41 %			

Fonte: O autor (2016).

Nas 3 conexões do primário, a tensão entregue ao motor a vazio apresenta um fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão abaixo do limite de 2 %, confirmando o equilíbrio de tensão para uma carga puramente indutiva, independente da ligação do primário. Novamente a ligação zig-zag apresenta o melhor equilíbrio de tensão, porém não há uma diferença tão representativa entre as 3 conexões como ocorre com a carga resistiva.

Após as medições do conversor alimentando as 5 fases do motor a vazio, foram provocadas as aberturas (falhas) em cada uma das fases do motor, para avaliar o comportamento da tensão e corrente com apenas 4 das 5 fases. A Tabela 31 exibe os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios de aberturas (falhas) nas fases do secundário conectado ao motor sem carga para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão entre os secundários ainda conectados ao motor a vazio.



Tabela 31 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios com motor a vazio

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
		Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
1	V1	221,30	220,60	223,70			
	V2	213,80	209,00	209,70	6,71	6,13	6,23
	V3	217,30	214,90	214,20	4,78	4,79	4,71
	V4	215,10	209,90	211,60	5,57	4,82	4,30
	V5	213,70	209,20	210,20	6,46	6,70	6,76
	Média	214,98	210,75	211,43	5,88	5,61	5,50
	F <sub>D</sub>	1,08 %	1,97 %	1,31 %			
2	V1	214,70	212,00	211,24	6,36	5,79	6,21
	V2	217,30	217,10	217,15			
	V3	213,80	212,90	211,14	6,43	6,76	6,74
	V4	217,20	215,80	210,99	5,61	5,76	5,94
	V5	212,80	212,10	205,75	4,82	4,55	3,76
	Média	214,63	213,20	209,78	5,81	5,72	5,66
	F <sub>D</sub>	1,20 %	1,22 %	1,92 %			
3	V1	216,70	213,40	213,30	5,22	4,79	4,57
	V2	214,70	211,90	212,90	5,66	5,63	5,74
	V3	217,90	216,40	215,20			
	V4	215,40	211,70	213,20	7,29	7,28	7,21
	V5	217,20	216,20	215,00	5,53	5,75	5,46
	Média	216,00	213,30	213,60	5,93	5,86	5,75
	F <sub>D</sub>	0,60 %	1,36 %	0,66 %			
4	V1	216,50	215,80	214,70	5,39	5,01	4,87
	V2	213,20	212,60	212,40	5,25	5,34	5,66
	V3	213,80	214,50	213,00	6,17	6,45	6,26
	V4	216,70	215,50	215,10			
	V5	213,80	213,90	212,10	6,61	6,29	6,30
	Média	214,33	214,20	213,05	5,86	5,77	5,77
	F <sub>D</sub>	1,01 %	0,75 %	0,77 %			
5	V1	214,40	212,90	213,00	6,48	6,11	5,39
	V2	214,80	213,10	212,50	4,63	4,46	4,98
	V3	214,00	214,50	213,80	5,31	6,11	6,19
	V4	213,50	211,40	212,10	6,24	5,80	6,06
	V5	217,40	220,10	218,90			
	Média	214,18	212,98	212,85	5,67	5,62	5,65
	F <sub>D</sub>	0,32 %	0,74 %	0,45 %			

Fonte: O autor (2016).

Diferente do que ocorre com a carga resistiva ao sofrer falhas, onde apenas a conexão primária em zig-zag apresenta um fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão dos secundários dentro dos limites, para falhas alimentando um motor a vazio, todas as 3 conexões primárias apresentam valores do fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão aceitáveis, e portanto, pode-se considerar todas como equilibradas. A conexão primária em delta apresenta os melhores resultados para o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) quando o conversor está conectado ao motor a

vazio com apenas 4 das 5 fases, exceto quando a falha ocorre na fase 4, onde as conexões estrela e zig-zag desempenham melhor equilíbrio.

A Tabela 32 mostra as correntes e as distorções harmônicas das correntes medidas nas linhas de alimentação do primário do transformador durante os ensaios com o motor a vazio para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

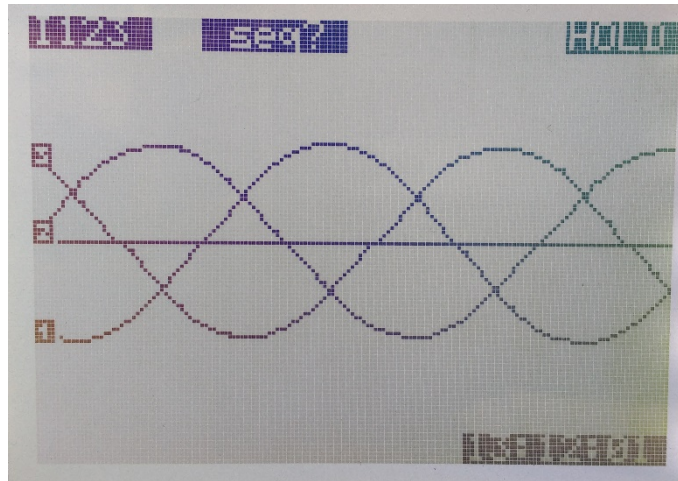
**Tabela 32 – Distorção harmônica de corrente do primário nos ensaios com o motor a vazio**

Abertura na fase	Fase	Corrente de linha (A)			Distorção harmônica de corrente		
		Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
sem abertura	A	11,64	13,19	7,79	1,32 %	3,78 %	14,47 %
	B	11,19	13,59	7,62	1,50 %	3,46 %	13,47 %
	C	11,29	12,00	7,81	1,68 %	4,81 %	13,82 %
1	A	11,00	9,16	6,42	3,35 %	3,46 %	18,08 %
	B	10,31	14,20	6,85	2,92 %	2,47 %	19,76 %
	C	12,46	14,30	8,86	1,67 %	3,94 %	13,94 %
2	A	11,14	13,84	7,27	3,14 %	3,55 %	20,40 %
	B	12,03	14,85	8,43	1,31 %	3,27 %	14,75 %
	C	10,23	9,49	6,49	4,04 %	8,28 %	15,34 %
3	A	12,64	13,43	8,19	2,31 %	4,00 %	17,11 %
	B	10,38	12,02	6,75	4,98 %	6,56 %	14,56 %
	C	11,04	12,93	7,54	2,75 %	4,73 %	18,37 %
4	A	10,30	12,72	6,54	4,03 %	5,93 %	16,75 %
	B	11,45	14,74	7,86	2,43 %	2,26 %	15,72 %
	C	11,66	11,22	8,07	2,70 %	3,52 %	17,32 %
5	A	12,33	15,19	8,45	1,44 %	2,12 %	14,17 %
	B	11,34	10,32	7,28	3,22 %	4,81 %	17,95 %
	C	9,59	12,32	6,52	4,98 %	4,73 %	18,91 %

Fonte: O autor (2016).

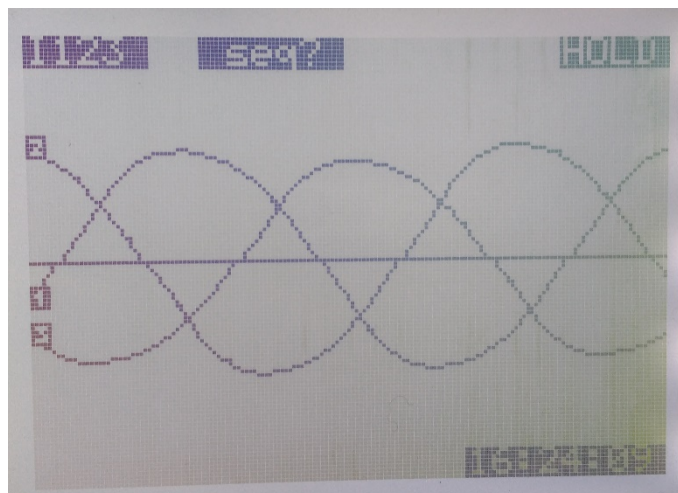
Ao alimentar o motor a vazio nota-se que as distorções harmônicas das correntes no primário das ligações delta e estrela aumentaram quando comparadas a carga resistiva. Mesmo assim, aquém dos valores encontrados para a conexão zig-zag. É importante salientar que em ambos os ensaios, com carga resistiva e com o motor a vazio, o neutro da fonte de alimentação (rede) tem conexão com o neutro da ligação estrela e zig-zag do primário do transformador, permitindo um caminho para a harmônica de 3ª ordem. As Fig. 43, 44 e 45 mostram as formas de onda no tempo das correntes nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta, estrela e zig-zag respectivamente, alimentando o motor a vazio.

Figura 43 – Corrente no primário em delta com motor a vazio



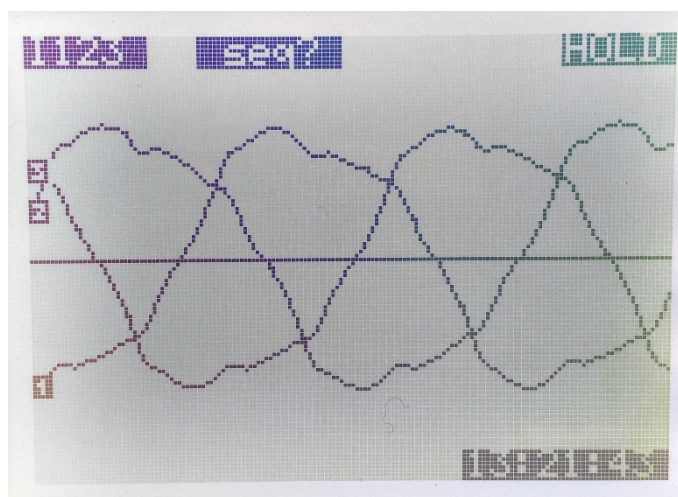
Fonte: O autor (2016).

Figura 44 – Corrente no primário em estrela com motor a vazio



Fonte: O autor (2016).

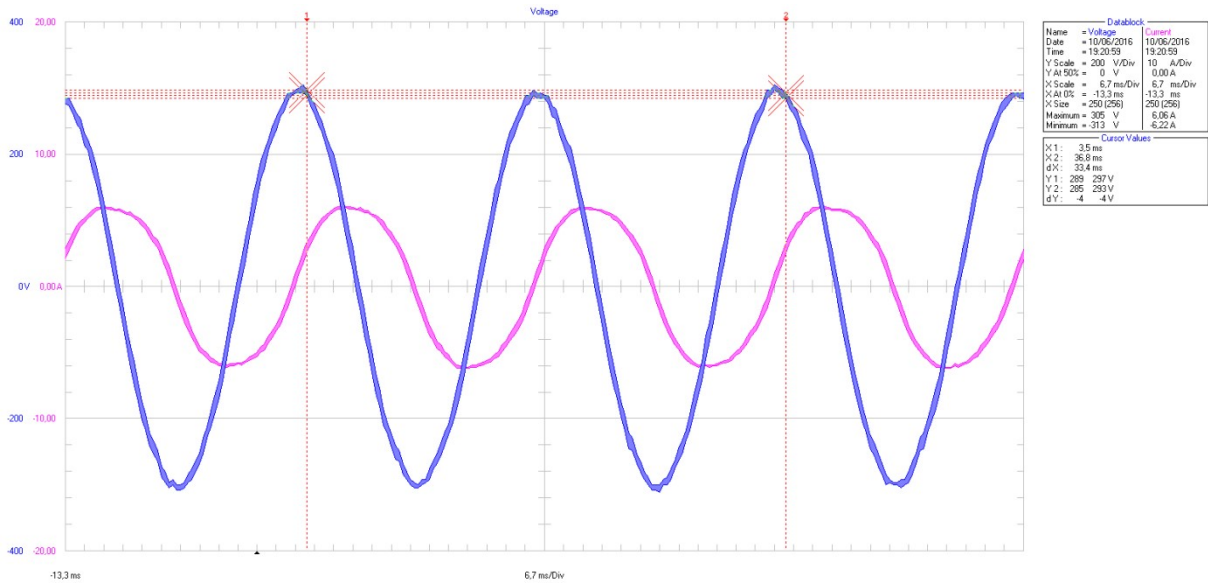
Figura 45 – Corrente no primário em zig-zag com motor a vazio



Fonte: O autor (2016).

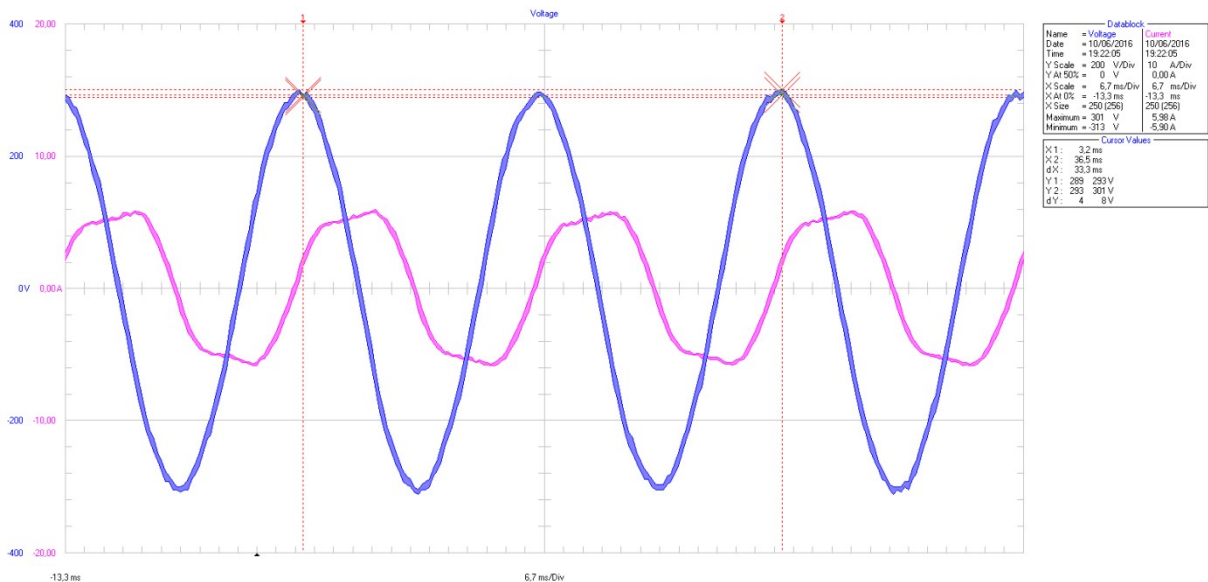
Para comparar as formas de onda de tensão e corrente já apresentadas com a carga resistiva e com o primário conectado em zig-zag, as Fig. 46 à 50 mostram as formas de onda no tempo da tensão (azul) e corrente (magenta) nos 5 secundários do transformador alimentando o motor a vazio com o primário do transformador conectado em zig-zag.

Figura 46 – Tensão e corrente no secundário 1 com motor a vazio e primário em zig-zag



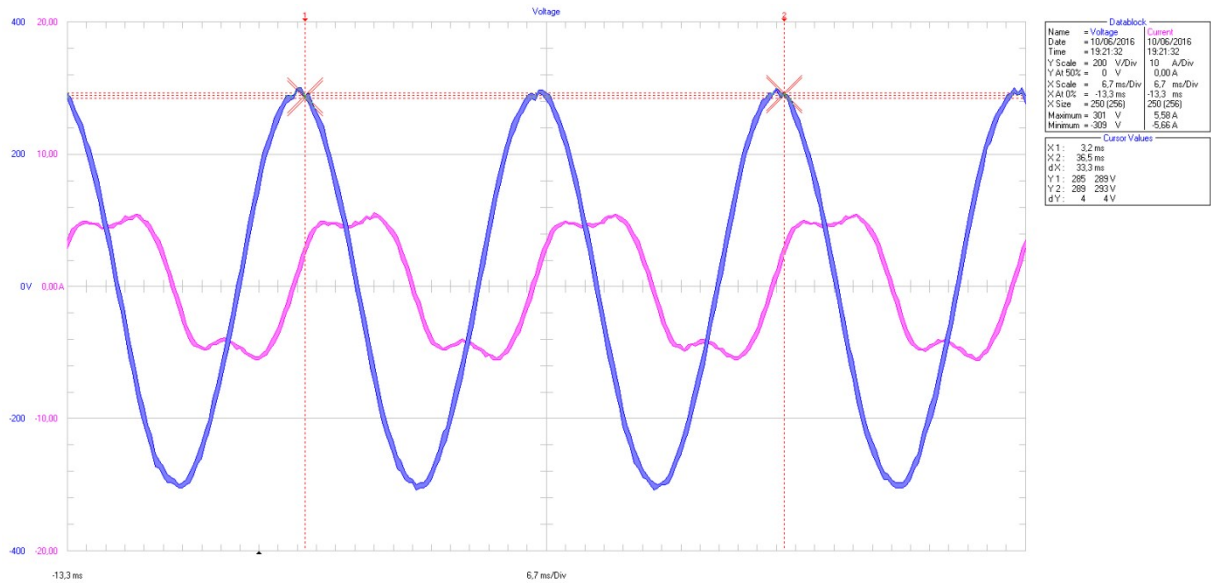
Fonte: O autor (2016).

Figura 47 – Tensão e corrente no secundário 2 com motor a vazio e primário em zig-zag



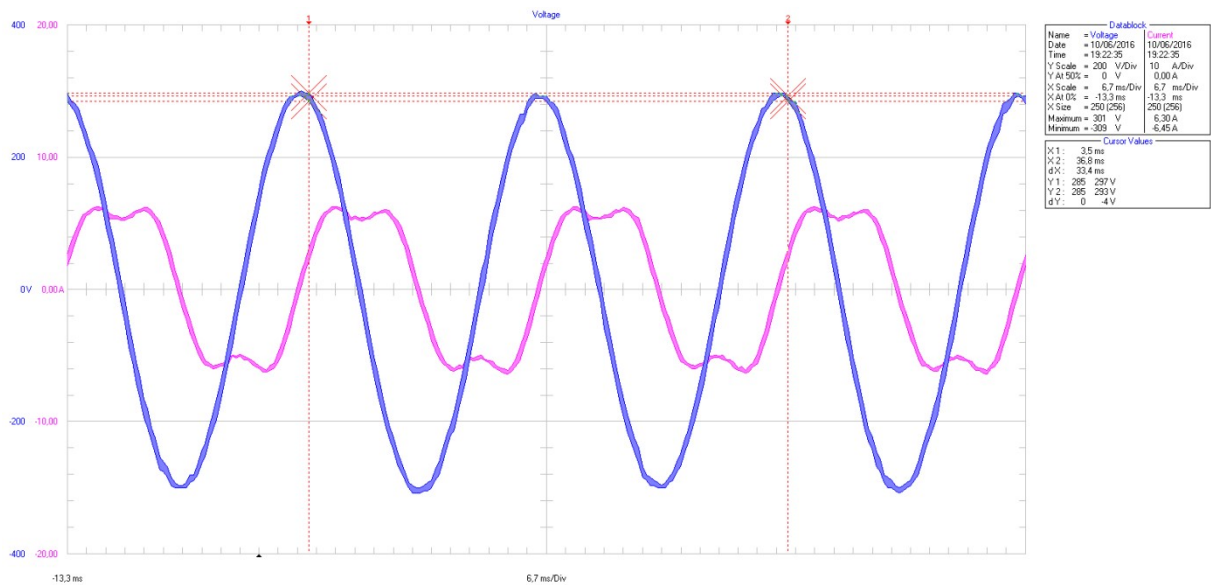
Fonte: O autor (2016).

Figura 48 – Tensão e corrente no secundário 3 com motor a vazio e primário em zig-zag



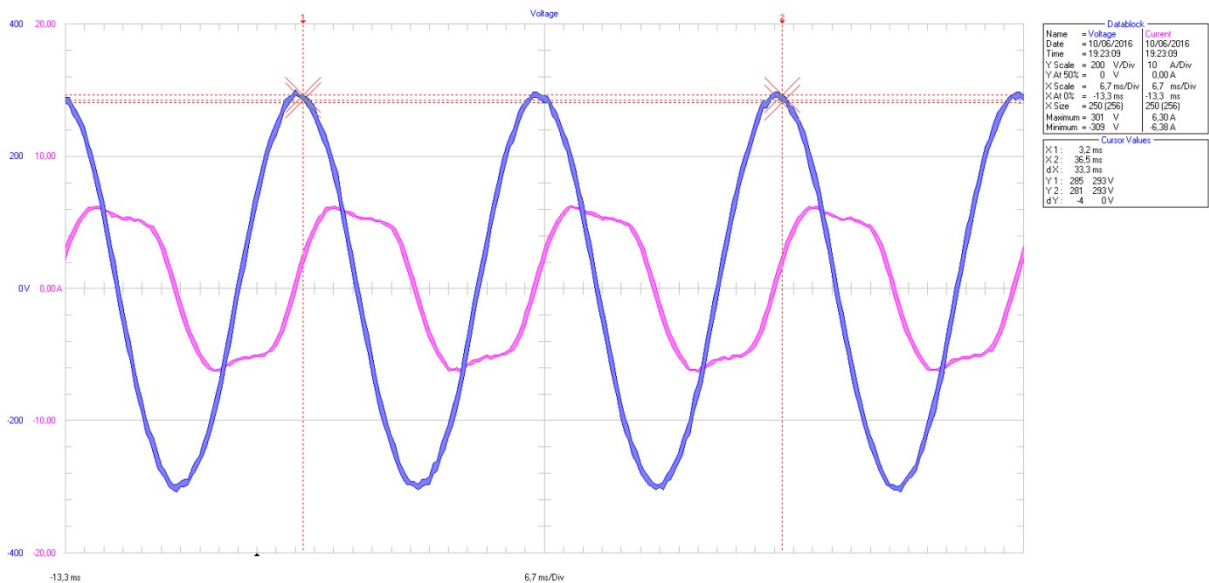
Fonte: O autor (2016).

Figura 49 – Tensão e corrente no secundário 4 com motor a vazio e primário em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

Figura 50 – Tensão e corrente no secundário 5 com motor a vazio e primário em zig-zag



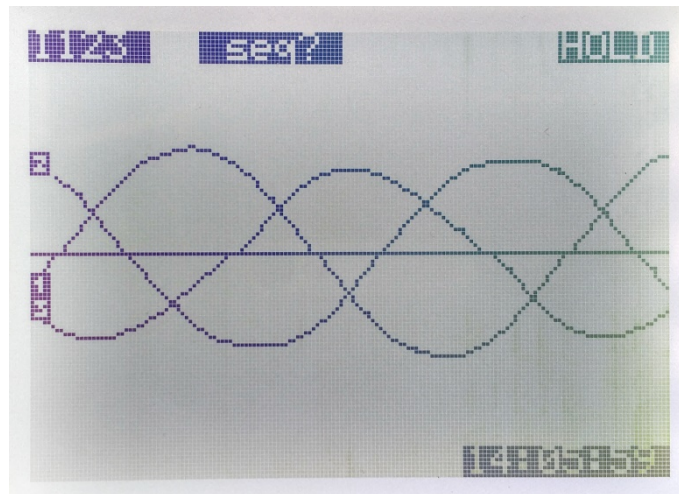
Fonte: O autor (2016).

Todas as correntes dos 5 secundários estão atrasadas em  $90^\circ$  da tensão, típicas de uma carga indutiva e apresentam distorção harmônica de corrente, com a maior parcela da 3ª harmônica (180 Hz). Conforme Pereira et al. (2012), parte da corrente da 3ª harmônica é gerada pelo efeito de saturação do motor, o que deve ocorrer mesmo que o motor pentafásico não tenha neutro, em qualquer ligação, dependendo exclusivamente da tensão aplicada aos seus terminais.

Uma forma de observar esse efeito é reduzir a tensão nos terminais do motor até que as correntes tornem-se senoidais, com distorção harmônica de corrente praticamente nula.

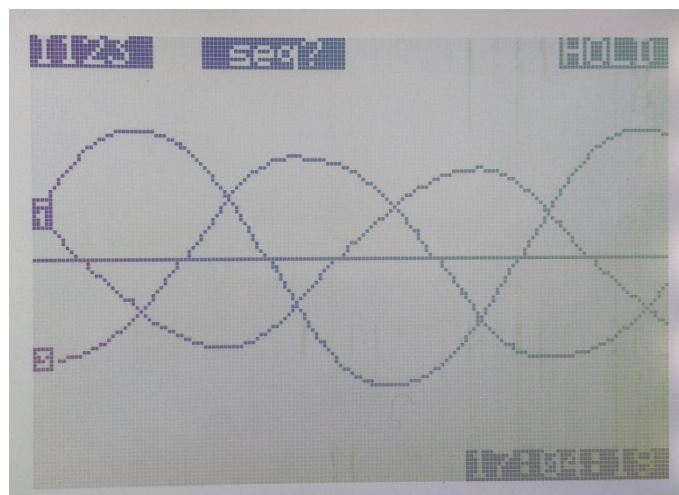
As Fig. 51, 52 e 53 mostram as formas de onda no tempo das correntes nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta, estrela e zig-zag respectivamente, quando este alimenta o motor a vazio na abertura (falha) do secundário 5.

Figura 51 – Corrente no primário em delta com motor a vazio com abertura da fase 5



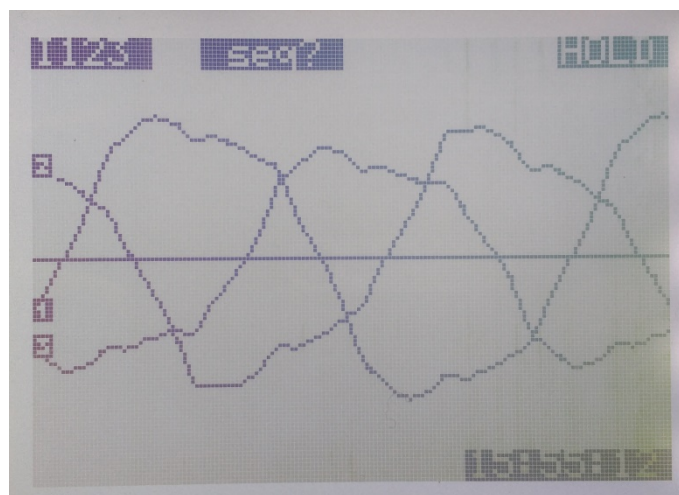
Fonte: O autor (2016).

Figura 52 – Corrente no primário em estrela com motor a vazio com abertura da fase 5



Fonte: O autor (2016).

Figura 53 – Corrente no primário em zig-zag com motor a vazio com abertura da fase 5

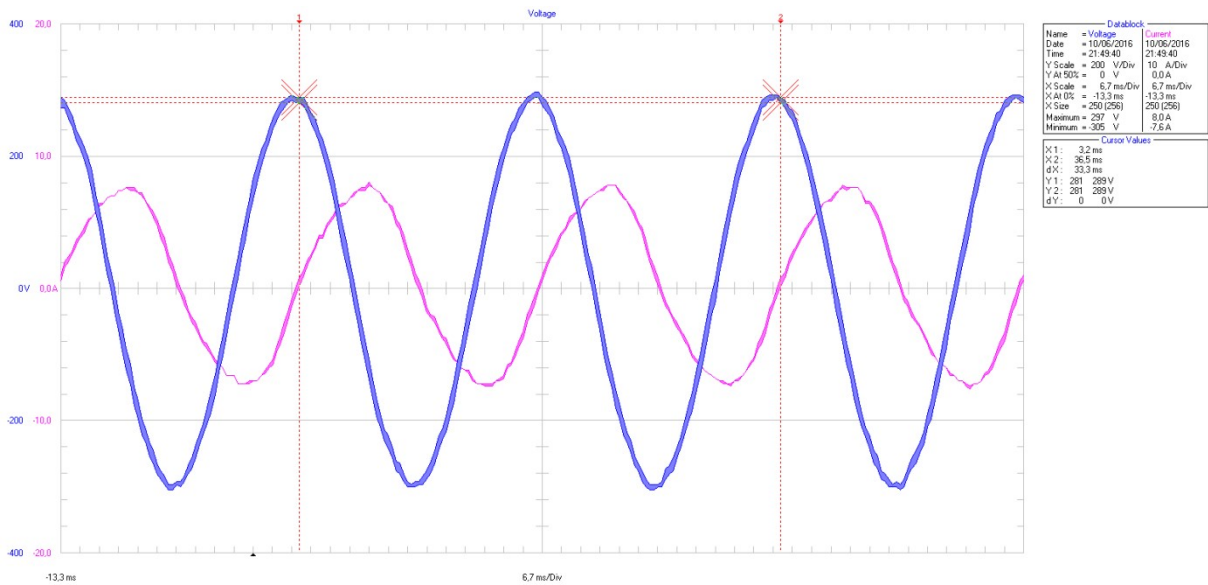


Fonte: O autor (2016).

Como pode ser visualizado, a distorção harmônica de corrente no primário é maior durante a alimentação da carga com apenas 4 das 5 fases, principalmente para a ligação zig-zag, que possui os maiores índices, conforme visualizado na Tabela 32.

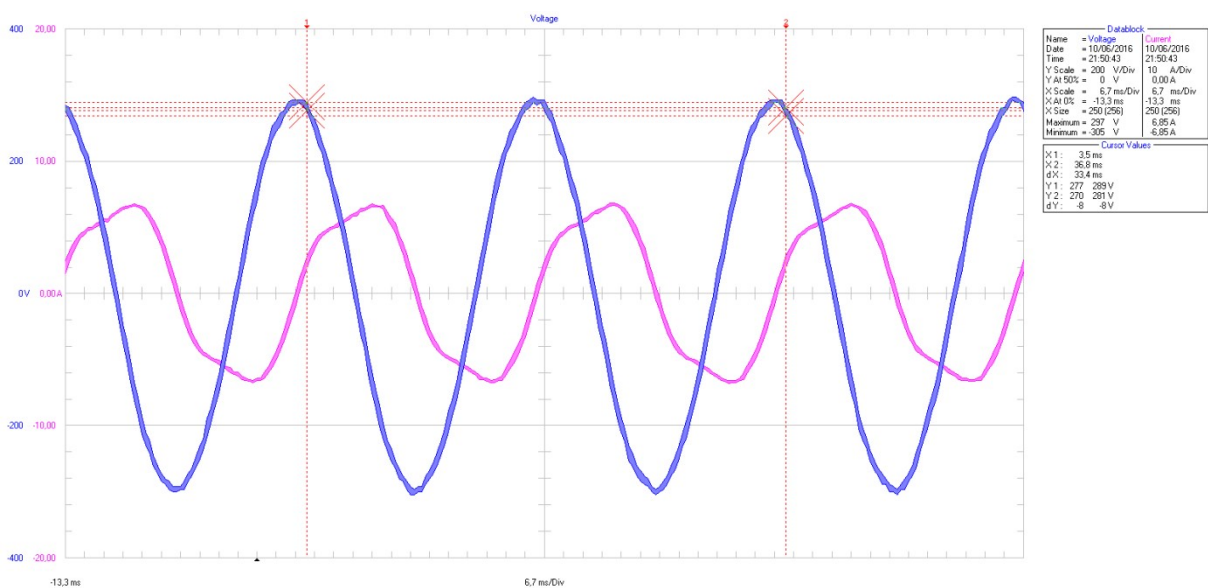
Considerando a mesma fase 5 com falha, as Fig. 54 à 57 mostram as formas de onda no tempo da tensão (azul) e corrente (magenta) nos 4 secundários do transformador que ainda alimentam o motor a vazio com o primário do transformador conectado em zig-zag.

Figura 54 – Tensão e corrente no secundário 1 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

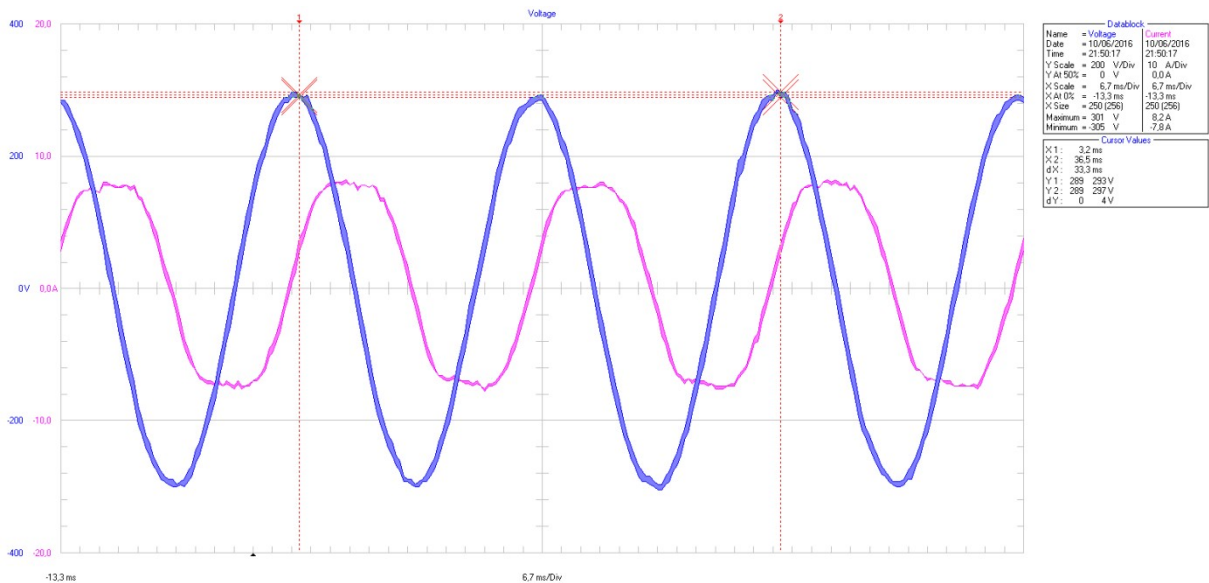
Figura 55 – Tensão e corrente no secundário 2 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

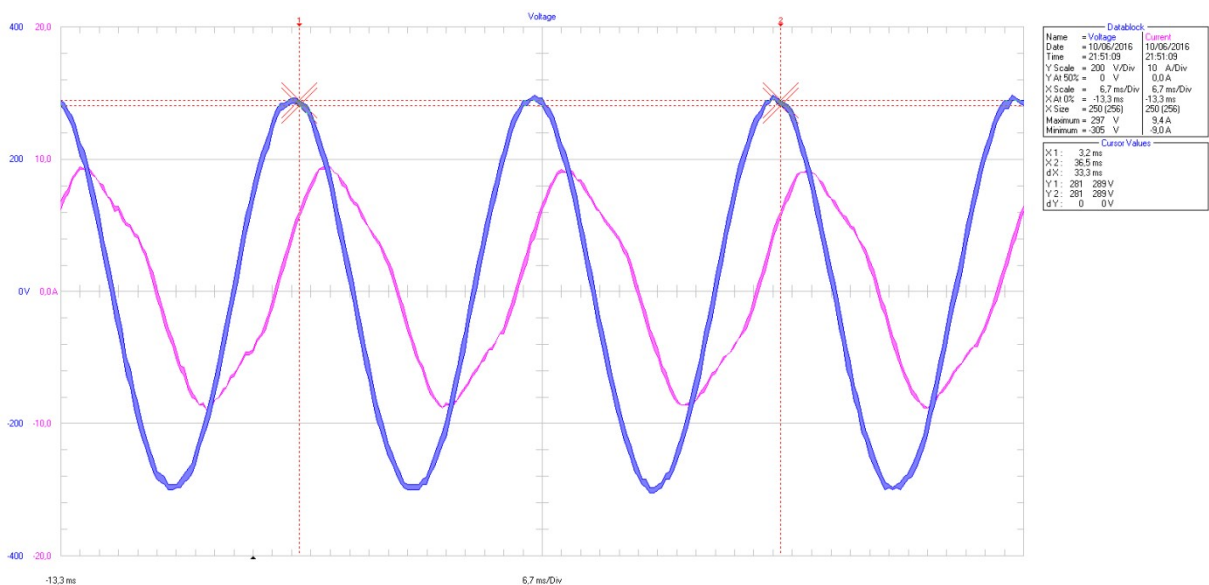


Figura 56 – Tensão e corrente no secundário 3 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

Figura 57 – Tensão e corrente no secundário 4 com motor a vazio e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

Para uma falha em uma das fases de alimentação do motor a vazio, ocorre o deslocamento entre as ondas de tensão e corrente, similar ao que ocorre com a carga resistiva.

Durante os ensaios com o motor a vazio também foram medidas as tensões nas 10 espiras externas para avaliar os valores máximos de indução magnética nas 3 colunas do transformador. Utilizando novamente a Equação 44 foram calculados os valores de indução máxima em cada uma das 3 colunas. A Tabela 33 mostra os valores máximos de indução magnética presentes em cada coluna do transformador durante a realização dos ensaios com o

motor a vazio, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

**Tabela 33 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com motor a vazio**

Abertura na fase	Conexão Primária	Coluna B (T)	Coluna A (T)	Coluna C (T)
sem abertura	Delta	1,067	1,071	1,068
1		1,077	1,085	1,072
2		1,063	1,070	1,071
3		1,080	1,076	1,074
4		1,066	1,076	1,059
5		1,068	1,071	1,073
sem abertura	Estrela	1,067	1,060	1,056
1		1,058	1,085	1,041
2		1,063	1,058	1,076
3		1,079	1,060	1,054
4		1,066	1,068	1,057
5		1,084	1,057	1,056
sem abertura	Zig-zag	1,061	1,061	1,065
1		1,056	1,106	1,039
2		1,047	1,056	1,091
3		1,070	1,060	1,066
4		1,061	1,061	1,066
5		1,081	1,053	1,055

Fonte: O autor (2016).

Os valores apresentados para a indução magnética máxima, presente nas 3 colunas do transformador, permanecem muito próximos, inclusive diante da abertura das fases na carga. Considerando o valor nominal da indução do projeto de 1,06 T, dos valores encontrados, o máximo da ultrapassagem foi de 4,4 % do valor nominal, não prejudicando o funcionamento do transformador, garantindo a não saturação do núcleo e mantendo os níveis de perdas no mesmo. A diferença da indução está relacionada a flutuação das tensões aplicadas no primário do transformador, seja em relação a abertura das fases do secundário, e até mesmo pela utilização de uma rede não equilibrada para os ensaios.

#### 4.4 ENSAIOS DO CONVERSOR ALIMENTANDO MOTOR COM CARGA

Os próximos ensaios realizados com o conversor utilizaram o mesmo motor pentafásico, porém, sendo acoplado ao seu eixo um gerador de corrente contínua alimentando uma determinada carga resistiva fixa. Essa carga utilizou 5 resistências de 80  $\Omega$  em paralelo, equivalente à 16  $\Omega$ , valor este determinado para que a corrente no estator do motor pentafásico durante as aberturas (falhas) das fases não ultrapassasse demasiadamente o valor nominal de 7 A por fase. O gerador, com excitação independente, foi ajustado para gerar uma

tensão máxima de 190 Vcc, garantindo assim a segurança dos resistores utilizados como carga. A Fig. 58 ilustra o motor pentafásico acoplado ao eixo do gerador de corrente contínua utilizado nos testes.

Figura 58 – Motor pentafásico acoplado ao gerador de corrente contínua utilizado nos testes



Fonte: O autor (2016).

Nos ensaios do motor com carga foram realizadas também as 3 configurações na conexão dos enrolamentos primários (delta, estrela e zig-zag). A única diferença dos ensaios anteriores é que, uma vez ajustada a tensão nos enrolamentos primários de determinada conexão primária, a mesma foi mantida durante as aberturas de todas as fases, possibilitando comparar além do fator de desequilíbrio ( $F_D$ ), os valores dos módulos das tensões e das correntes em cada abertura (falha) de fase, e os valores correspondentes quando conectadas as 5 fases. A Tabela 34 apresenta os valores de tensão e corrente no secundário do transformador medidos durante os ensaios com motor sob carga, comparando as 3 ligações dos enrolamentos do primário, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão para cada caso.

**Tabela 34 – Tensão e corrente dos ensaios com motor sob carga para as 3 ligações do primário**

Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
	Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
1	212,80	212,60	211,80	5,12	5,03	4,96
2	210,30	210,40	210,70	4,59	4,53	4,75
3	211,10	212,40	210,20	4,67	4,99	4,58
4	211,10	211,00	210,90	4,97	4,86	5,00
5	210,30	211,60	210,30	5,07	5,28	5,01
Média	211,12	211,60	210,78	4,88	4,94	4,86
$F_D$	0,80 %	0,57 %	0,48 %			

Fonte: O autor (2016).

Para o motor acoplado ao eixo do gerador com carga, a tensão entregue ao motor pelos secundários do transformador com as 3 conexões do primário, apresenta um fator de

desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão dentro do limite, confirmando também o equilíbrio de tensão para uma carga indutiva mais resistiva, independente da ligação do primário. Como no caso do motor a vazio, as 3 conexões primárias apresentam um fator de desequilíbrio de tensão dos secundários com pouca diferença entre si.

Em seguida, foram provocadas as aberturas (falhas) em cada uma das fases do motor, para avaliar o comportamento da tensão e corrente com apenas 4 das 5 fases, agora com o motor acoplado ao eixo do gerador de corrente contínua com carga. Com esta abertura em uma das fases do secundário, as correntes nas fases ainda conectadas ao motor aumentam seu módulo para compensar o desequilíbrio de carga provocado. A Tabela 35 mostra o percentual de corrente em cada fase ainda conectada ao motor com carga, após a retirada de uma das fases do secundário. O percentual da corrente foi calculado com o valor da corrente ainda com as 5 fases conectadas, mostradas na Tabela 34, e não com a corrente nominal de cada fase, pois o motor não está com sua carga nominal.

**Tabela 35 – Percentual de corrente para falha nas fases nos ensaios com motor sob carga**

Abertura na fase	Secundário	Percentual de Corrente (%)		
		Delta	Estrela	Zig-zag
1	V2	155,2	159,6	149,8
	V3	111,5	111,2	111,5
	V4	114,5	108,2	91,0
	V5	135,5	143,6	147,7
2	V1	137,5	131,0	137,2
	V3	152,6	153,1	162,6
	V4	119,7	128,6	132,0
	V5	103,2	97,2	85,6
3	V1	110,7	107,8	99,4
	V2	133,6	139,7	133,2
	V4	154,5	162,3	153,4
	V5	117,9	120,8	117,4
4	V1	117,2	110,7	106,9
	V2	123,0	130,8	126,3
	V3	147,5	144,5	148,2
	V5	141,6	133,5	138,5
5	V1	136,9	136,2	118,8
	V2	106,9	109,8	108,8
	V3	125,9	142,5	147,8
	V4	133,4	132,3	132,8

Fonte: O autor (2016).

Para cada fase desconectada, o motor exige das fases restantes um maior nível de corrente. Conforme Pereira et al. (2015), os níveis máximos e mínimos de corrente solicitados

pelo motor são, respectivamente, de 146 % e 107 % da corrente nominal, quando ocorre a abertura (falha) em uma das 5 fases do motor.

A Tabela 36 exibe os valores de tensão e corrente medidos durante os ensaios de aberturas (falhas) nas fases do secundário conectado ao motor com carga, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão entre os secundários ainda conectados ao motor.

**Tabela 36 – Tensão e corrente para falha nas fases nos ensaios com motor sob carga**

Abertura na fase	Secundário	Tensão (V)			Corrente (A)		
		Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
1	V1	216,90	225,00	220,18			
	V2	206,50	209,80	203,24	7,12	7,22	7,12
	V3	211,00	216,60	209,44	5,21	5,55	5,10
	V4	210,20	214,30	208,85	5,69	5,26	4,55
	V5	207,80	212,20	208,08	6,87	7,58	7,40
	Média	208,88	213,23	207,40	6,22	6,40	6,04
	$F_D$	1,14 %	1,61 %	2,01 %			
2	V1	211,10	213,10	209,50	7,04	6,59	6,80
	V2	215,90	219,90	218,20			
	V3	210,30	213,60	208,30	7,13	7,64	7,44
	V4	213,90	216,80	213,30	5,95	6,25	6,60
	V5	210,60	213,30	207,30	5,23	5,13	4,29
	Média	211,48	214,20	209,60	6,34	6,40	6,28
	$F_D$	1,15 %	1,21 %	1,77 %			
3	V1	213,10	214,80	210,60	5,67	5,42	4,92
	V2	210,50	211,60	209,00	6,13	6,32	6,33
	V3	214,90	218,60	212,90			
	V4	211,50	212,30	209,60	7,68	7,89	7,67
	V5	213,30	216,60	212,10	5,98	6,38	5,88
	Média	212,10	213,83	210,33	6,37	6,50	6,20
	$F_D$	0,75 %	1,30 %	0,84 %			
4	V1	214,30	216,50	212,10	6,00	5,57	5,30
	V2	211,90	213,90	211,40	5,64	5,92	6,00
	V3	210,90	214,00	209,80	6,89	7,21	6,78
	V4	215,90	217,50	214,50			
	V5	209,50	213,30	208,90	7,18	7,05	6,94
	Média	211,65	214,43	210,55	6,43	6,44	6,25
	$F_D$	1,25 %	0,97 %	0,78 %			
5	V1	207,70	212,20	208,10	7,01	6,85	5,89
	V2	209,20	213,20	210,80	4,90	4,97	5,17
	V3	209,20	216,80	212,40	5,88	7,11	6,76
	V4	207,40	211,40	209,90	6,63	6,43	6,64
	V5	213,50	222,50	218,30			
	Média	208,38	213,40	210,30	6,11	6,34	6,12
	$F_D$	0,47 %	1,59 %	1,05 %			

Fonte: O autor (2016).

Tanto para o motor a vazio como para o motor sob carga, todas as 3 conexões primárias apresentam valores do fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão aceitáveis com 4 das 5 fases ainda conectadas ao motor e, portanto, podem-se considerar todas como equilibradas. A conexão primária em delta apresenta os melhores resultados para o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) quando o conversor está conectado ao motor sob carga com apenas 4 das 5 fases, exceto quando a falha ocorre na fase 4, onde as conexões zig-zag e estrela desempenham melhor equilíbrio.

A Tabela 37 mostra as correntes e as distorções harmônicas das correntes medidas nas linhas de alimentação do primário do transformador durante os ensaios com o motor sob carga, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

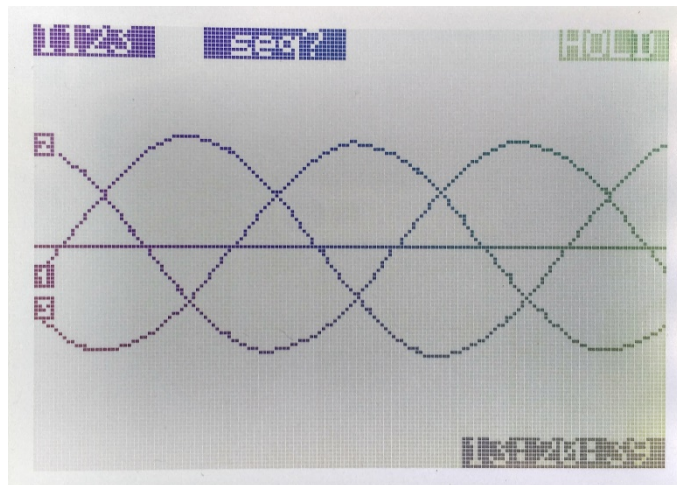
**Tabela 37 – Distorção harmônica de corrente do primário nos ensaios com o motor sob carga**

Abertura na fase	Fase	Corrente de linha (A)			Distorção harmônica de corrente		
		Delta	Estrela	Zig-zag	Delta	Estrela	Zig-zag
sem abertura	A	12,77	14,78	8,51	1,12 %	4,60 %	15,37 %
	B	12,34	15,07	8,16	1,44 %	3,75 %	14,97 %
	C	12,21	13,60	8,21	1,61 %	5,46 %	15,08 %
1	A	11,72	10,38	7,10	2,10 %	2,59 %	16,49 %
	B	11,20	16,06	7,59	1,88 %	3,33 %	16,59 %
	C	13,15	16,32	9,55	1,52 %	4,62 %	12,65 %
2	A	12,24	15,55	8,15	2,34 %	4,44 %	17,07 %
	B	13,48	16,58	9,21	1,55 %	4,08 %	13,62 %
	C	11,26	10,66	6,90	2,98 %	7,12 %	14,32 %
3	A	13,55	14,97	9,05	2,17 %	4,67 %	15,67 %
	B	11,26	13,39	7,18	3,67 %	6,68 %	14,23 %
	C	11,97	14,39	8,22	2,04 %	5,38 %	16,42 %
4	A	11,36	14,26	7,25	2,88 %	6,45 %	15,14 %
	B	12,71	16,43	8,67	1,92 %	3,50 %	14,42 %
	C	12,84	12,41	8,56	2,50 %	3,97 %	16,58 %
5	A	13,28	17,22	9,28	1,15 %	3,25 %	13,10 %
	B	12,09	11,60	8,03	2,54 %	2,26 %	16,66 %
	C	10,35	13,92	6,99	3,47 %	5,43 %	17,15 %

Fonte: O autor (2016).

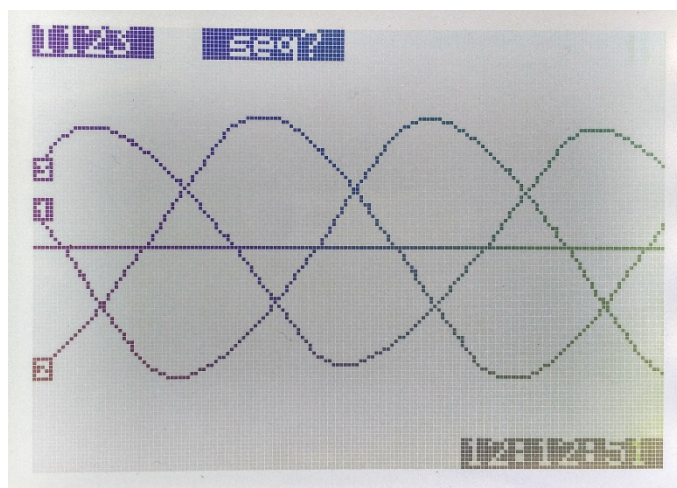
Ao alimentar o motor sob carga, percebe-se que as distorções harmônicas das correntes no primário mantiveram os mesmos níveis quando alimentando o motor a vazio. As Fig. 59, 60 e 61 mostram as formas de onda no tempo das correntes nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta, estrela e zig-zag respectivamente, alimentando o motor sob carga.

Figura 59 – Corrente no primário em delta com motor sob carga



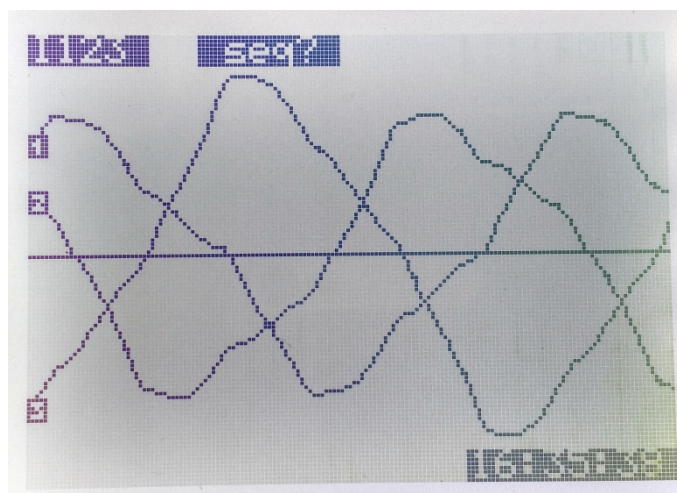
Fonte: O autor (2016).

Figura 60 – Corrente no primário em estrela com motor sob carga



Fonte: O autor (2016).

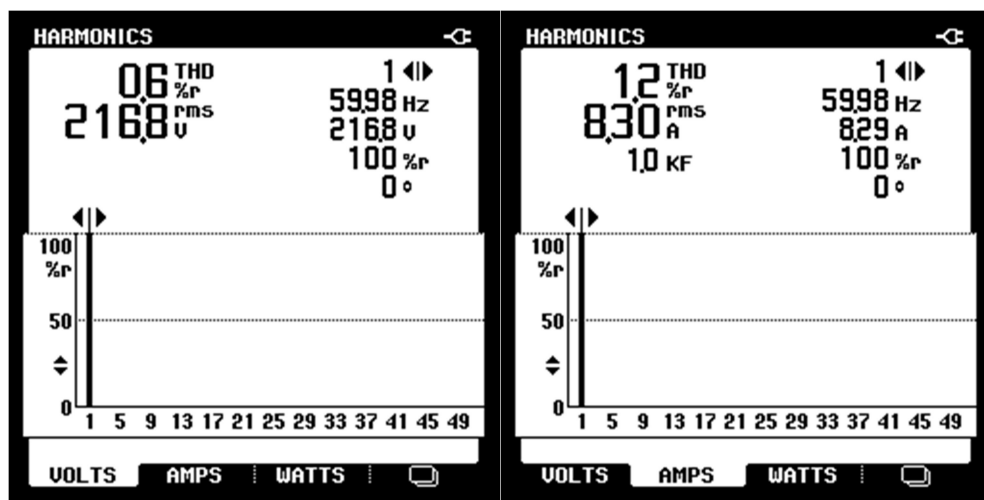
Figura 61 – Corrente no primário em zig-zag com motor sob carga



Fonte: O autor (2016).

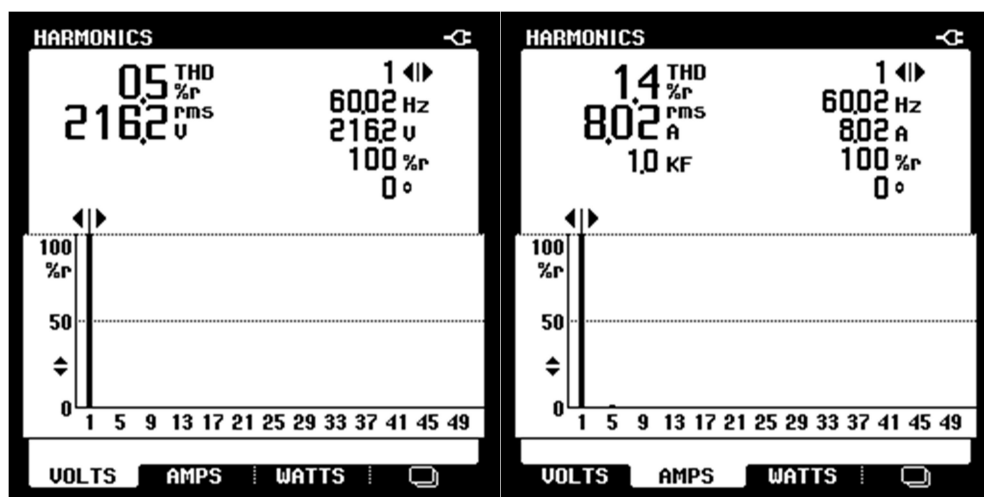
Como pode ser visualizada, a distorção harmônica de corrente no primário é maior para a ligação zig-zag. Com o intuito de verificar a influência do neutro da rede conectado ao neutro da ligação zig-zag, o ensaio com o motor sob carga foi executado novamente desconectando o neutro da rede do primário do transformador. As Fig. 62 à 64 mostram os valores de tensão e corrente na frequência fundamental e a total (RMS), o percentual da distorção harmônica de tensão e corrente, assim como as frequências presentes no espectro das harmônicas para as 3 fases (A, B e C) do primário em zig-zag (sem o neutro da rede conectado) do transformador alimentando o motor sob carga.

Figura 62 – Harmônicas no primário A em zig-zag (sem neutro da rede) - motor sob carga



Fonte: O autor (2016).

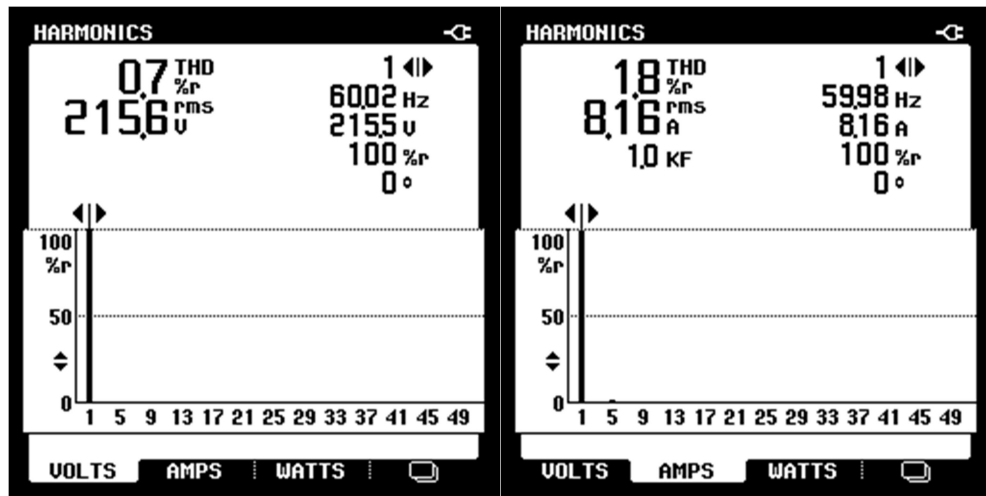
Figura 63 – Harmônicas no primário B em zig-zag (sem neutro da rede) - motor sob carga



Fonte: O autor (2016).



Figura 64 – Harmônicas no primário C em zig-zag (sem neutro da rede) - motor sob carga



Fonte: O autor (2016).

Ao retirar o caminho para a harmônica de corrente de 3ª ordem, as correntes no primário em zig-zag (sem neutro da rede) apresentam distorção harmônica praticamente nula.

A Tabela 38 mostra as distorções harmônicas de tensão medidas nas linhas de alimentação do primário do transformador durante os ensaios com o motor sob carga, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

**Tabela 38 – Distorção harmônica de tensão do primário nos ensaios com o motor sob carga**

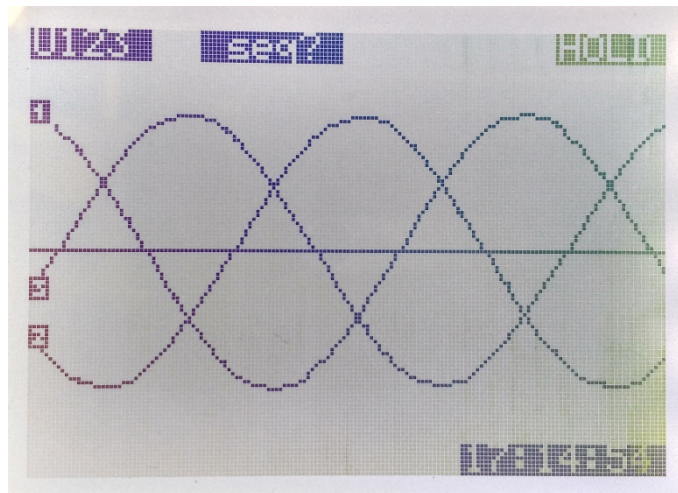
Abertura na fase	Fase	Distorção harmônica de tensão		
		Delta	Estrela	Zig-zag
sem abertura	A	0,82 %	0,86 %	0,79 %
	B	1,02 %	0,95 %	1,00 %
	C	1,16 %	1,04 %	1,06 %
1	A	0,97 %	1,53 %	0,78 %
	B	1,04 %	1,23 %	0,99 %
	C	1,20 %	1,20 %	1,06 %
2	A	0,81 %	0,92 %	0,71 %
	B	1,03 %	1,14 %	0,98 %
	C	1,47 %	1,23 %	1,12 %
3	A	0,77 %	1,19 %	0,75 %
	B	1,13 %	0,90 %	1,11 %
	C	1,06 %	1,08 %	1,06 %
4	A	1,09 %	0,78 %	0,76 %
	B	0,89 %	1,20 %	1,02 %
	C	1,13 %	1,61 %	1,04 %
5	A	0,85 %	1,03 %	0,77 %
	B	0,97 %	1,84 %	1,07 %
	C	1,29 %	1,21 %	1,13 %

Fonte: O autor (2016).

Ao avaliarmos as distorções harmônicas de tensão no primário em zig-zag, com ou sem o neutro da rede conectado ao primário, o mesmo apresenta os menores índices de distorção de tensão quando comparadas as 3 ligações (delta, estrela e zig-zag), principalmente com 4 das 5 fases conectadas ao motor. Independente da conexão do primário do transformador, os valores das distorções harmônicas de tensão no primário são baixos e comportam-se de maneira similar, tanto para cargas resistivas como para o motor a vazio e sob carga.

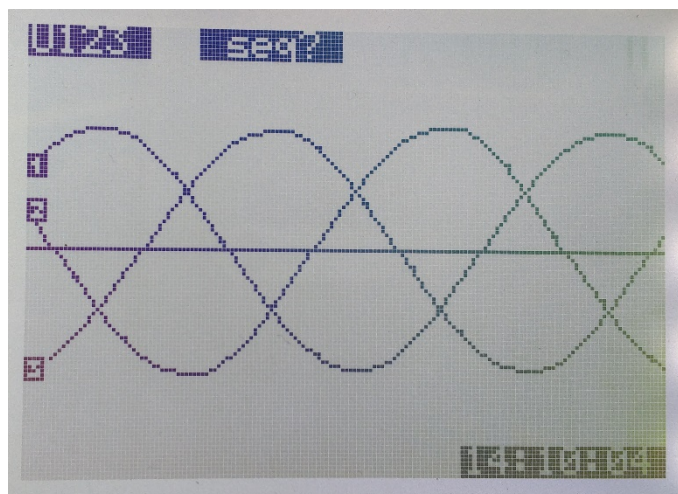
As Fig. 65, 66 e 67 mostram as formas de onda no tempo das tensões nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta, estrela e zig-zag, respectivamente, alimentando o motor sob carga com a fase 5 do secundário aberta.

Figura 65 – Tensão no primário em delta com motor sob carga com abertura da fase 5



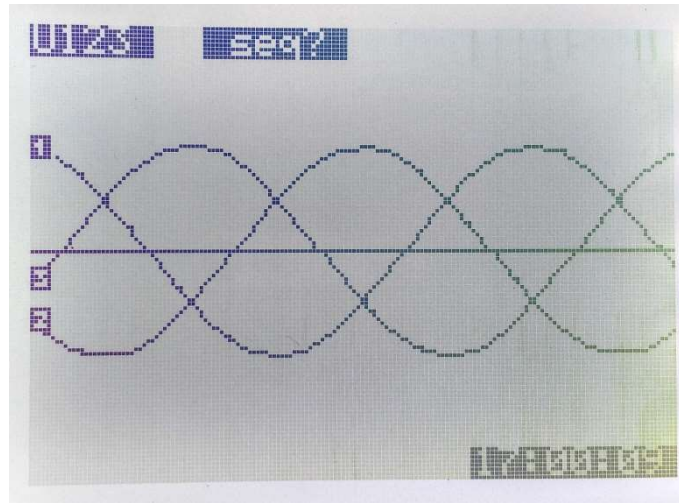
Fonte: O autor (2016).

Figura 66 – Tensão no primário em estrela com motor sob carga com abertura da fase 5



Fonte: O autor (2016).

Figura 67 – Tensão no primário em zig-zag com motor sob carga com abertura da fase 5

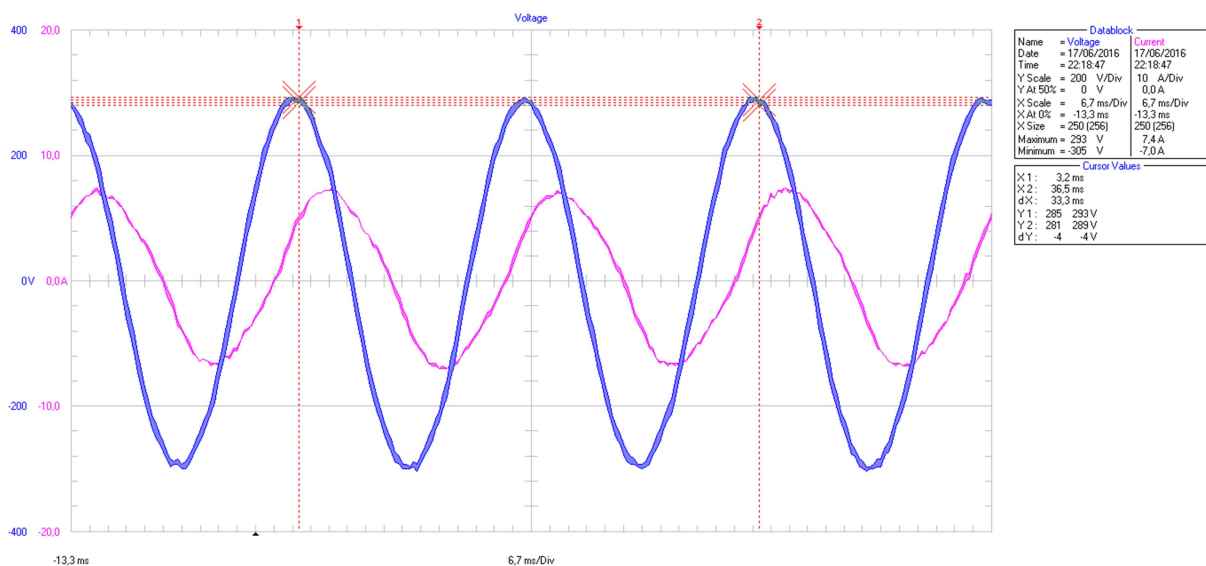


Fonte: O autor (2016).

Conforme visualizado nas formas de onda da tensão, o comportamento da tensão das linhas de alimentação do primário do conversor não apresenta grandes distorções, mesmo com a abertura de uma das fases do secundário que está conectado ao motor sob carga.

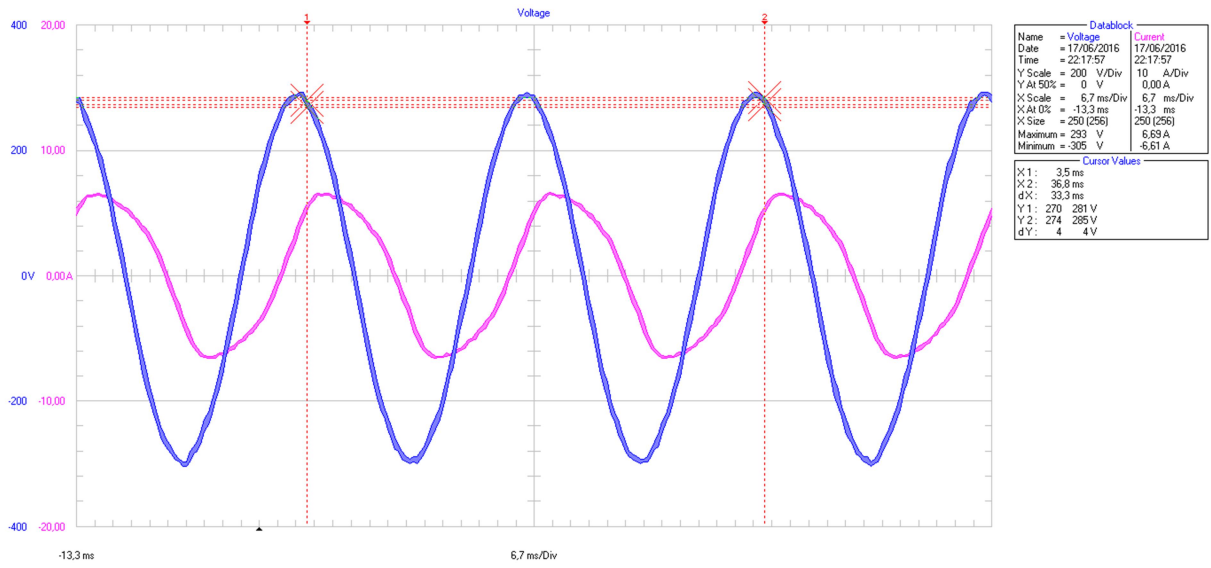
Para comparar as formas de onda de tensão e corrente já apresentadas com a carga resistiva e também com o motor a vazio, ambos com o primário conectado em zig-zag, as Fig. 68 à 72 mostram as formas de onda no tempo da tensão (azul) e corrente (magenta) nos 5 secundários do transformador alimentando o motor sob carga com o primário do transformador conectado em zig-zag.

Figura 68 – Tensão e corrente no secundário 1 com motor sob carga e primário em zig-zag



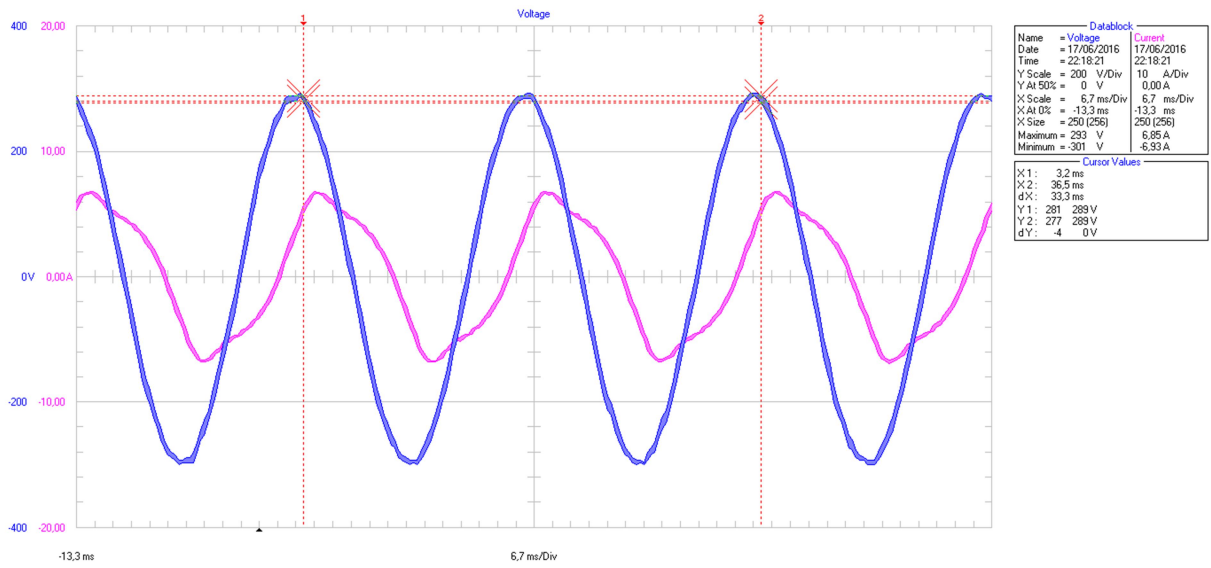
Fonte: O autor (2016).

Figura 69 – Tensão e corrente no secundário 2 com motor sob carga e primário em zig-zag



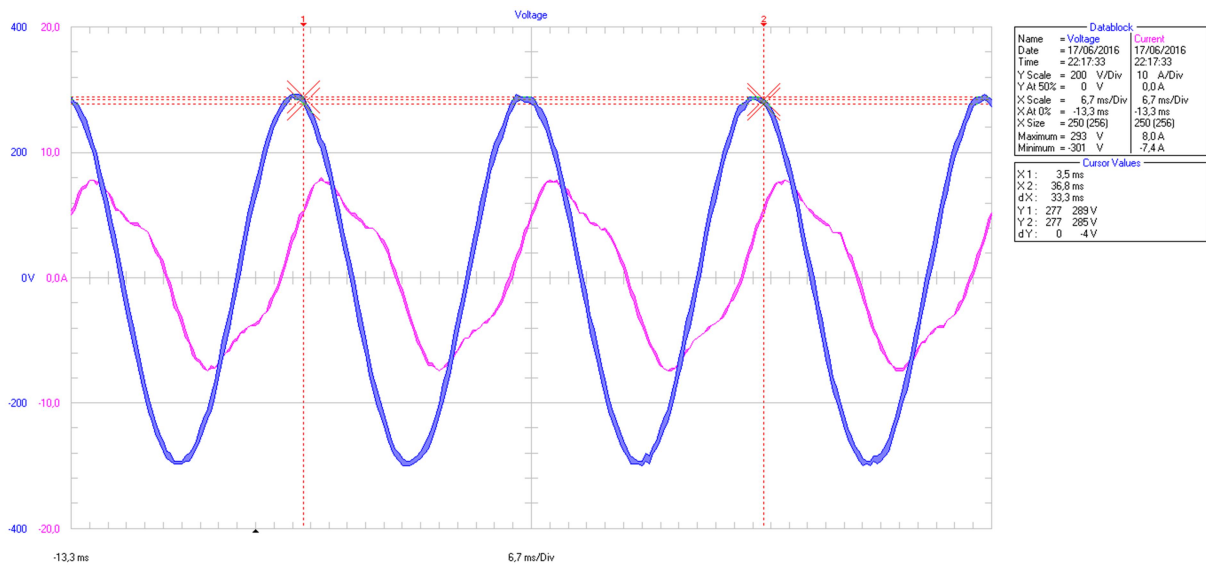
Fonte: O autor (2016).

Figura 70 – Tensão e corrente no secundário 3 com motor sob carga e primário em zig-zag



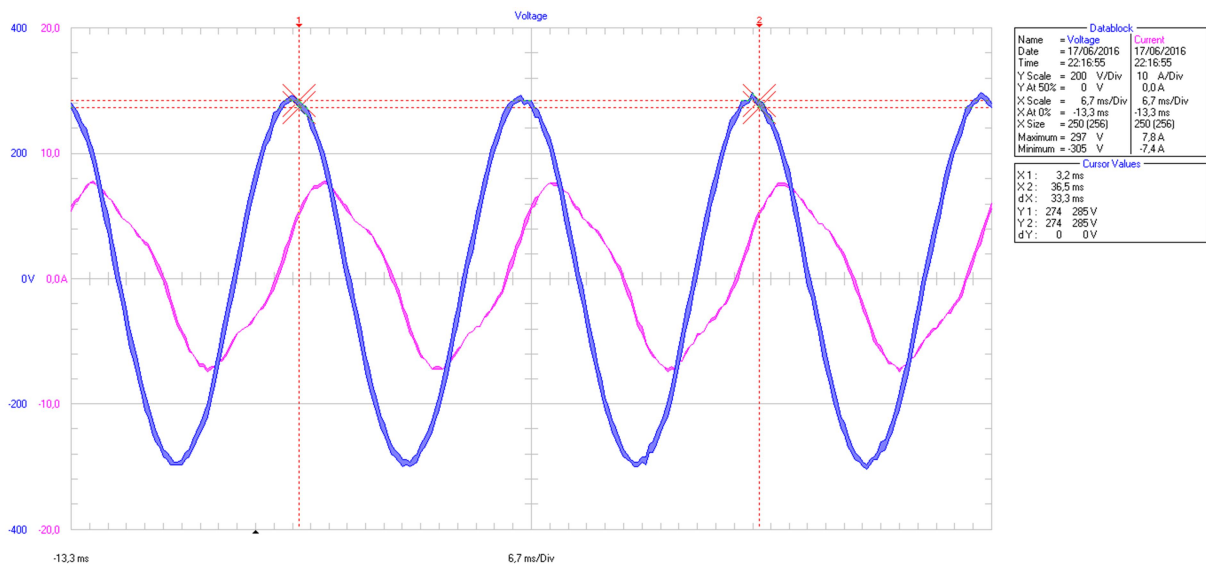
Fonte: O autor (2016).

Figura 71 – Tensão e corrente no secundário 4 com motor sob carga e primário em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

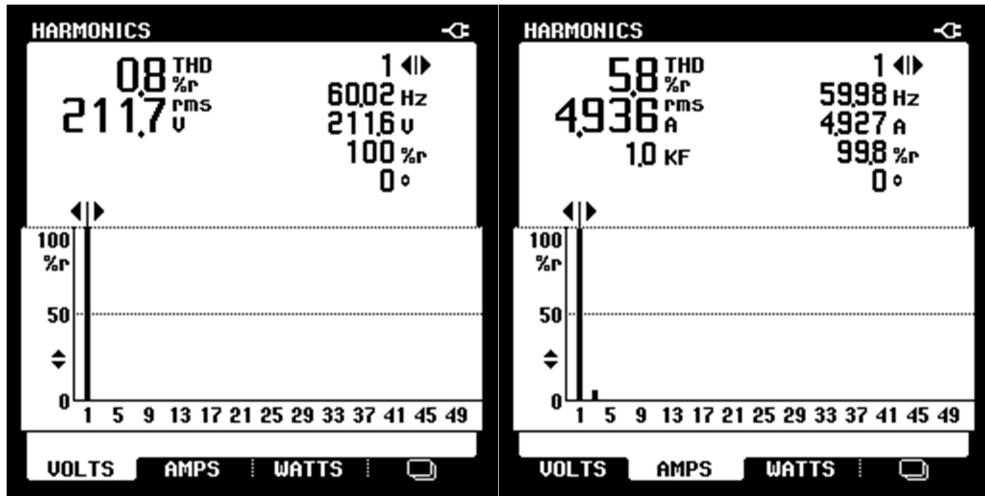
Figura 72 – Tensão e corrente no secundário 5 com motor sob carga e primário em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

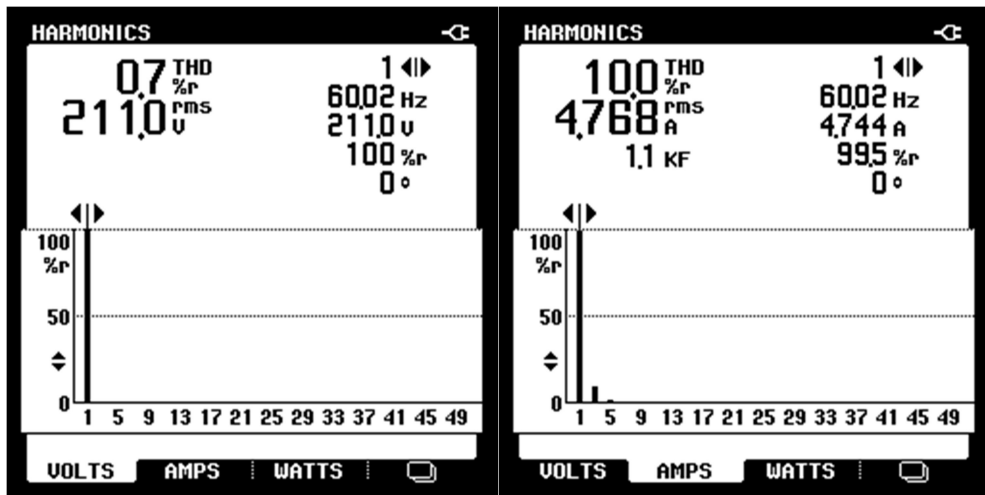
Para as formas de onda apresentadas anteriormente, foram verificadas as distorções harmônicas de tensão e corrente. As Fig. 73 à 77 mostram os valores de tensão e corrente na frequência fundamental e a total (RMS), o percentual da distorção harmônica de tensão e corrente, assim como as frequências presentes no espectro das harmônicas para todas as 5 fases do secundário do transformador alimentando o motor sob carga e com o primário conectado em zig-zag.

Figura 73 – Harmônicas no secundário 1 com motor sob carga e primário em zig-zag



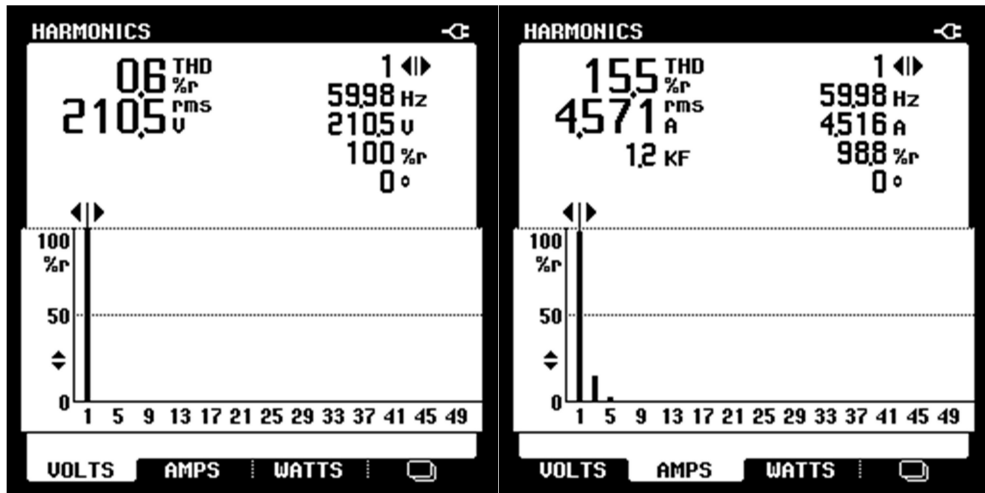
Fonte: O autor (2016).

Figura 74 – Harmônicas no secundário 2 com motor sob carga e primário em zig-zag



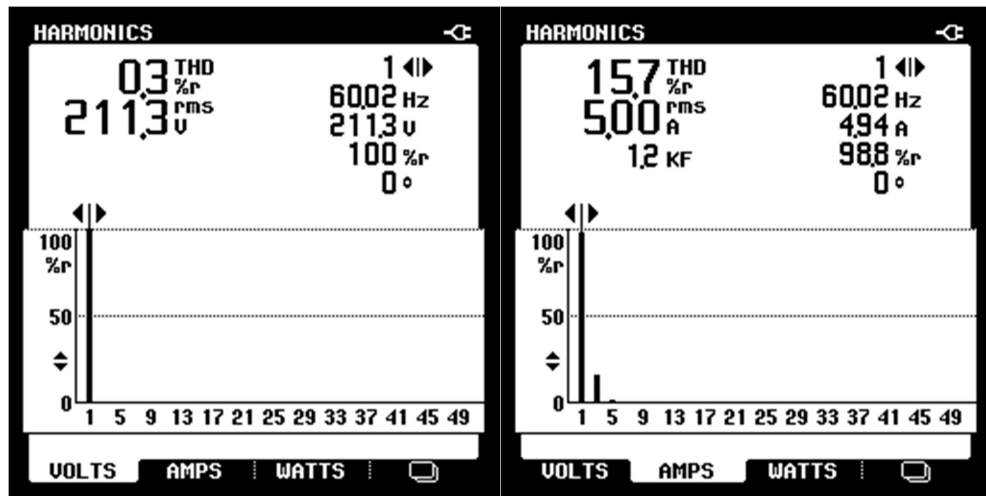
Fonte: O autor (2016).

Figura 75 – Harmônicas no secundário 3 com motor sob carga e primário em zig-zag



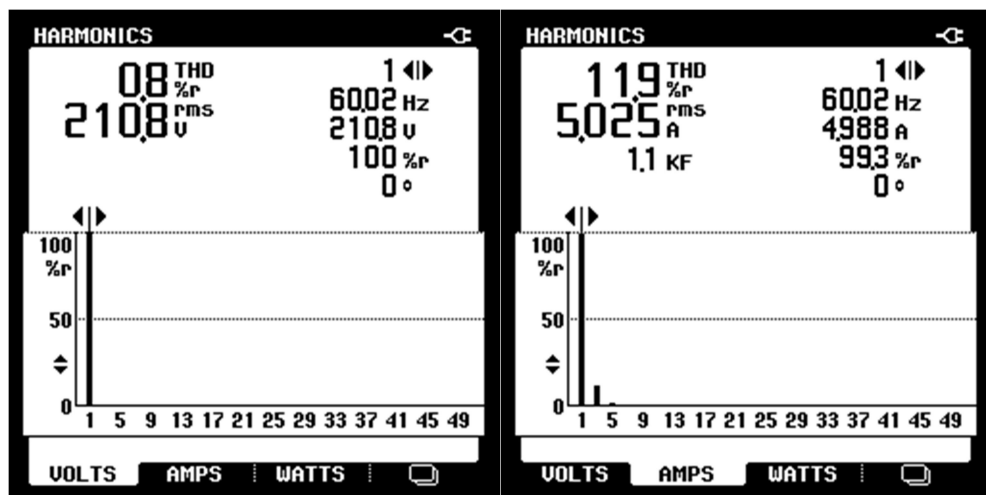
Fonte: O autor (2016).

Figura 76 – Harmônicas no secundário 4 com motor sob carga e primário em zig-zag



Fonte: O autor (2016).

Figura 77 – Harmônicas no secundário 5 com motor sob carga e primário em zig-zag

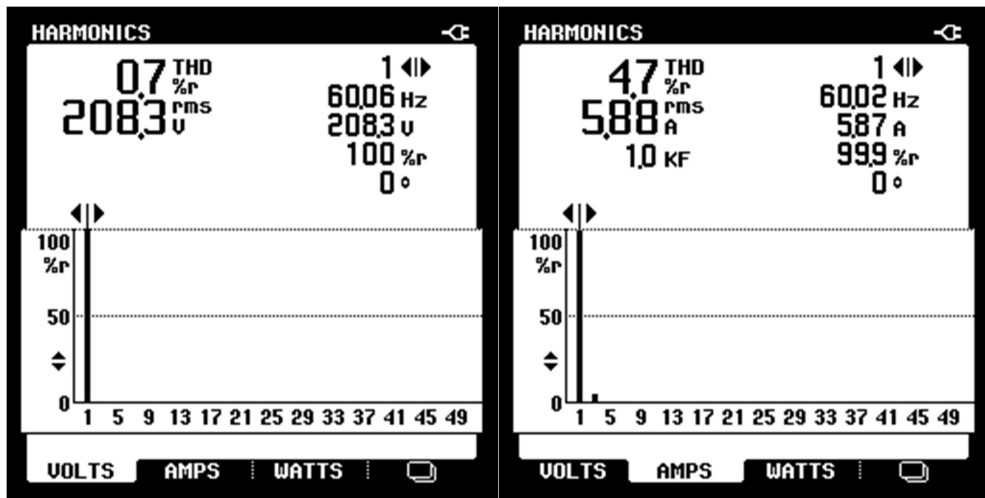


Fonte: O autor (2016).

As distorções harmônicas de corrente presentes nas 5 fases do secundário do transformador, ao alimentar o motor sob carga, revelam principalmente a existência da frequência de 180 Hz (3ª harmônica). As correntes de 3ª ordem harmônica surgem em virtude da saturação do motor. (PEREIRA et al., 2012).

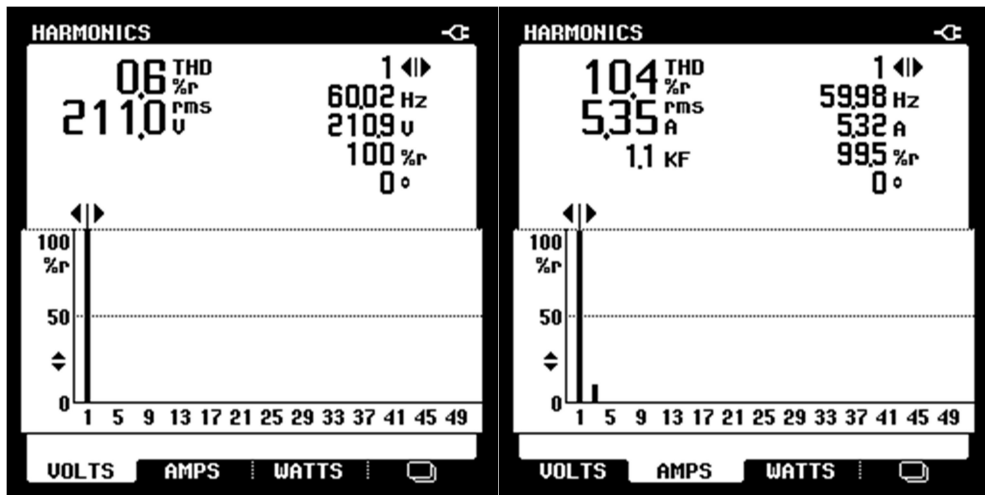
Provocada a abertura (falha) da fase 5, as Fig. 78 à 81 mostram os valores de tensão e corrente na frequência fundamental e a total (RMS), o percentual da distorção harmônica de tensão e corrente, assim como as frequências presentes no espectro das harmônicas para todas as 4 fases do secundário do transformador que ainda alimenta o motor sob carga e com o primário conectado em zig-zag.

Figura 78 – Harmônicas no secundário 1 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5)



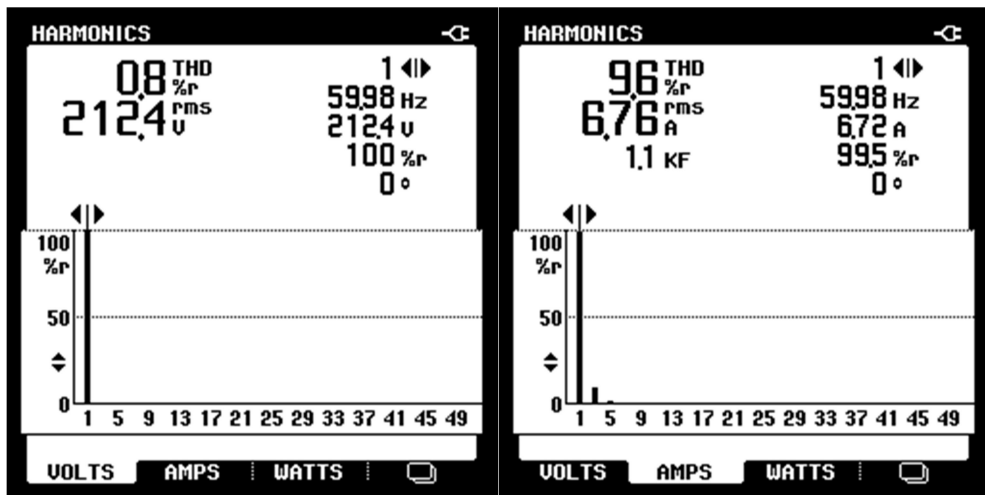
Fonte: O autor (2016).

Figura 79 – Harmônicas no secundário 2 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

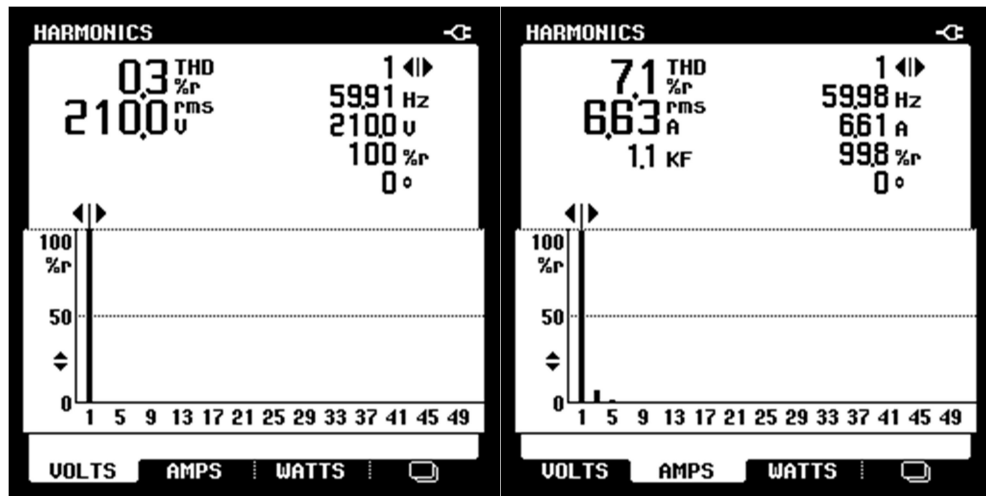
Figura 80 – Harmônicas no secundário 3 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).



Figura 81 – Harmônicas no secundário 4 com motor sob carga e primário em zig-zag (falha fase 5)



Fonte: O autor (2016).

Com a abertura da fase 5, todas as fases ainda conectadas ao motor sob carga apresentam distorções harmônicas de corrente. A principal frequência que aparece é novamente a de 180 Hz (3ª harmônica). Já as distorções harmônicas de tensão continuam praticamente nulas, apesar da falha em uma das fases.

Para confirmar o valor de indução máxima presente nas 3 colunas do transformador quando está conectado ao motor sob carga, foram novamente medidas as tensões nas 10 espiras externas. Utilizando a Equação 44 foram calculados os valores de indução máxima em cada uma das 3 colunas. A Tabela 39 mostra os valores máximos de indução magnética presentes em cada coluna do transformador durante a realização dos ensaios com o motor sob carga, para a conexão primária em delta, estrela e em zig-zag, assim como após as aberturas (falhas) nas fases do secundário.

**Tabela 39 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com motor sob carga**

Abertura na fase	Conexão Primária	Coluna B (T)	Coluna A (T)	Coluna C (T)
sem abertura		1,054	1,059	1,056
1	Delta	1,046	1,066	1,048
2		1,054	1,056	1,065
3		1,067	1,061	1,056
4		1,049	1,066	1,058
5		1,046	1,041	1,045
sem abertura		1,057	1,058	1,051
1	Estrela	1,066	1,106	1,050
2		1,067	1,061	1,089
3		1,085	1,066	1,061
4		1,068	1,076	1,069
5		1,094	1,057	1,059
sem abertura		1,048	1,050	1,057
1	Zig-zag	1,048	1,093	1,013
2		1,028	1,050	1,089
3		1,061	1,043	1,054
4		1,046	1,056	1,068
5		1,081	1,033	1,058

Fonte: O autor (2016).

Da mesma forma que com o conversor alimentando o motor a vazio, ao adicionarmos uma carga ao motor, neste caso o gerador de corrente contínua com carga resistiva, os valores apresentados para a indução magnética máxima, presente nas 3 colunas do transformador, permanecem muito próximos, inclusive diante da abertura das fases na carga. Considerando o valor nominal da indução do projeto de 1,06 T, dos valores apresentados, o máximo da ultrapassagem foi de 4,3 % do valor nominal, não prejudicando o funcionamento do transformador, garantindo a não saturação do núcleo e mantendo os níveis de perdas no mesmo. A diferença da indução está relacionada a flutuação das tensões aplicadas no primário do transformador, seja em relação a abertura das fases do secundário, e até mesmo pela utilização de uma rede desequilibrada para os ensaios.

#### 4.5 ENSAIOS DO CONVERSOR COM CARGA NOMINAL

Os últimos ensaios realizados utilizaram um conjunto de cargas suficientes para extrair a potência nominal do conversor. O mesmo motor pentafásico com o gerador de corrente contínua, acoplado ao seu eixo, foi utilizado. Porém, foi aumentada a carga do gerador, agora utilizando 12 resistências de 80  $\Omega$  em paralelo, equivalente à 6,67  $\Omega$ . Este valor, o máximo suportado pelo gerador de corrente contínua. Em paralelo com o motor, cada uma das 5 fases

do conversor foi conectada à 3 resistências de 500  $\Omega$  em paralelo, equivalente à 166,67  $\Omega$  para cada fase e também à 3 lâmpadas incandescentes de 200 W, com total de 600 W por fase. A Fig. 82 ilustra o conjunto de cargas utilizado nos testes com potência nominal.

Figura 82 – Conjunto de cargas para os testes com potência nominal



Fonte: O autor (2016).

Os ensaios com a potência nominal do conversor foram realizados com os enrolamentos primários conectados em delta. A Tabela 40 apresenta os valores de tensão e corrente nos secundários do transformador medidos durante os ensaios com potência nominal, assim como o fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão dos secundários.

**Tabela 40 – Tensão e corrente dos secundários nos ensaios com carga nominal**

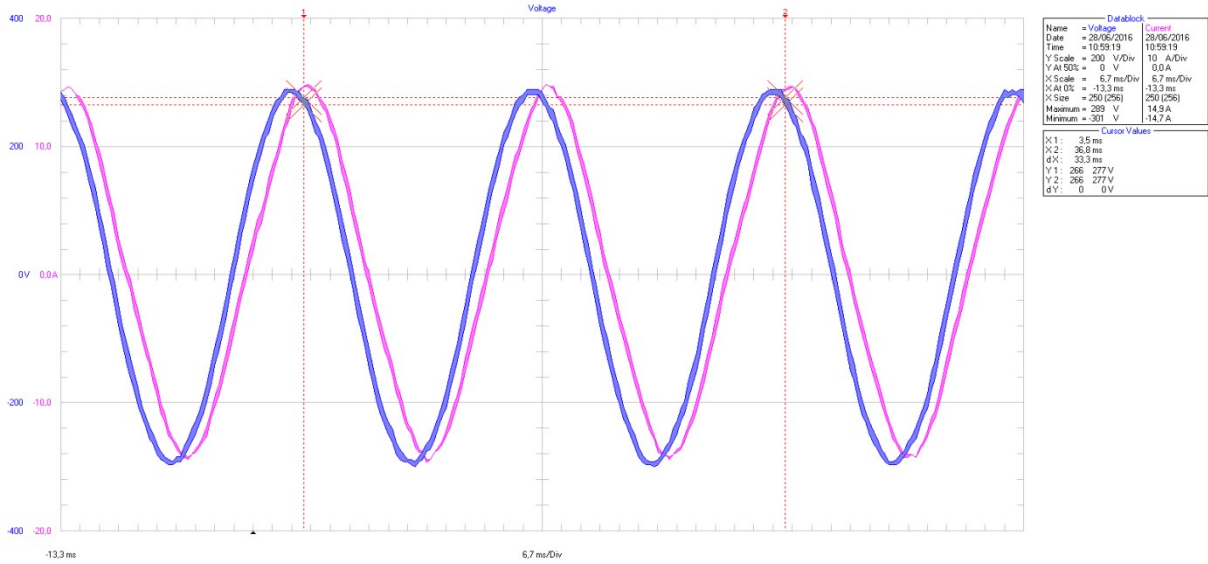
Secundário	Tensão nos secundários (V)	Corrente nos secundários (A)
1	209,10	9,96
2	206,40	8,82
3	208,80	9,61
4	207,60	9,36
5	207,00	9,73
Média	207,78	9,50
$F_D$	0,66 %	

Fonte: O autor (2016).

Os secundários do conversor apresentam um fator de desequilíbrio ( $F_D$ ) de tensão dentro do limite estabelecido e, portanto, pode-se confirmar o equilíbrio de tensão para os secundários quando nestes circula a corrente nominal do conversor.

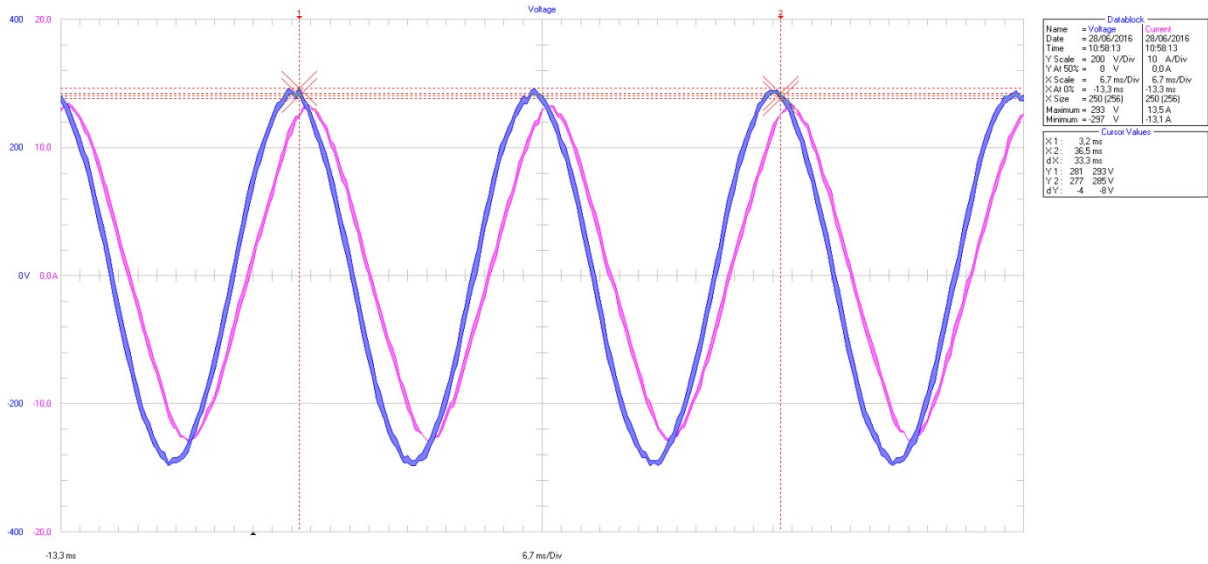
As Fig. 83 à 87 mostram as formas de onda no tempo da tensão (azul) e corrente (magenta) nos 5 secundários do transformador com potência nominal e com o primário do transformador conectado em delta.

Figura 83 – Tensão e corrente no secundário 1 com carga nominal e primário em delta



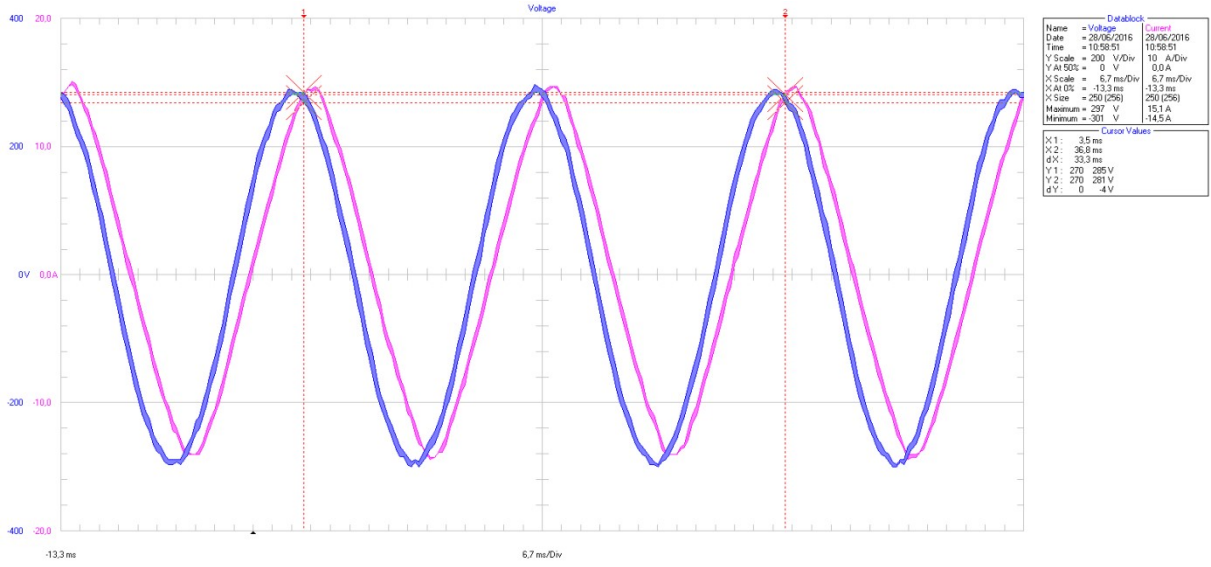
Fonte: O autor (2016).

Figura 84 – Tensão e corrente no secundário 2 com carga nominal e primário em delta



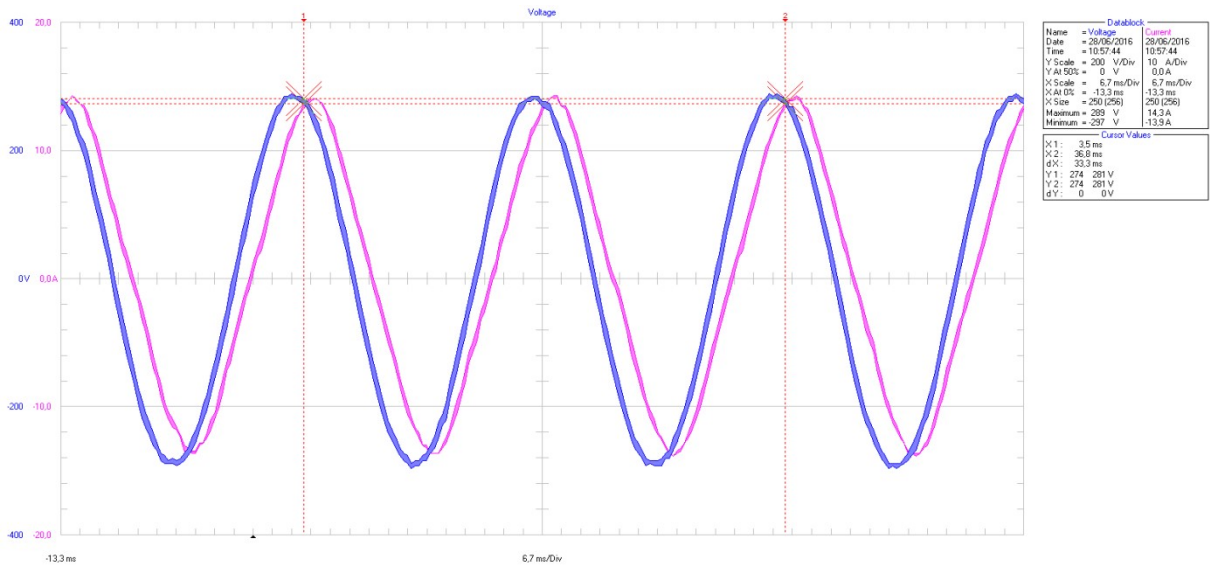
Fonte: O autor (2016).

Figura 85 – Tensão e corrente no secundário 3 com carga nominal e primário em delta



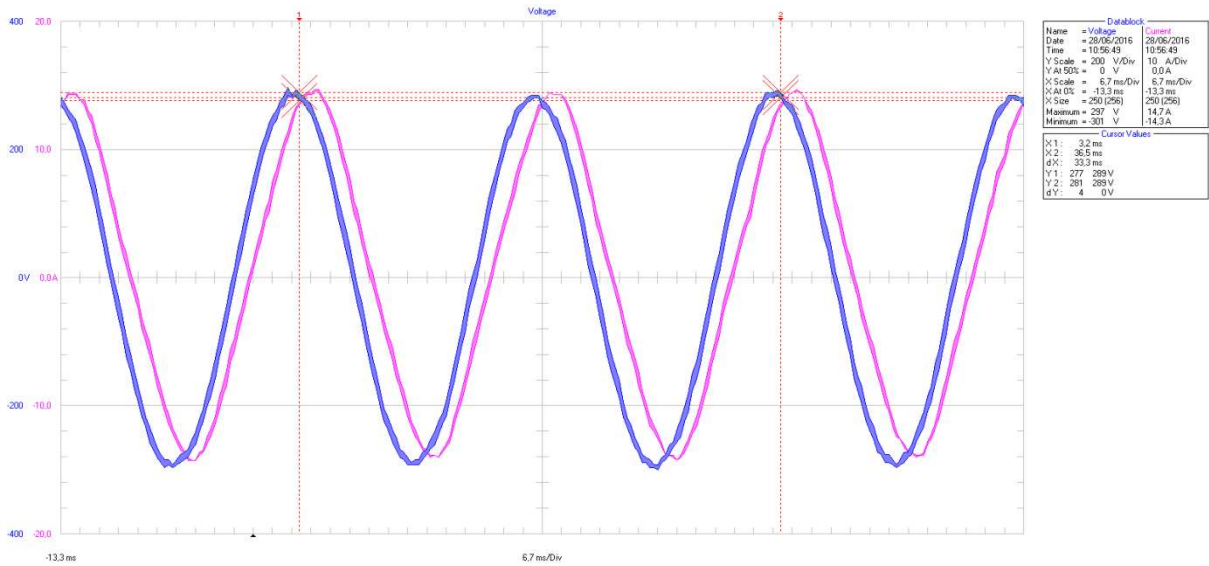
Fonte: O autor (2016).

Figura 86 – Tensão e corrente no secundário 4 com carga nominal e primário em delta



Fonte: O autor (2016).

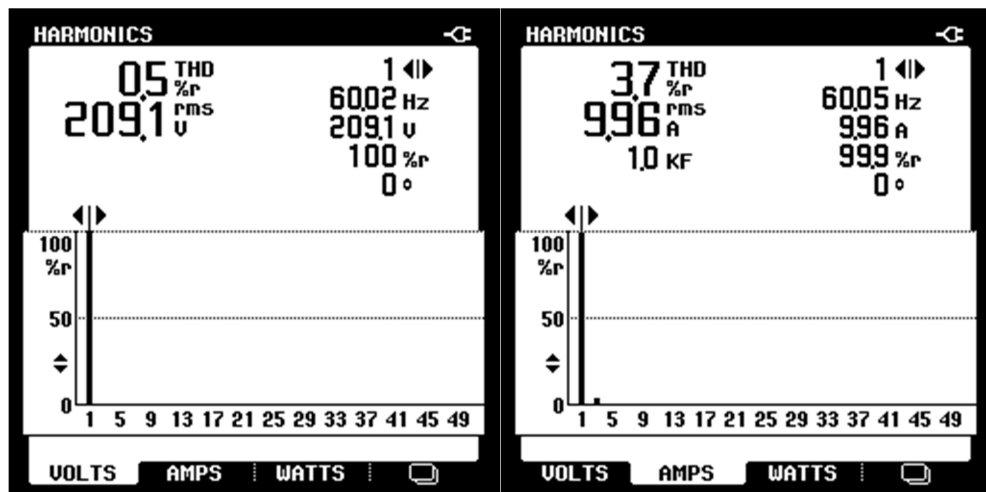
Figura 87 – Tensão e corrente no secundário 5 com carga nominal e primário em delta



Fonte: O autor (2016).

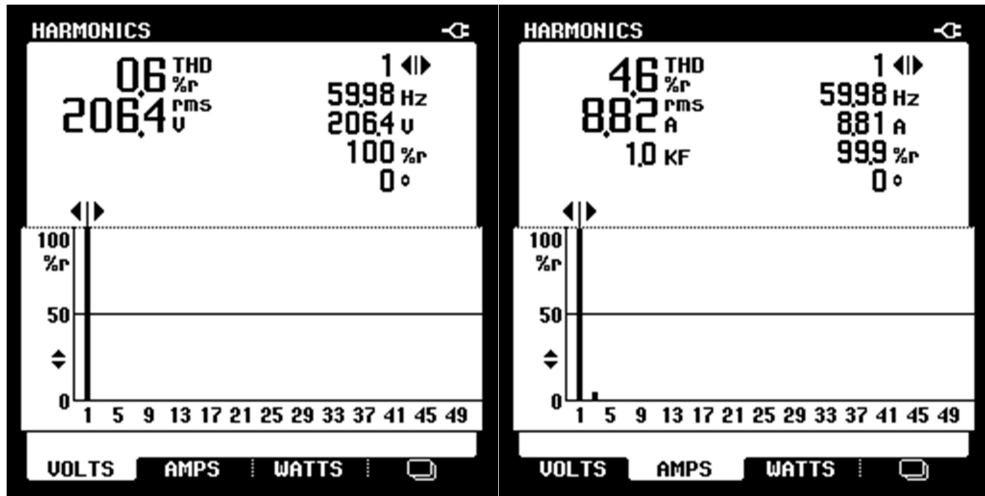
Para as formas de onda apresentadas anteriormente, foram verificadas as distorções harmônicas de tensão e corrente. As Fig. 88 à 92 mostram os valores de tensão e corrente na frequência fundamental e a total (RMS), o percentual da distorção harmônica de tensão e corrente, assim como as frequências presentes no espectro das harmônicas para todas as 5 fases do secundário do transformador com carga nominal e com o primário conectado em delta.

Figura 88 – Harmônicas no secundário 1 com carga nominal e primário em delta



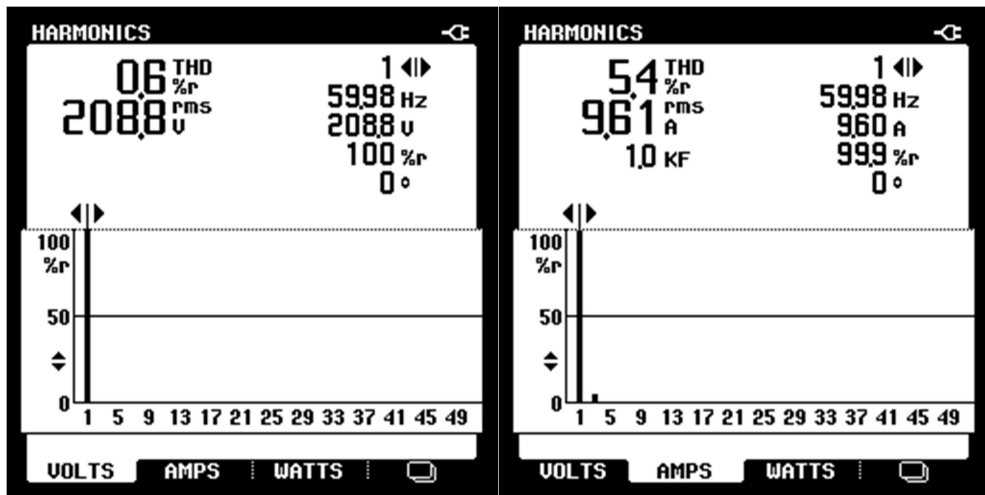
Fonte: O autor (2016).

Figura 89 – Harmônicas no secundário 2 com carga nominal e primário em delta



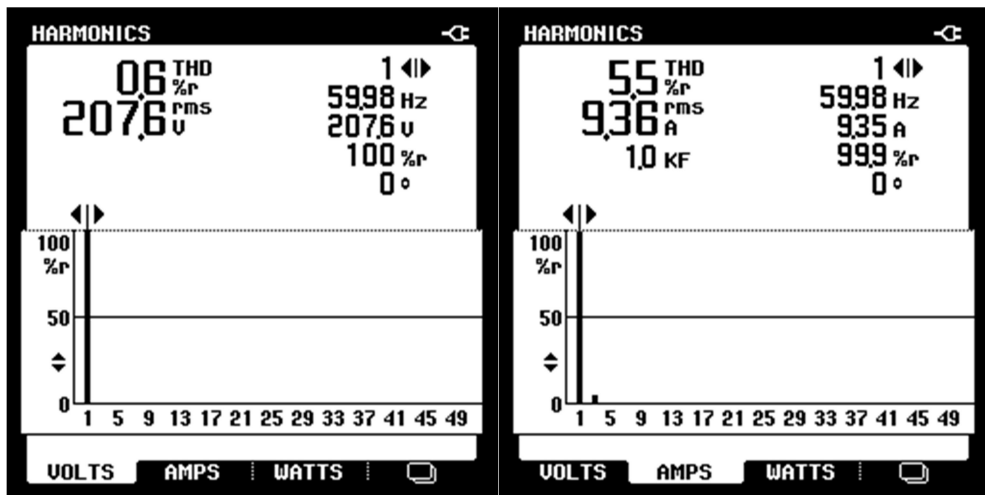
Fonte: O autor (2016).

Figura 90 – Harmônicas no secundário 3 com carga nominal e primário em delta



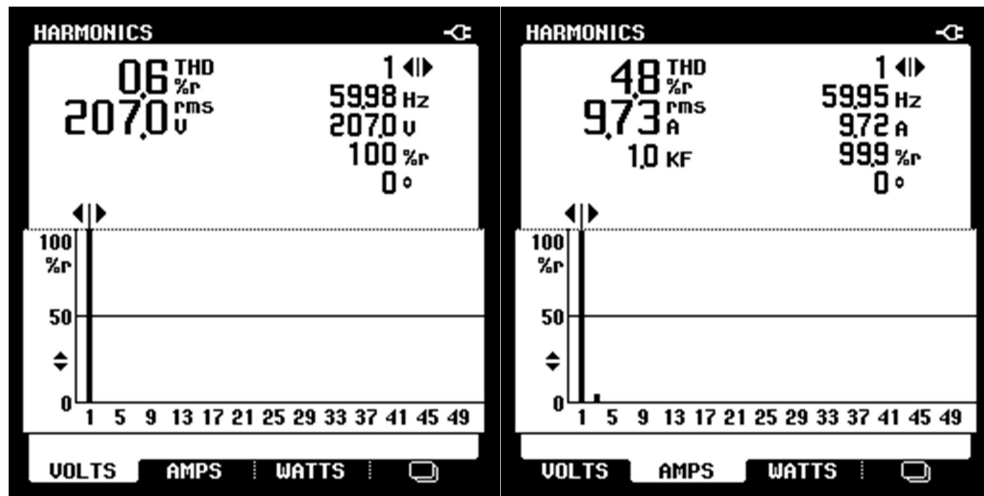
Fonte: O autor (2016).

Figura 91 – Harmônicas no secundário 4 com carga nominal e primário em delta



Fonte: O autor (2016).

Figura 92 – Harmônicas no secundário 5 com carga nominal e primário em delta



Fonte: O autor (2016).

Analisando o espectro harmônico das correntes nas 5 fases, evidencia-se a componente de 3ª ordem como a mais representativa das múltiplas harmônicas. A Tabela 41 apresenta os valores das correntes nos secundários na frequência fundamental, assim como das múltiplas frequências.

**Tabela 41 – Corrente dos secundários na frequência fundamental e múltiplas**

Secundário	Corrente nos secundários			
	Fundamental	3ª ordem	5ª ordem	7ª ordem
1	9,96 A	0,38 A	0,05 A	0,01 A
2	8,81 A	0,39 A	0,07 A	0,02 A
3	9,60 A	0,51 A	0,10 A	0,03 A
4	9,35 A	0,50 A	0,08 A	0,02 A
5	9,72 A	0,46 A	0,06 A	0,01 A

Fonte: O autor (2016).

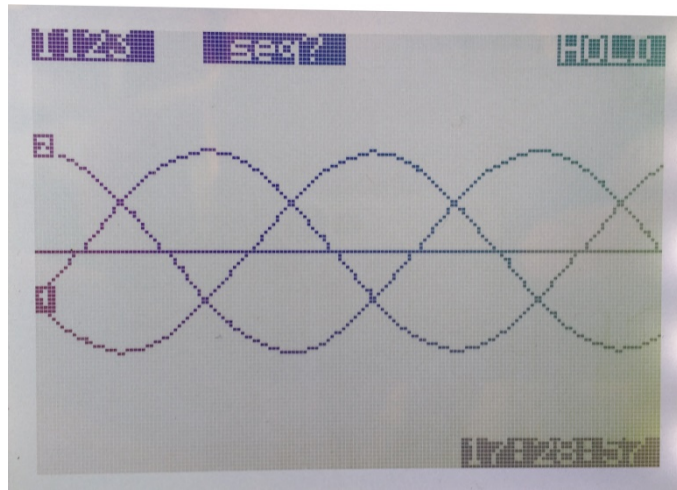
Novamente as distorções harmônicas de corrente presentes nas 5 fases do secundário do transformador revelam, principalmente, a existência da frequência de 180 Hz (3ª harmônica). Estas correntes de 3ª ordem surgem em virtude da saturação do motor (PEREIRA et al., 2012), que faz parte do conjunto de cargas utilizada nos ensaios com potência nominal.

Ao avaliarmos as distorções harmônicas de tensão nos secundários, o mesmo apresenta índices de distorção de tensão mínimos, similares aos ensaios realizados com as anteriores cargas.

Quanto ao primário do conversor, também foram avaliadas as correntes e tensões. A Fig. 93 mostra a forma de onda no tempo da corrente nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta e com carga nominal.



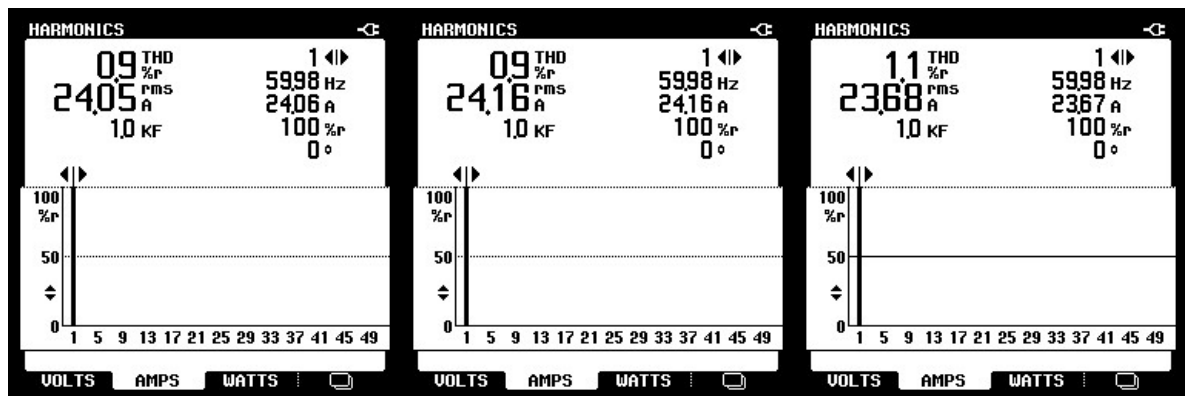
Figura 93 – Corrente no primário em delta com carga nominal



Fonte: O autor (2016).

Como pode ser visualizada, a distorção harmônica de corrente no primário é mínima. A Fig. 94 mostra o valor de corrente na frequência fundamental e a total (RMS), o percentual da distorção harmônica de corrente, assim como as frequências presentes no espectro das harmônicas para as 3 fases (A, B e C), respectivamente, com o primário do transformador em delta e com carga nominal.

Figura 94 – Harmônicas no primário nas fases A, B e C com primário em delta e com carga nominal



Fonte: O autor (2016).

Com a carga nominal no transformador, os níveis de harmônicas na corrente são inferiores aos ensaios anteriores com menor carga. Ao avaliar o espectro harmônico das correntes nas 3 fases, todas as correntes múltiplas da frequência fundamental são praticamente nulas. A Tabela 42 apresenta os valores das correntes no primário na frequência fundamental, assim como das múltiplas frequências.

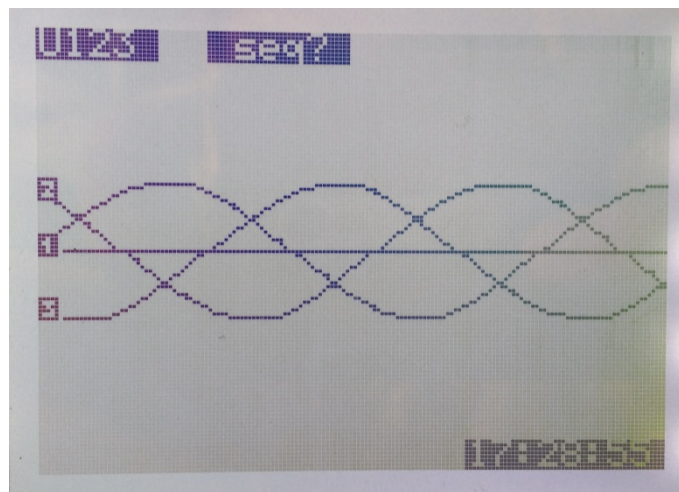
**Tabela 42 – Corrente dos primários na frequência fundamental e múltiplas**

Fases	Corrente nos primários			
	Fundamental	3ª ordem	5ª ordem	7ª ordem
A	24,06 A	0,02 A	0,19 A	0,02 A
B	24,16 A	0,05 A	0,17 A	0,02 A
C	23,67 A	0,02 A	0,21 A	0,02 A

Fonte: O autor (2016).

A Fig. 95 mostra a forma de onda no tempo da tensão nas linhas de alimentação do primário do transformador com a ligação delta e com carga nominal.

Figura 95 – Tensão no primário em delta com carga nominal



Fonte: O autor (2016).

Conforme visualizado nas formas de onda da tensão, o comportamento da tensão das linhas de alimentação do primário do conversor não apresenta grandes distorções, mesmo com carga nominal. A Tabela 43 mostra as distorções harmônicas de tensão medidas nas linhas de alimentação do primário do transformador em delta e com carga nominal. Também apresenta as distorções harmônicas de tensão entre cada fase.

**Tabela 43 – Distorção harmônica de tensão do primário nos ensaios com carga nominal**

Fase	Dist. harm. de tensão	Fase-Fase	Dist. harm. de tensão
A	1,4 %	A-B	0,8 %
B	1,7 %	B-C	0,8 %
C	1,8 %	C-A	0,7 %

Fonte: O autor (2016).

Ao avaliarmos as distorções harmônicas de tensão no primário do conversor, os valores encontrados são baixos, independente do tipo de carga conectada e do valor da potência drenada.

Durante os testes com carga nominal foram medidas as tensões nas 10 espiras externas do conversor. Utilizando a Equação 44 foram calculados os valores de indução máxima em cada uma das 3 colunas. A Tabela 44 mostra os valores máximos de indução magnética presentes em cada coluna do transformador durante a realização dos ensaios com carga nominal.

**Tabela 44 – Valores máximos de indução magnética nas 3 colunas nos ensaios com carga nominal**

<b>Conexão Primária</b>	<b>Coluna B (T)</b>	<b>Coluna A (T)</b>	<b>Coluna C (T)</b>
Delta	1,049	1,052	1,054

Fonte: O autor (2016).

Novamente os valores máximos da indução magnética nas 3 colunas do transformador foram similares ao valor calculado para o projeto, não prejudicando o funcionamento do transformador e garantindo a não elevação das perdas no ferro.

## 5 CONCLUSÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um conversor eletromagnético de 3 para 5 fases, capaz de oferecer equilíbrio de tensão e corrente para qualquer carga conectada aos seus terminais secundários. Além disso, avaliou o mesmo equilíbrio de tensão diante de aberturas (falhas) em uma das fases da carga, tornando apto o conversor a alimentar cargas que exigem alta confiabilidade.

Para isso foi projetado um protótipo, que depois de construído foi submetido à ensaios com cargas resistivas e com um motor de indução pentafásico, sendo avaliado o equilíbrio nas tensões de saída do conversor. Com as informações do projeto (espiras, seção magnética, seção dos fios) foi desenvolvido um modelo, implementado no software Micro-Cap, capaz de reproduzir o comportamento do projeto nas simulações. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os resultados experimentais, sendo observada grande proximidade.

Quanto às tensões e correntes nos 5 secundários, os testes mostraram que além do equilíbrio de tensão e corrente já confirmados para os grupos de ligação L-Dz5c e L-Yz5c, conforme em (EL-KAHEL et al., 1995), também ocorre o equilíbrio de tensão e corrente quando o primário está conectado em zig-zag, seja a carga alimentada pelo conversor resistiva, indutiva ou mista (indutiva mais resistiva).

A mesma avaliação de equilíbrio foi realizada quando ocorre a abertura (falha) em uma das fases da carga. Mesmo com apenas 4 fases do transformador alimentando cargas indutivas (motor a vazio) e mistas (motor sob carga), as tensões entregues aos terminais da carga permanecem equilibradas, conforme a norma (NEMA MG-1, 2014), independente da ligação dos enrolamentos primários (delta, estrela e zig-zag).

Já com a falha e alimentando cargas resistivas (sem conexão entre o neutro do conversor e o neutro da carga), o valor do fator de desequilíbrio de tensão ultrapassa o limite estabelecido pela norma quando o primário está conectado em delta ou estrela, chegando a valores máximos do fator de desequilíbrio de tensão de 3,84 % e 5,24 %, respectivamente. Apenas com a ligação zig-zag no primário, o fator de desequilíbrio de tensão apresenta níveis aceitáveis em 2/5 das falhas e, portanto, apenas nessas condições pode-se considerar equilibrado, conforme a norma (NEMA MG-1, 2014).

O conversor com primário em zig-zag e neutro conectado à rede, apresentou correntes com alto índice de distorção harmônica, com evidência para a 3ª harmônica (180 Hz) que circula pelo neutro, independente da carga alimentada pelo conversor. Contudo, a identificação exata da origem dessa componente não foi ainda avaliada, sendo esta uma proposta de desenvolvimento futuro, que está além do escopo desta dissertação.

Em todos os ensaios foi possível constatar que, mesmo diante das inerentes falhas nas fases da carga, o conversor mantém sua indução magnética dentro dos valores nominais. Não ocorre a saturação do núcleo e automaticamente mantém os níveis de perdas no ferro, seja o mesmo conectado no primário em delta, estrela ou zig-zag, e independente da carga que esteja alimentando.

Após a realização dos ensaios com o protótipo do conversor alimentando cargas distintas e comparando os dados coletados com as simulações computacionais do modelo, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido representa satisfatoriamente o comportamento do protótipo construído e ensaiado. O mesmo apresenta pequenos desvios ocasionados pelas aproximações do próprio modelo, dos valores calculados das indutâncias próprias, mútuas e de dispersão, assim como das resistências dos enrolamentos. Também ocorre a influência no valor das resistências, provocadas pela mudança da temperatura no decorrer dos ensaios, e até mesmo pela oscilação e desequilíbrio da tensão na alimentação do primário do transformador, que utiliza a rede da concessionária ao invés de um gerador dedicado.

De maneira geral, o comportamento do conversor foi satisfatório ao disponibilizar tensões equilibradas em seus secundários, sobretudo quando submetido a uma carga que sofre uma falha em uma de suas fases. De forma similar, o modelo desenvolvido apresentou boa conformidade com os resultados dos ensaios.

## **5.1 TRABALHOS FUTUROS**

Os principais trabalhos futuros que contribuirão com a complementação do assunto abordado nesta dissertação são:

- desenvolver um circuito equivalente, similar ao já existente para transformadores trifásicos e monofásicos;

- investigar e tentar minimizar a distorção harmônica de corrente existente nas linhas que alimentam o primário do conversor, quando este está conectado em zig-zag e ligado ao neutro da rede;
- analisar o rendimento do conversor;
- analisar a capacidade de sobrecarga do conversor, desenvolvendo um modelo térmico;
- analisar o comportamento do conversor alterando a conexão dos secundários de zig-zag para delta (polígono), comparando-o com os ensaios já realizados;
- analisar o equilíbrio das tensões das fases do secundário do conversor quando provocada a abertura de 2 fases da carga;
- analisar o comportamento do conversor diante de cargas não lineares (retificadores).

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-KHALIK, A. S. et al. A Scott connection-based three-phase to five-phase power transformer. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 39., 2013, Vienna. Piscataway: IEEE, 2013. p. 2559-2564.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-11: transformadores de potência Parte 11: transformadores do tipo seco - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.
- BARNES, H. C.; BARTHOLD, L. O. High phase order power transmission. *Electra*, [S.l.], v. 24, p. 139-153, 1973.
- EL-KAHEL, M. et al. Five-and seven-phase conversion transformers. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1995, Montreal. Piscataway, IEEE, 1995. p. 708-711.
- EL-KAHEL, M. E.; OLIVIER, G.; OURY, A. Five and seven phase current convertors: a feasibility study. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1996, Calgary. Piscataway: IEEE, 1996. p. 1000-1003.
- HAYES, John G.; O'DONOVAN, Neil; EGAN, Michael G. The extended T model of the multiwinding transformer. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 35., 2004, Aachen. Piscataway: IEEE, 2004. p. 1812-1817.
- HAYES, John G. et al. Inductance characterization of high-leakage transformers. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 18., 2003, Miami Beach. Piscataway: IEEE, 2003. p. 1150-1156.
- IQBAL, Atif et al. A novel three-phase to five-phase transformation using a special transformer connection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, [S.l.], v. 25, n. 3, p. 1637-1644, 2010.
- KERADEC, J. P. et al. Des schémas équivalents pour les circuits couplés multi-enroulements. *Journal de Physique III*, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 751-773, 1994.
- KRAUSE, Paul C. *Analysis of Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 1986.
- LANGSDORF, Alexander S. *Theory of alternating current machinery*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2001.
- LEVI, Emil. Multiphase electric machines for variable-speed applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, [S.l.], v. 55, n. 5, p. 1893-1909, 2008.

MARTIGNONI, A. Transformadores. 8. ed. Porto Alegre: Globo, 1991.

MICRO-CAP: Spectrum Software. Disponível em <<http://www.spectrum-soft.com/demoform.shtm>> Acesso em: 25 maio 2016.

MOHAMMAD, M. T.; FLETCHER, J. E. Five-phase permanent magnet machines, advantages and applications. In: 5TH IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, MACHINES AND DRIVES, 5., 2010, Brighton. Stevenage: IET, 2010. p. 1-5.

MOHSENI, HOSSEIN. Multi-winding multi-phase transformer model with saturable core. IEEE Transactions on Power Delivery, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 166-173, 1991.

MOINODDIN, Shaikh et al. Three-phase to seven-phase power converting transformer. IEEE Transactions on Energy Conversion, [S.l.], v. 27, n. 3, p. 757-766, 2012.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. NEMA MG 1-2014: Motors and Generators, Section II, Part 14-36, Arlington, 2014.

PARSA, Leila. On advantages of multi-phase machines. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 31., 2005, Raleigh. Piscataway: IEEE, 2005. p. 6 p.

PARTON, J.; CHANT, Y. The three-limbed phase transformer with controlled zero sequence effect. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. 5, n. PAS-90, p. 2019-2029, 1971.

PARTON, John E. A general theory of phase transformation. Proceedings of the IEE-Part IV: Institution Monographs, [S.l.], v. 99, n. 2, p. 12-23, 1952.

PEREIRA, Luís A. et al. Influence of saturation on the airgap induction waveform of five-phase induction machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, [S.l.], v. 27, n. 1, p. 29-41, 2012.

PEREIRA, Luís A. et al. Unbalanced operation of five-phase induction machines using steady state symmetrical components—Part II: Study of typical cases. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 41., 2015, Yokohama. Piscataway: IEEE, 2015. p. 001813-001818.

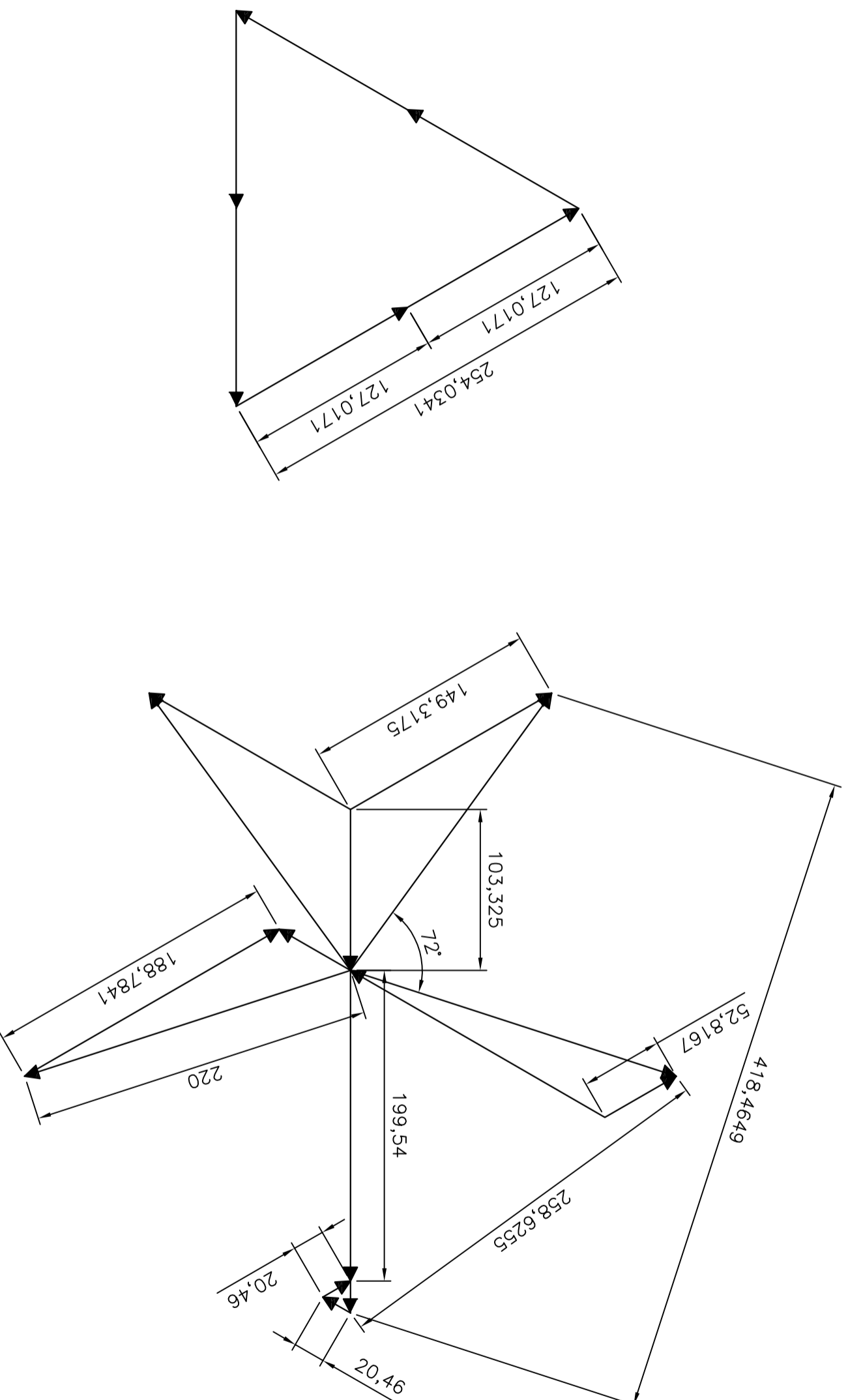
RIES, W. Transformadores: fundamentos para o projeto e cálculo. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

TIWARI, S. N.; SINGH, G. K.; SAROOR, AS Bin. Multiphase power transmission research: a survey. Electric power systems research, [S.l.], v. 24, n. 3, p. 207-215, 1992.

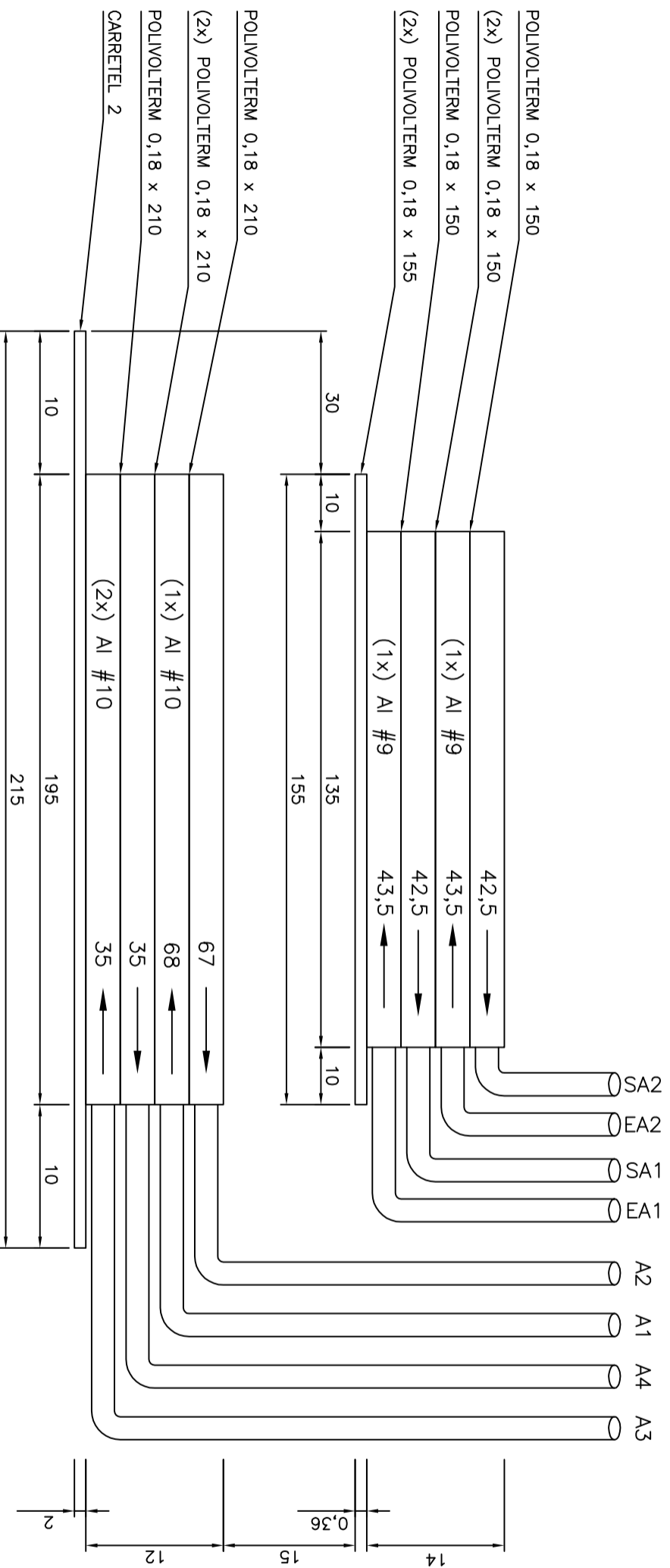
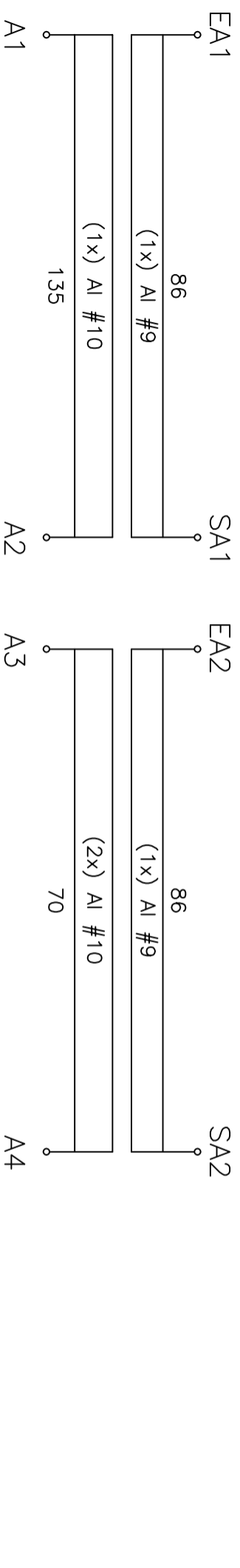


## APÉNDICE

# CONVERSOR ELETROMAGNÉTICO DE TRÊS PARA CINCO FASES POTÊNCIA DE 10KVA



ENROLAMENTOS DA BOBINA TIPO A



TALA 15 x 155mm  
16 PEÇAS

BOBINA CENTRAL TIPO A (1 UNIDADE)

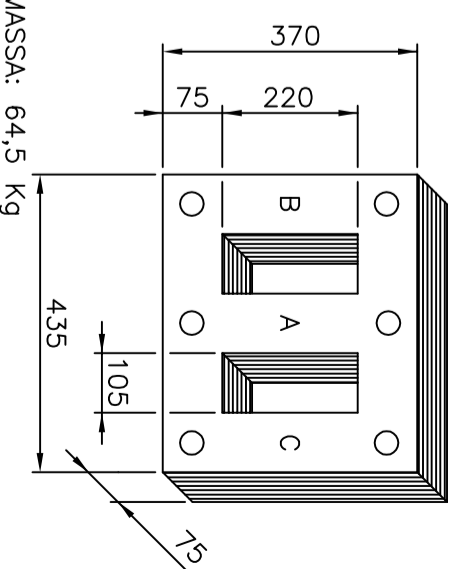
OBSERVAÇÕES:

MEDIDAS EM MILÍMETROS  
ACABAMENTO DE CADAÇO DE VIDRO HÍBRIDO SOMENTE NAS CABECEIRAS  
PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO EM LADOS OPOSTOS → ATENÇÃO  
SENTIDO DAS BOBINAS IDÊNTICAS  
INFORMAR O COMPRIMENTO DOS FIOS PARA LEVAR AOS BORNES

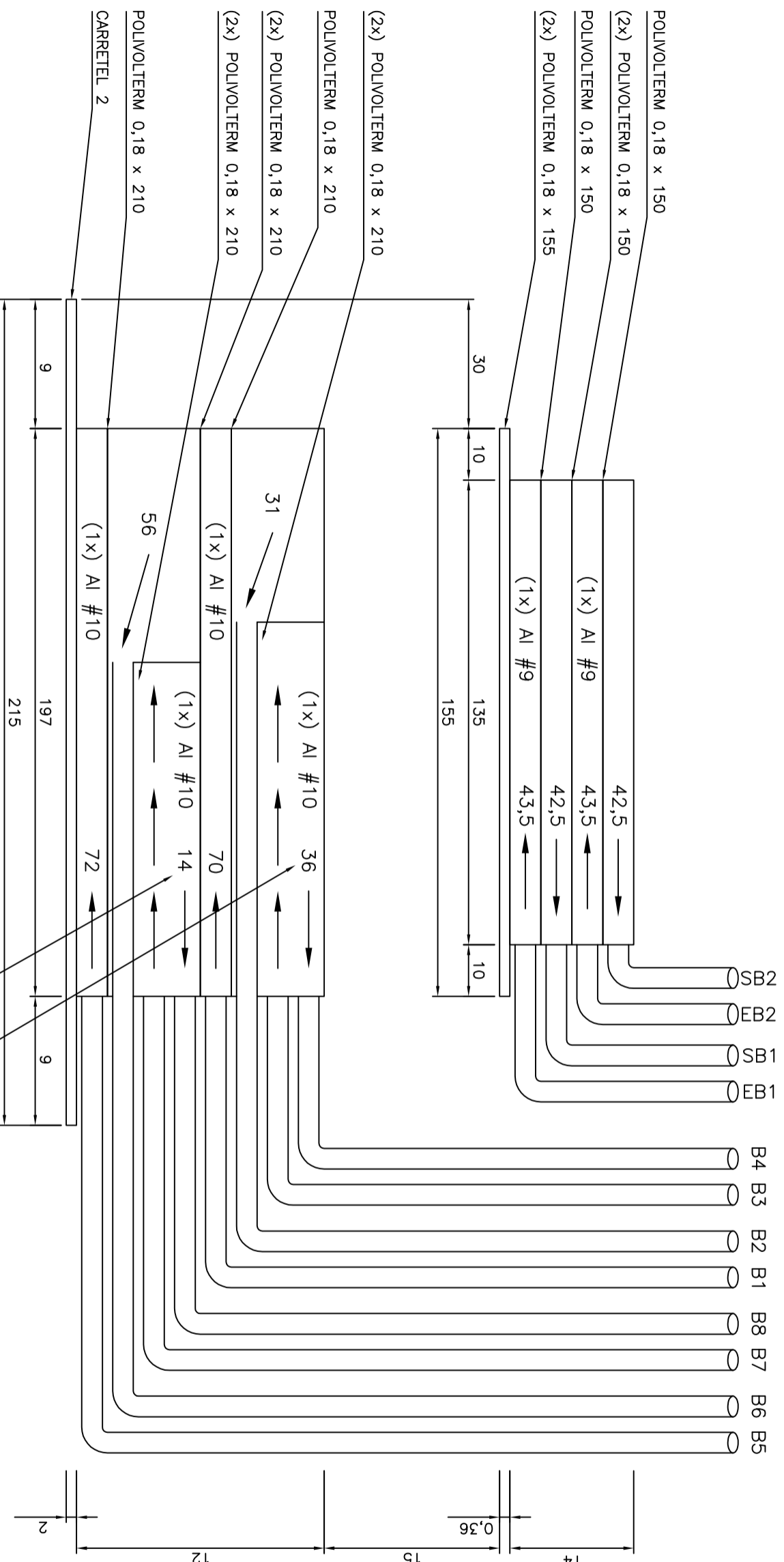
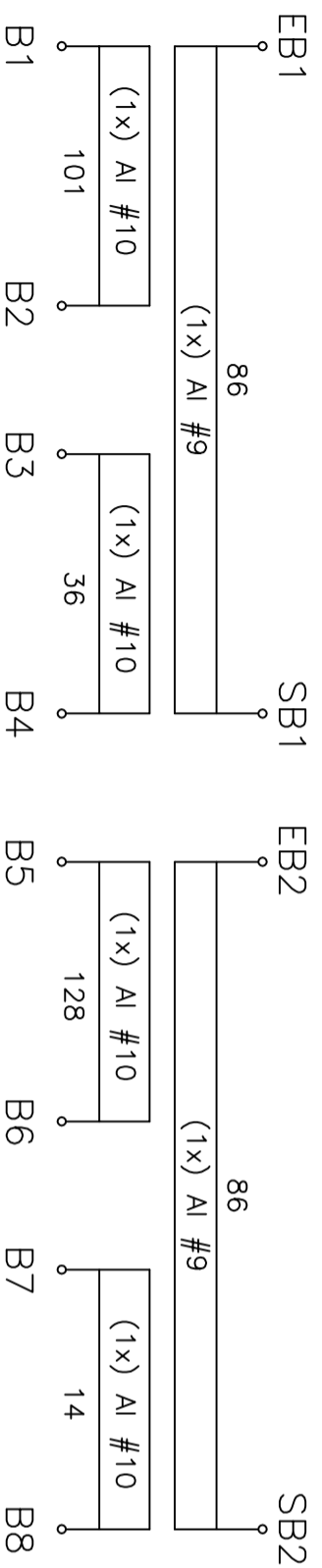
MASSA DOS ENROLAMENTOS

BOBINA A	FIO AL 9AWG (1,74 Kg) + FIO AL 10AWG (1,5 Kg)
BOBINA B	FIO AL 9AWG (1,74 Kg) + FIO AL 10AWG (1,52 Kg)
BOBINA C	FIO AL 9AWG (1,74 Kg) + FIO AL 10AWG (1,52 Kg)

CONSTRUÇÃO DO NÚCLEO GNO



ENROLAMENTOS DA BOBINA TIPO B



TALA 15 x 155mm  
16 PEGAS

BOBINA ESQUERDA TIPO B (1 UNIDADE)

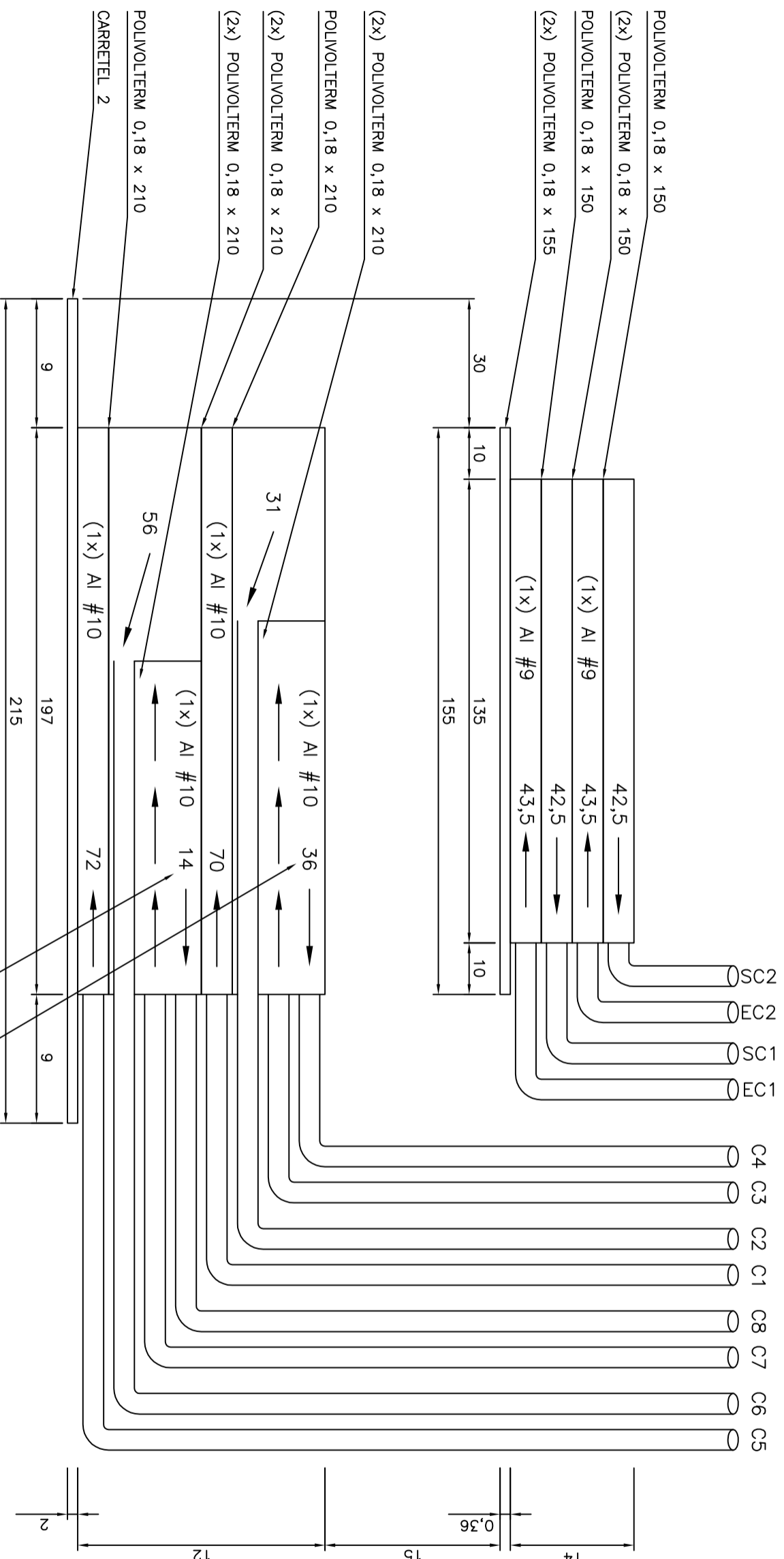
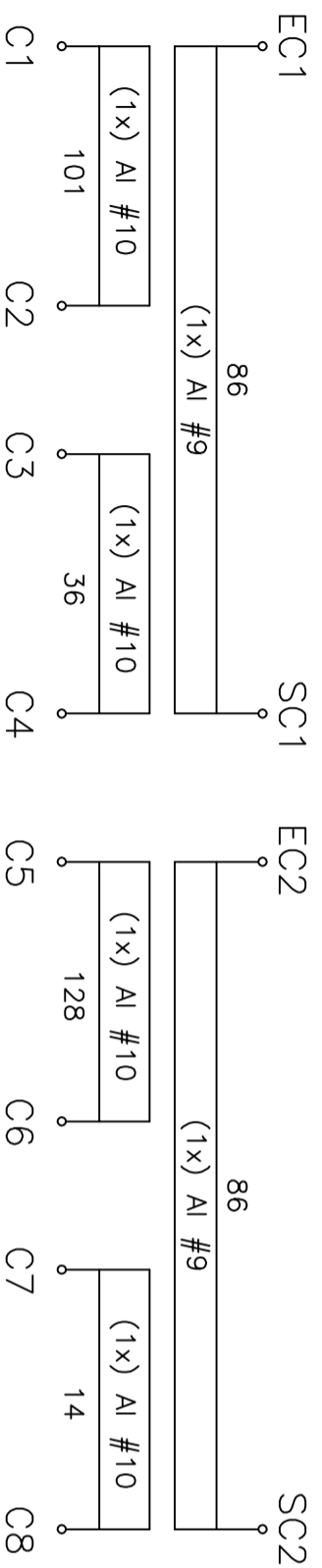
OBSERVAÇÕES:

- \_\_\_\_\_ MEDIDAS EM MILÍMETROS
- \_\_\_\_\_ ACABAMENTO DE CADAÇO DE VIDRO HÍBRIDO SOMENTE NAS CABECEIRAS
- \_\_\_\_\_ PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO EM LADOS OPOSTOS → ATENÇÃO
- \_\_\_\_\_ SENTIDO DAS BOBINAS IDÊNTICAS
- \_\_\_\_\_ INFORMAR O COMPRIMENTO DOS FIOS PARA LEVAR AOS BORNES

ENROLAMENTO B3-B4 BOBINADO  
NA QUARTA CAMADA

ENROLAMENTO B7-B8 BOBINADO  
NA SEGUNDA CAMADA

ENROLAMENTOS DA BOBINA TIPO C



TALA 15 x 155mm  
16 PEGÇAS

BOBINA DIREITA TIPO C (1 UNIDADE)

OBSERVAÇÕES:

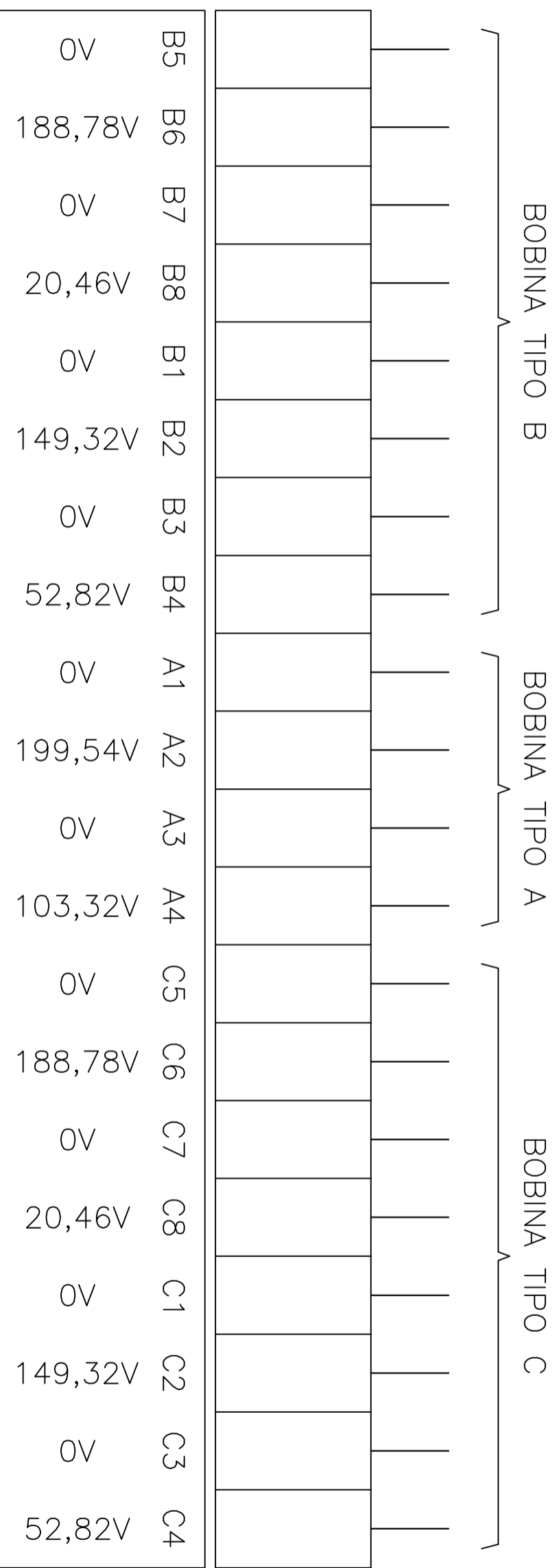
- \_\_\_\_\_ MEDIDAS EM MILÍMETROS
- \_\_\_\_\_ ACABAMENTO DE CADAÇO DE VIDRO HÍBRIDO SOMENTE NAS CABECEIRAS
- \_\_\_\_\_ PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO EM LADOS OPOSTOS → ATENÇÃO
- \_\_\_\_\_ SENTIDO DAS BOBINAS IDÊNTICAS
- \_\_\_\_\_ INFORMAR O COMPRIMENTO DOS FIOS PARA LEVAR AOS BORNES

ENROLAMENTO C3-C4 BOBINADO  
NA QUARTA CAMADA

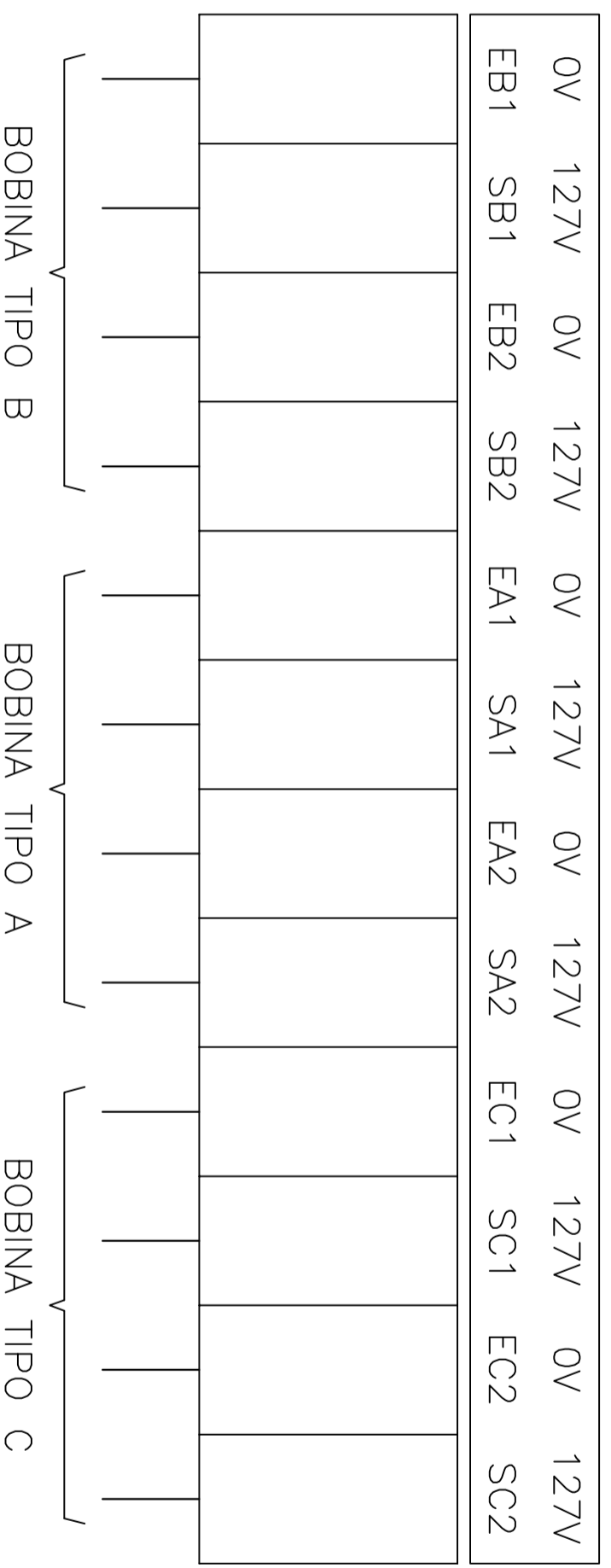
ENROLAMENTO C7-C8 BOBINADO  
NA SEGUNDA CAMADA

# TERMINAIS DO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO (VISTA SUPERIOR)

20 BORNES DO SECUNDÁRIO TIPO SINDAL 712 OU SIMILAR PARA CORRENTE DE 60A (CABO ATÉ 16mm<sup>2</sup> E DIÂMETRO DE  $\phi$ 5mm)

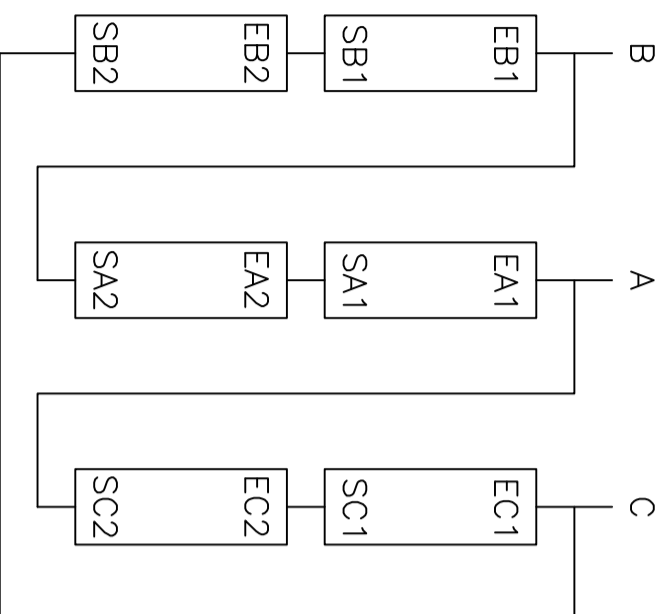


12 BORNES DO PRIMÁRIO TIPO SINDAL 712 OU SIMILAR PARA CORRENTE DE 60A (CABO ATÉ 16mm<sup>2</sup> E DIÂMETRO DE  $\phi$ 5mm)



# PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS NO TRANSFORMADOR

## LIGAÇÃO DO PRIMÁRIO



APLICAR ENTRE FASES

254,0341 V E MEDIR AS TENSÕES  
DAS BOBINAS SECUNDÁRIAS

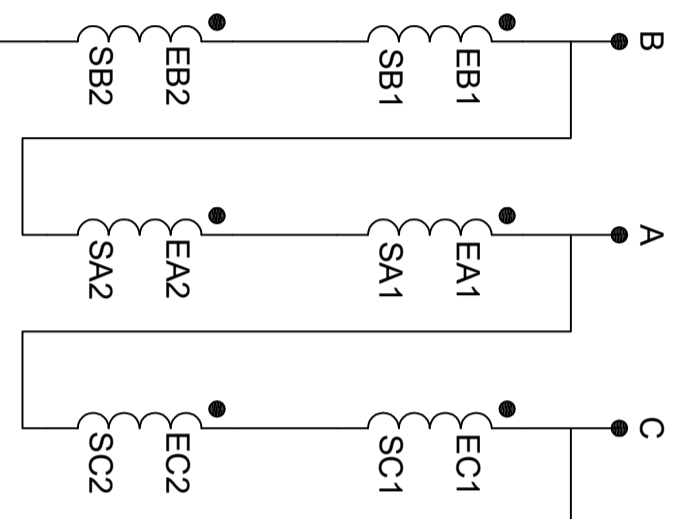
## SECUNDÁRIOS

TERMINAIS	SECUNDÁRIOS	TENSÃO NOMINAL	ENSAIO 1	ENSAIO 2	RESISTÊNCIA CORRENTE APLICADA 3A TEMPERATURA AMB.: 18,4°C
			TENSÃO MEDIDA	TENSÃO MEDIDA	
A1 – A2	A3	199,54 V	199,2 V	198,8 V	276,840 mΩ
A3 – A4	A2	103,32 V	103,6 V	103,2 V	66,821 mΩ
B1 – B2	B4	149,32 V	150,2 V	149,4 V	207,840 mΩ
B3 – B4	B5	52,82 V	53,8 V	53,4 V	80,301 mΩ
B5 – B6	B2	188,78 V	190,5 V	189,0 V	237,490 mΩ
B7 – B8	B3	20,46 V	20,8 V	20,6 V	30,290 mΩ
C1 – C2	C4	149,32 V	148,5 V	150,3 V	208,500 mΩ
C3 – C4	C5	52,82 V	53,0 V	53,7 V	80,822 mΩ
C5 – C6	C2	188,78 V	187,8 V	190,4 V	238,730 mΩ
C7 – C8	C3	20,46 V	20,5 V	20,8 V	30,771 mΩ
TERMINAIS	PRIMÁRIOS	TENSÃO NOMINAL	TENSÃO APLICADA	TENSÃO APLICADA	CORRENTE APLICADA 2A TEMPERATURA AMB.: 18,4°C
EB1 – EA1	A1	254,03 V	253,6 V	253,5 V	262,500 mΩ
EB1 – EC1	B1	254,03 V	255,5 V	254,0 V	264,740 mΩ
EA1 – EC1	C1	254,03 V	251,0 V	256,0 V	265,850 mΩ

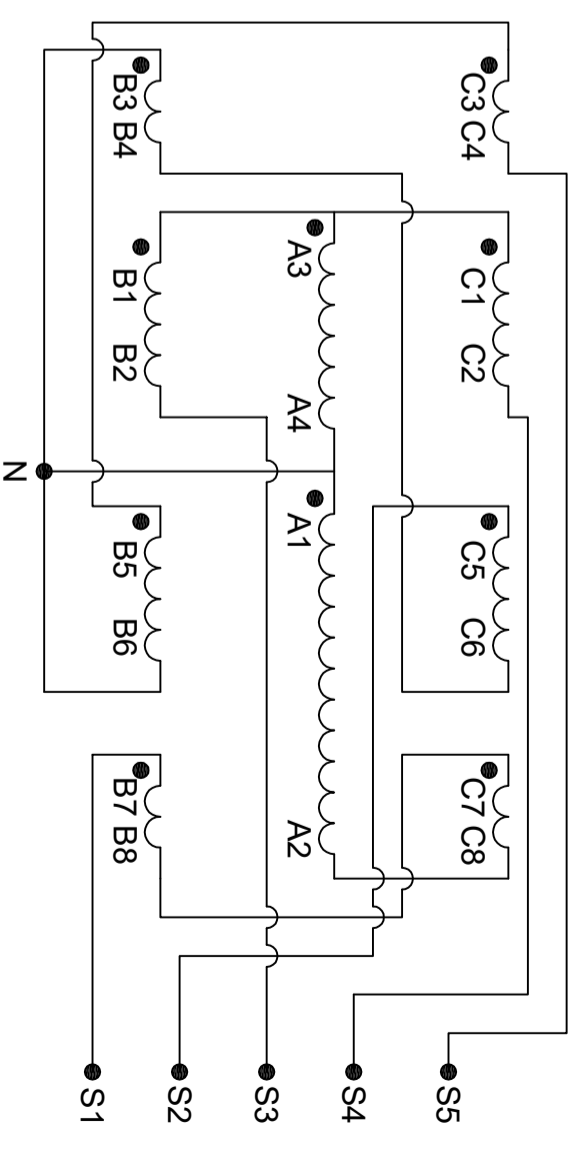
PERDAS A VAZIO	CORRENTE	PERDAS	TENSÃO
	0,524 A	122 W	254 V
PERDAS EM CARGA	CORRENTE	PERDAS	TENSÃO
	22,73 A	330 W	15,4 V

# CONEXÕES DO PRIMÁRIO (3 OPÇÕES) E SECUNDÁRIO

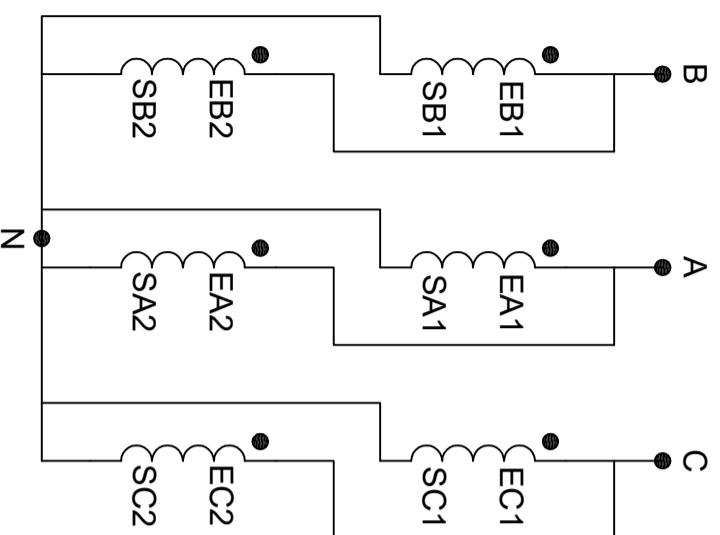
PRIMÁRIOS EM DELTA



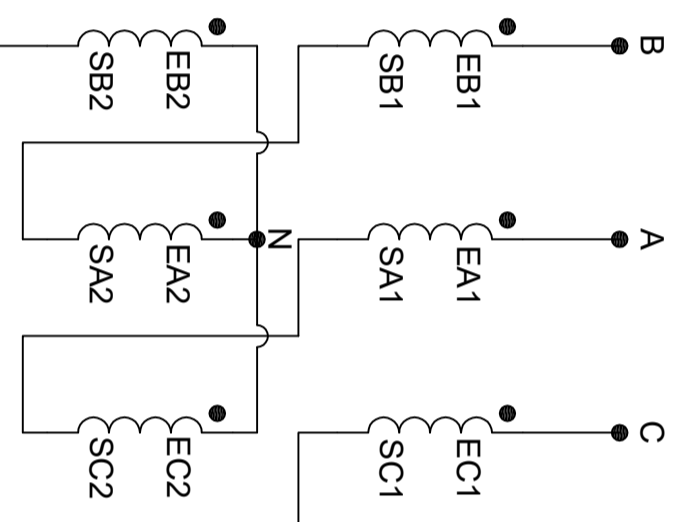
SECUNDÁRIOS EM ZIG-ZAG



PRIMÁRIOS EM ESTRELA



PRIMÁRIOS EM ZIG-ZAG



PRIMÁRIO	TENSÃO LINHA	SECUNDÁRIO	TENSÃO FASE
DELTA	254 V	ZIG-ZAG	220 V
ESTRELA	220 V		
ZIG-ZAG	380 V		



## ANEXO

O Anexo 1 e 2 apresentam os valores garantidos e típicos, respectivamente, das perdas magnéticas da chapa de aço silício de grão não-orientado, referência E230, encontrado no catálogo de aços elétricos da empresa Aperam. Disponível em <<http://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/08/A%C3%A7os-El%C3%A9tricos-GO-e-GNO-2.pdf>> Acesso em: 25 maio 2016.

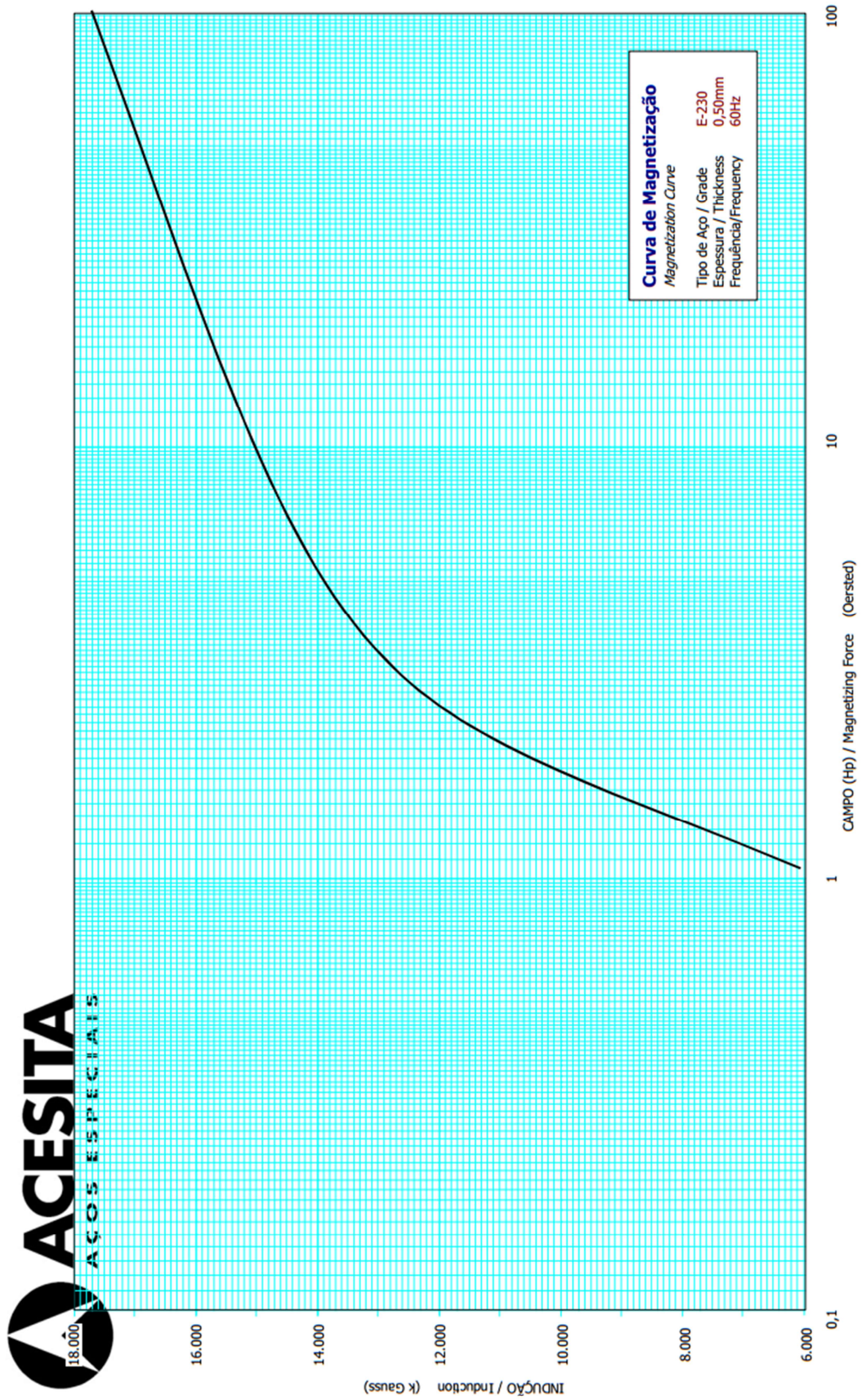
### Anexo 1 – Perdas magnéticas garantidas para a chapa de aço silício E230

Características Garantidas												
Produto		Espessura (mm)	Perda Magnética Máxima a (W/kg)				Indução Magnética Mínima a (T)			Densidade Assumida (g/cm <sup>3</sup> )	Fator de Empilhamento Mínimo (%)	Índice de Dobramento Mínimo
Referência	Aperam		1,0 T		1,5 T		2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m			
			50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz						
P800-100A(1)	E233	1.00	3.60	4.55	8.00	10.00	1.64	1.73	1.84	7.75	98.0	5
P450-65A(1)	E233	0.65	1.95	2.35	4.25	5.40	1.60	1.70	1.80	7.75	97.0	10
M600-65A	E230		2.60	3.25	6.00	7.70						
M470-65A	E185		2.00	2.50	4.70	6.00						
M450-65A	E170		1.95	2.35	4.25	5.40						
M400-65A	E157		1.70	2.15	3.95	5.00						
M530-54A	E230	0.54	2.30	2.91	5.30	6.66	1.59	1.69	1.79	7.75	97.0	10
P400-50A(1)	E233	0.50	1.70	2.15	3.68	4.66	1.58	1.67	1.78	7.65	97.0	3
M530-50A	E230		2.30	2.91	5.30	6.66						
M470-50A	E185		1.85	2.34	4.10	5.19						
M400-50A	E170		1.70	2.15	3.68	4.66						
M370-50A	E157		1.57	2.00	3.42	4.33						
M350-50A	E145		1.45	1.84	3.33	4.22						
M330-50A	E137		1.37	1.74	3.14	3.98						
M310-50A	E125		1.25	1.58	3.05	3.85						
M290-50A	E115		1.15	1.45	2.90	3.65						
M270-50A	E110		1.10	1.40	2.70	3.45						
M250-50A	E105		1.05	1.35	2.50	3.20						
M230-50A	E100	1.00	1.30	2.30	2.95							

**Anexo 2 – Perdas magnéticas típicas para a chapa de aço silício E230**

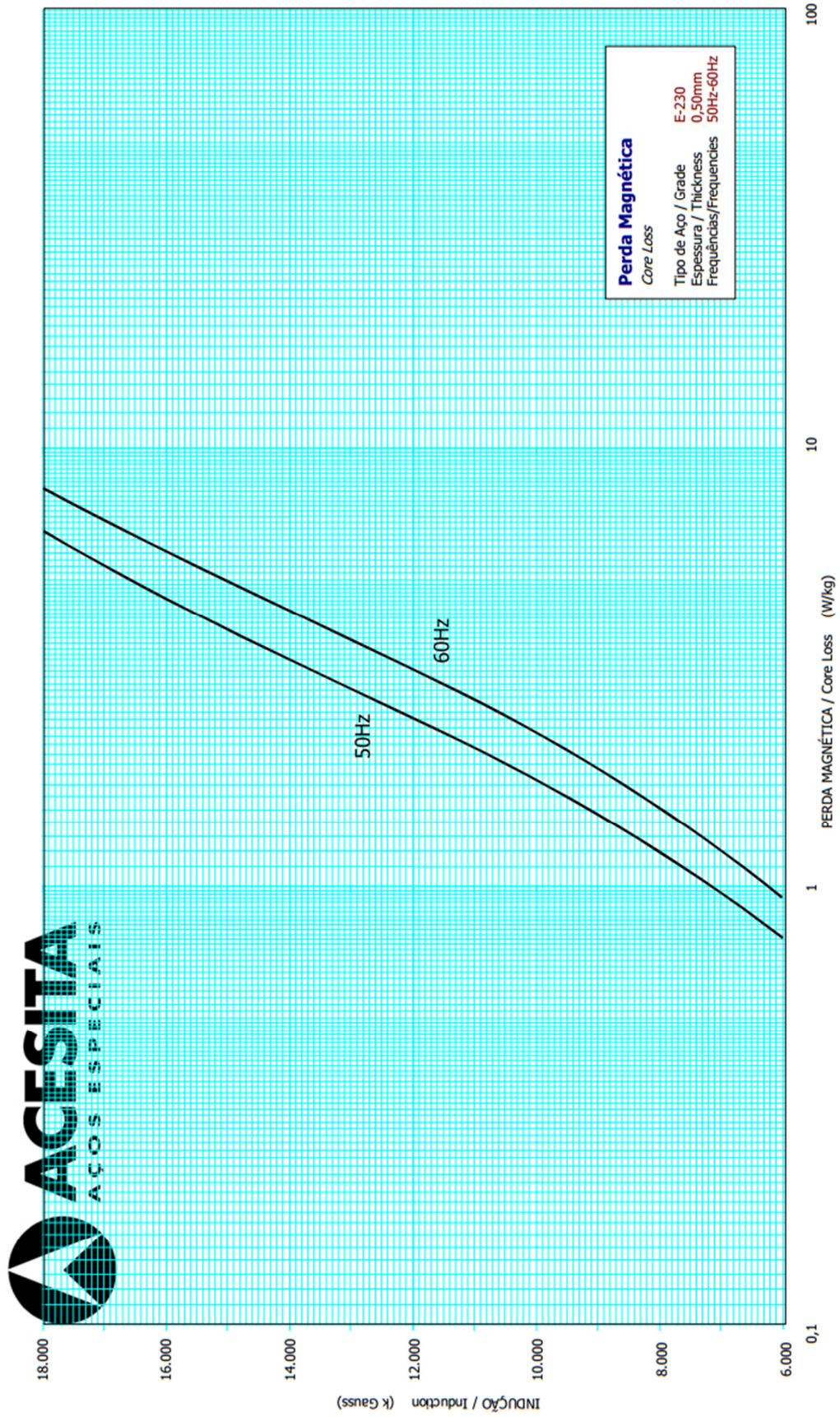
Características Típicas												
Produto		Espessura (mm)	Perda Magnética a (W/kg)				Indução Magnética a (T)					
Referência	Aperam		1,0 T		1,5 T		2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m			
			50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz						
P800-100A(1)	E233	1.00	2.90	3.90	6.25	8.45	1.67	1.75	1.86			
P450-65A(1)	E233	0.65	1.73	2.26	3.74	4.92	1.62	1.74	1.82			
M600-65A	E230		1.83	2.35	3.97	5.16						
M470-65A	E185		1.76	2.27	3.84	5.01						
M450-65A	E170		1.69	2.20	3.70	4.85						
M400-65A	E157		1.61	2.09	3.57	4.70						
M530-54A	E230		0.54	1.53	1.95	3.31				4.27	1.62	1.72
P400-50A(1)	E233	0.50	1.41	1.81	3.08	3.97	1.62	1.72	1.82			
M530-50A	E230		1.53	1.95	3.31	4.27						
M470-50A	E185		1.46	1.88	3.19	4.10						
M400-50A	E170		1.42	1.83	3.10	4.00						
M370-50A	E157		1.38	1.77	3.02	3.90						
M350-50A	E145		1.33	1.72	2.94	3.82						
M330-50A	E137		1.24	1.60	2.77	3.58						
M310-50A	E125		1.11	1.42	2.54	3.28						
M290-50A	E115		1.08	1.38	2.48	3.21				1.60	1.70	1.82
M270-50A	E110		1.04	1.34	2.42	3.13						
M250-50A	E105		1.00	1.28	2.35	3.05						
M230-50A	E100		0.93	1.20	2.25	2.91				1.59	1.69	1.81

Anexo 3 – Curva de magnetização para a chapa de aço silício E230



Fonte: Acesita (2005).

Anexo 4 – Curva de perda magnética para a chapa de aço silício E230



Fonte: Acesita (2005).