



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de conclusão de curso

Comportamento de transformadores trifásicos em ambientes distorcidos

Matheus Henrique Martins da Silva

João Monlevade, MG
2021

Matheus Henrique Martins da Silva

Comportamento de transformadores trifásicos em ambientes distorcidos

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586c Silva, Matheus Henrique Martins da .
Comportamento de transformadores trifásicos em ambientes
distorcidos. [manuscrito] / Matheus Henrique Martins da Silva. - 2021.
133 f.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia
Elétrica .

1. Fator de potência . 2. Harmônicos (Ondas elétricas) . 3. Máquinas
elétricas. 4. Transformadores elétricos. I. Silva, Carlos Henrique da. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.314

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Henrique Martins da Silva

Comportamento de transformadores trifásicos em ambientes distorcidos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 13 de Julho de 2021

Membros da banca

Dr - Carlos Henrique da Silva - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Juan Carlos Galvis Manso - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Fernando Bento Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Carlos Henrique da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/07/2021



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Henrique da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2021, às 14:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0194826** e o código CRC **55A7413B**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.006732/2021-33

SEI nº 0194826

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Comportamento de transformadores trifásicos em ambientes distorcidos” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 16 de Julho de 2021 .

Matheus Henrique Martins da Silva

Nome completo do(a) aluno(a)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de transformadores trifásicos em ambientes que contenham distorções harmônicas. Para isso, foram realizadas simulações, através do Simulink, analisando a influência que algumas modificações realizadas nos transformadores exercem nos sistemas com distorções, sendo elas: modificação das ligações dos transformadores, onde comparou-se as simulações de bancos de transformadores conectados em Δ - Δ , Δ -Y, Y- Δ e Y-Y alimentando cargas não lineares do tipo CSI e VSI, mudança do tipo de núcleo, onde foram analisados sistemas contendo bancos de transformadores, transformadores trifásicos com núcleo tipo Core e tipo Shell que também alimentam cargas do tipo CSI e VSI e, por fim, a variação da impedância de curto-circuito dos transformadores e a influência da mesma nos sistemas com distorções harmônicas. Ao final, observou-se que a impedância de curto-circuito dos transformadores impacta os níveis de distorção harmônica dos sistemas, reduzindo valores de THD_i , Fator-K, potência aparente e porcentagem de ocupação dos transformadores, porém, aumenta os valores de THD_v dos sistemas. Notou-se também que os fechamentos dos transformadores impactam nos índices de distorção dos sistemas (THD_i e THD_v), onde a ligação Δ - Δ apresentou valores mais elevados de THD_i e a ligação Y-Y valores mais baixos desse mesmo indicador, além disso houve variação nos valores de potência aparente, Fator-K, fator de potência dentre outros. As simulações comparando os tipos de núcleo mostraram que, modificar o tipo de núcleo, mantendo-se as mesmas características magnéticas, não exerce impactos significativos nos sistemas.

Palavras-chave: Transformadores trifásicos; Harmônicos; Fator-K.

Abstract

This work aims to analyze the behavior of three-phase transformers in environments that contain harmonic distortions. For this, simulations were carried out through Simulink, analyzing the influence that some changes made in transformers exert on systems with distortions, namely: modification of transformer connections, where the simulations of transformer banks connected in Δ - Δ , Δ -Y, Y- Δ and Y-Y were compared feeding CSI and VSI non-linear loads, change of core type, where systems containing transformer banks, three-phase transformers with Core type and Shell type core that also supply CSI and VSI type loads and, finally, the variation of the short-circuit impedance of the transformers and its influence on systems with harmonic distortions. In the end, it was observed that the short-circuit impedance of the transformers impacts the harmonic distortion levels of the systems, reducing the values of THD_i , K-Factor, apparent power and percentage of occupancy of the transformers, however, it increases the values of THD_v of the systems. It was also noted that the closures of the transformers impact the systems distortion indices (THD_i and THD_v), where the link Δ - Δ presented higher values of THD_i and the link Y-Y lower values of this same indicator, in addition there was variation in apparent power values, K-Factor, power factor, among others. The simulations comparing the types of core showed that modifying the type of core, keeping the same magnetic characteristics, does not exert significant impacts on the systems.

Keywords: Three-phase transformers; Harmonics; K-Factor.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de núcleo de transformadores	19
Figura 2 – Tipos de núcleo de transformadores trifásicos	20
Figura 3 – Transformador ideal	21
Figura 4 – Impedância conectada no circuito secundário de um transformador ideal	23
Figura 5 – Circuito equivalente básico de um transformador real	24
Figura 6 – Esquemático dos fluxos mútuo e disperso de um transformador . .	25
Figura 7 – Circuitos equivalentes	28
Figura 8 – Ligações para realização do ensaio a vazio	29
Figura 9 – Circuito equivalente com o secundário aberto	29
Figura 10 – Ligações para realização do ensaio de curto-circuito	31
Figura 11 – Circuito equivalente com o secundário curto-circuitado	31
Figura 12 – Modelos de ligações de transformadores trifásicos	36
Figura 13 – Modelo geral das cargas CSI	38
Figura 14 – Modelo geral das cargas VSI	39
Figura 15 – Diagrama representativo das perdas nos transformadores	40
Figura 16 – Representação dos sistemas simulados para análise da influência dos fechamentos dos transformadores	55
Figura 17 – Ondas das correntes de linha no secundário	57
Figura 18 – Espectro das correntes de linha no secundário	58
Figura 19 – Ondas das tensões fase/fase do secundário	59
Figura 20 – Espectro das tensões fase/fase do secundário	60
Figura 21 – Potências Instantâneas do secundário	61
Figura 22 – Potências Ativas	62
Figura 23 – Ondas das correntes de linha no secundário	64
Figura 24 – Espectro das correntes de linha no secundário	65
Figura 25 – Ondas das tensões fase/fase do secundário	66
Figura 26 – Espectro das tensões fase/fase do secundário	67
Figura 27 – Potências Instantâneas do secundário	68
Figura 28 – Potências Ativas	69
Figura 29 – Representação dos sistemas simulados para análise da influência dos núcleos dos transformadores	72
Figura 30 – Correntes de linha do secundário	73
Figura 31 – Espectro das correntes de linha do secundário	73

Figura 32 – Tensões de linha do secundário	74
Figura 33 – Espectro das tensões de linha do secundário	74
Figura 34 – Potências ativas e medições	74
Figura 35 – Correntes de linha do secundário	75
Figura 36 – Espectro das correntes de linha do secundário	75
Figura 37 – Tensões de linha do secundário	75
Figura 38 – Espectro das tensões de linha do secundário	76
Figura 39 – Potências ativas e medições	76
Figura 40 – Correntes de linha do secundário	76
Figura 41 – Espectro das correntes de linha do secundário	77
Figura 42 – Tensões de linha do secundário	77
Figura 43 – Espectro das tensões de linha do secundário	77
Figura 44 – Potências ativas e medições	78
Figura 45 – Correntes de linha do secundário	78
Figura 46 – Espectro das correntes de linha do secundário	78
Figura 47 – Tensões de linha do secundário	79
Figura 48 – Espectro das tensões de linha do secundário	79
Figura 49 – Potências ativas e medições	79
Figura 50 – Representação dos sistemas simulados para análise da influência da impedância de curto-circuito dos transformadores	80
Figura 51 – Ondas das correntes de linha	81
Figura 52 – Espectros harmônicos das correntes de linha	81
Figura 53 – Ondas das tensões de linha	82
Figura 54 – Espectros harmônicos das tensões de linha	82
Figura 55 – Potências instantâneas	83
Figura 56 – Potências ativas	83
Figura 57 – Ondas das correntes de linha	84
Figura 58 – Espectros harmônicos das correntes de linha	84
Figura 59 – Ondas das tensões de linha	85
Figura 60 – Espectros harmônicos das tensões de linha	85
Figura 61 – Potências instantâneas	86
Figura 62 – Potências ativas	86
Figura 63 – Ondas das correntes de linha	87
Figura 64 – Espectros harmônicos das correntes de linha	87
Figura 65 – Ondas das tensões de linha	88
Figura 66 – Espectros harmônicos das tensões de linha	88
Figura 67 – Potências instantâneas	89

Figura 68 – Potências ativas	89
Figura 69 – Ondas das correntes de linha	90
Figura 70 – Espectros harmônicos das correntes de linha	90
Figura 71 – Ondas das tensões de linha	91
Figura 72 – Espectros harmônicos das tensões de linha	91
Figura 73 – Potências instantâneas	92
Figura 74 – Potências ativas	92
Figura 75 – Ondas das correntes de linha	93
Figura 76 – Espectros harmônicos das correntes de linha	94
Figura 77 – Ondas das tensões de linha	94
Figura 78 – Espectros harmônicos das tensões de linha	95
Figura 79 – Potências instantâneas	95
Figura 80 – Potências ativas	96
Figura 81 – Ondas das correntes de linha	96
Figura 82 – Espectros harmônicos das correntes de linha	97
Figura 83 – Ondas das tensões de linha	97
Figura 84 – Espectros harmônicos das tensões de linha	98
Figura 85 – Potências instantâneas	98
Figura 86 – Potências ativas	99
Figura 87 – Ondas das correntes de linha	99
Figura 88 – Espectros harmônicos das correntes de linha	100
Figura 89 – Ondas das tensões de linha	100
Figura 90 – Espectros harmônicos das tensões de linha	101
Figura 91 – Potências instantâneas	101
Figura 92 – Potências ativas	102
Figura 93 – Ondas das correntes de linha	102
Figura 94 – Espectros harmônicos das correntes de linha	103
Figura 95 – Ondas das tensões de linha	103
Figura 96 – Espectros harmônicos das tensões de linha	104
Figura 97 – Potências instantâneas	104
Figura 98 – Potências ativas	105
Figura 99 – Representação do sistema simulado com carga CSI controlada . .	106
Figura 100 – Ondas das correntes de linha no secundário	107
Figura 101 – Espectro das correntes de linha no secundário	108
Figura 102 – Ondas das tensões fase/fase do secundário	109
Figura 103 – Espectro das tensões fase/fase do secundário	110
Figura 104 – Potências Instantâneas do secundário	111

Figura 105–Potências Ativas	112
Figura 106–Representação do sistema simulado com carga mista	114
Figura 107–Ondas das correntes de linha no secundário	115
Figura 108–Espectro das correntes de linha no secundário	116
Figura 109–Ondas das tensões fase/fase do secundário	117
Figura 110–Espectro das tensões fase/fase do secundário	118
Figura 111–Ondas das tensões fase/neutro do secundário	119
Figura 112–Espectro das tensões fase/neutro do secundário	120
Figura 113–Potências Instantâneas do secundário	121
Figura 114–Potências Ativas	122

Lista de tabelas

Tabela 1 – Referências Bibliográficas	16
Tabela 2 – Casos simulados	52
Tabela 3 – Medições dos sistemas com carga CSI	63
Tabela 4 – Medições dos sistemas com carga VSI	70
Tabela 5 – Comparações dos valores medidos para carga CSI	93
Tabela 6 – Comparações entre os valores medidos para carga VSI	105
Tabela 7 – Resumo dos resultados para simulações de comparação dos fechamentos dos transformadores	123
Tabela 8 – Resumo dos resultados para simulações de comparação da modificação da impedância de curto-circuito	124
Tabela 9 – Limites de distorção das tensões	131
Tabela 10 – Limites de distorção das correntes para sistemas com tensões entre 120 V e 69 kV	132
Tabela 11 – Limites de distorção das correntes para sistemas com tensões entre 69 kV e 161kV	132
Tabela 12 – Limites de distorção das correntes para sistemas com tensões \geq 161kV	132

Lista de abreviaturas e siglas

V_{1FF}	Tensão fase/fase RMS do primário
V_{1FFf_0}	Tensão fase/fase RMS da componente fundamental do primário
V_{2FF}	Tensão fase/fase RMS do secundário
V_{2FFf_0}	Tensão fase/fase RMS da componente fundamental do secundário
V_{1FN}	Tensão fase/neutro RMS do primário
V_{1FNf_0}	Tensão fase/neutro RMS da componente fundamental do primário
V_{2FN}	Tensão fase/neutro RMS do secundário
V_{2FNf_0}	Tensão fase/neutro RMS da componente fundamental do secundário
I_{1L}	Corrente de linha RMS do primário
I_{1Lf_0}	Corrente de linha RMS da componente fundamental do primário
I_{2L}	Corrente de linha RMS do secundário
I_{2Lf_0}	Corrente de linha RMS da componente fundamental do secundário
I_{1F}	Corrente de fase RMS do primário
I_{1Ff_0}	Corrente de fase RMS da componente fundamental do primário
I_{2F}	Corrente de fase RMS do secundário
I_{2Ff_0}	Corrente de fase RMS da componente fundamental do secundário
$S_{13\phi}$	Potência trifásica do primário
$S_{23\phi}$	Potência trifásica do secundário
$S_{13\phi f_0}$	Potência trifásica da componente fundamental do primário
$S_{23\phi f_0}$	Potência trifásica da componente fundamental do secundário
$P_{13\phi}$	Potência ativa trifásica do primário
$P_{23\phi}$	Potência ativa trifásica do secundário

THD_{I_L1}	Distorção harmônica total da corrente de linha do primário
THD_{I_L2}	Distorção harmônica total da corrente de linha do secundário
THD_{I_F1}	Distorção harmônica total da corrente de fase do primário
THD_{I_F2}	Distorção harmônica total da corrente de fase do secundário
$THD_{V_{FF1}}$	Distorção harmônica total da tensão fase/fase do primário
$THD_{V_{FF2}}$	Distorção harmônica total da tensão fase/fase do secundário
$THD_{V_{FN1}}$	Distorção harmônica total da tensão fase/neutro do primário
$THD_{V_{FN2}}$	Distorção harmônica total da tensão fase/neutro do secundário
PF1	Fator de potência total do primário
PF2	Fator de potência total do secundário
DPF1	Fator de potência de deslocamento do primário
DPF2	Fator de potência de deslocamento do secundário

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivos específicos	15
1.2	Referências bibliográficas	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Transformadores	18
2.1.1	Partes principais dos transformadores	18
2.1.1.1	Núcleo	18
2.1.1.2	Enrolamentos	20
2.1.2	Transformadores monofásicos	20
2.1.2.1	Princípio de funcionamento e transformador ideal	21
2.1.2.2	Transformador real	24
2.1.2.3	Reatâncias no transformador real e circuitos equivalentes	25
2.1.2.4	Ensaio a vazio	28
2.1.2.5	Ensaio de curto-circuito	30
2.1.3	Transformadores trifásicos	32
2.1.3.1	Ligação Estrela-Estrela	32
2.1.3.2	Ligação Estrela-Delta	33
2.1.3.3	Ligação Delta-Estrela	34
2.1.3.4	Ligação Delta-Delta	35
2.2	Cargas Lineares	35
2.3	Cargas não-lineares	36
2.3.1	Cargas CSI (current-source inverter) e VSI (voltage-source inverter)	37
2.4	Distorções harmônicas	39
2.5	Perdas em transformadores	40
2.6	Influência dos harmônicos nos transformadores	42
2.6.1	Efeitos da componente dc da corrente de carga	42
2.6.2	Efeito das correntes harmônicas nas perdas no núcleo	42
2.6.3	Efeito das correntes harmônicas na perda nos enrolamentos referentes à resistência equivalente dc	42
2.6.4	Efeito das correntes harmônicas nas perdas por correntes parasitas nos enrolamentos P_{EC}	43

2.6.5	Efeito das correntes harmônicas nas perdas adicionais P_{NL}	43
2.7	Métodos para quantificação e análise de harmônicos nos trans-	
	formadores	43
2.7.1	Distorção harmônica total (THD)	44
2.7.2	Distorção harmônica individual (IHD)	44
2.7.3	Potência instantânea	45
2.7.3.1	Potência instantânea ativa	45
2.7.3.2	Potência instantânea não ativa	45
2.7.3.3	Fator de potência	46
2.7.3.4	Fator de crista	47
2.7.3.5	Fator de perda harmônica	47
2.7.3.6	Fator K	48
2.7.3.7	Método de depreciação da potência nominal (<i>Derating</i>)	48
3	METODOLOGIA	51
3.1	Simulações	51
3.1.1	Comparações entre os casos simulados	53
4	SIMULAÇÕES	55
4.1	Influência dos fechamentos dos transformadores nos sistemas	
	com presença de harmônicos	55
4.1.1	Carga CSI	56
4.1.1.1	Correntes	56
4.1.1.2	Tensões	58
4.1.1.3	Potências	60
4.1.1.4	Medições	62
4.1.2	Carga VSI	63
4.1.2.1	Correntes	63
4.1.2.2	Tensões	65
4.1.2.3	Potências	67
4.1.2.4	Medições	70
4.1.3	Conclusões sobre a seção	70
4.2	Influência dos tipos de núcleo dos transformadores nos siste-	
	mas com presença de harmônicos	71
4.2.1	Carga CSI	73
4.2.1.1	Ligação Δ - Δ	73
4.2.1.2	Correntes	73
4.2.1.3	Tensões	74

4.2.1.4	Potências	74
4.2.1.5	Ligação Y- Δ	75
4.2.1.6	Correntes	75
4.2.1.7	Tensões	75
4.2.1.8	Potências	76
4.2.2	Carga VSI	76
4.2.2.1	Ligação Δ - Δ	76
4.2.2.2	Correntes	76
4.2.2.3	Tensões	77
4.2.2.4	Potências	78
4.2.2.5	Ligação Y- Δ	78
4.2.2.6	Correntes	78
4.2.2.7	Tensões	79
4.2.2.8	Potências	79
4.2.3	Conclusões sobre a seção	79
4.3	Efeito da impedância de curto-circuito dos transformadores nos sistemas com presença de harmônicos	80
4.3.1	Carga CSI	80
4.3.1.1	Ligação Δ - Δ	81
4.3.1.1.1	Correntes	81
4.3.1.1.2	Tensões	82
4.3.1.1.3	Potências	83
4.3.1.2	Ligação Δ -Y	84
4.3.1.2.1	Correntes	84
4.3.1.2.2	Tensões	85
4.3.1.2.3	Potências	86
4.3.1.3	Ligação Y- Δ	87
4.3.1.3.1	Correntes	87
4.3.1.3.2	Tensões	88
4.3.1.3.3	Potências	89
4.3.1.4	Ligação Y-Y	90
4.3.1.4.1	Correntes	90
4.3.1.4.2	Tensões	91
4.3.1.4.3	Potências	92
4.3.1.5	Comparações	93
4.3.2	Carga VSI	93
4.3.2.1	Ligação Δ - Δ	93

4.3.2.1.1	Correntes	93
4.3.2.1.2	Tensões	94
4.3.2.1.3	Potências	95
4.3.2.2	Ligação Δ -Y	96
4.3.2.2.1	Correntes	96
4.3.2.2.2	Tensões	97
4.3.2.2.3	Potências	98
4.3.2.3	Ligação Y- Δ	99
4.3.2.3.1	Correntes	99
4.3.2.3.2	Tensões	100
4.3.2.3.3	Potências	101
4.3.2.4	Ligação Y-Y	102
4.3.2.4.1	Correntes	102
4.3.2.4.2	Tensões	103
4.3.2.4.3	Potências	104
4.3.2.5	Comparações	105
4.3.3	Conclusões sobre a seção	105
4.4	Sistemas com carga CSI controlada	106
4.4.0.1	Correntes	107
4.4.0.2	Tensões	109
4.4.0.3	Potências	111
4.4.1	Conclusões sobre a seção	112
4.5	Sistema híbrido contendo uma carga CSI controlada e uma carga VSI	113
4.5.0.1	Correntes	115
4.5.0.2	Tensões	117
4.5.0.3	Potências	121
4.5.1	Conclusões sobre a seção	122
5	RESUMO DAS COMPARAÇÕES REALIZADAS NAS SIMU- LAÇÕES	123
6	CONCLUSÃO	126
	REFERÊNCIAS	129
A	IEEE-519: PRÁTICA RECOMENDADA E REQUISITOS PARA CONTROLE DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	131

1 Introdução

Nos últimos anos observou-se um grande crescimento na utilização de dispositivos constituídos por semicondutores, tais como retificadores, conversores, fontes chaveadas entre outros. Essas cargas tem um comportamento não-linear, e dessa forma, tem o potencial de gerar harmônicos no sistema (FUCHS, 2002)(SANTOS, 2012). Os transformadores estão presentes em todo sistema elétrico e estão sujeitos à diversos eventos provenientes de cargas não lineares. Esse fato requer grande atenção, pois ambientes contendo distorções harmônicas podem reduzir sua vida útil, ou até mesmo provocar danos permanentes, aumentando assim o custo de manutenção, o tempo de parada nas atividades que necessitam dos transformadores dentre outros problemas (SANTOS, 2012). Sendo assim, é preciso saber dimensionar bem os transformadores a serem utilizados nesses ambientes e entender as técnicas utilizadas para mitigar problemas relacionados à não-linearidades. Para isso, existem normas que auxiliam na análise desses eventos, como as normas UL 1561-1994 e UL 1562-1994 que definem um fator determinado Fator-K, que está diretamente relacionado à níveis harmônicos presentes no sistema em que um transformador está inserido, também existe a recomendação IEEE Std C57.110-2018, que traz diretrizes para se calcular perdas nos transformadores (IEEE-C57.110, 2018). A análise correta do sistema permite ações eficientes no controle de perdas, dimensionamento de equipamentos dentro de faixas de operação dos transformadores, escolha correta dos transformadores a serem usados em diversas aplicações, dentre outros benefícios.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar, através de simulações, como os transformadores trifásicos se comportam quando estão alimentando cargas não lineares.

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal do trabalho descrito anteriormente, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o efeito das ligações dos transformadores nos índices de distorção harmônica;

- Analisar a influência do tipo de núcleo dos transformadores nos índices de distorções harmônicas;
- Analisar a influência da impedância de curto-circuito dos transformadores nos índices de distorções harmônicas.

1.2 Referências bibliográficas

Tabela 1 – Referências Bibliográficas

Referência	Título do Trabalho
(SANTOS, 2012)	Efeito de cargas não-lineares no dimensionamento de transformadores trifásicos de distribuição
(CAMARGO, 2005)	Análises do desempenho térmico e vida útil de transformadores alimentando cargas não-lineares
(SILVA, 2015)	Contribuições para o estudo térmico em transformador a seco na presença de sub e inter-harmônicos
(TAHER; KAMEL; ALI, 2016)	K-Factor and transformer losses calculations under harmonics
(IEEE-C57.110, 2018)	IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents

Fonte: Autor

A Tabela 1 traz um resumo de trabalhos relacionados ao tema proposto neste trabalho.

O primeiro trabalho citado (SANTOS, 2012) apresenta um estudo em relação às perdas que ocorrem nos transformadores que alimentam cargas não-lineares. O trabalho em questão traz definições sobre as perdas relacionadas aos harmônicos provenientes de cargas não-lineares e apresenta experimentos em laboratório com transformadores conectados na configuração back-to-back alimentando cargas não-lineares a fim de se medir as perdas, demonstrando de forma prática, os cálculos descritos na parte teórica do trabalho.

O segundo trabalho citado na Tabela 1 (CAMARGO, 2005) traz um estudo sobre os efeitos térmicos dos harmônicos em transformadores a seco e o impacto desses harmônicos na vida útil dos mesmos. O trabalho mostra que distorções nas ondas de tensão não impactam significativamente a temperatura dos transformadores, porém, distorções nas ondas de corrente aumentam a temperatura e impactam na

vida útil dos mesmos. Além disso, este trabalho traz um dado interessante em relação à redução da vida útil dos transformadores com o aumento da temperatura, onde é definido que a vida útil dos sistemas isolantes dos transformadores é reduzido à metade a cada aumento de 10°C da temperatura de isolamento.

O terceiro trabalho (SILVA, 2015) também aborda os efeitos térmicos dos transformadores, porém, com foco nos sub e inter-harmônicos. Também foi concluído neste trabalho que quanto maior as distorções das correntes, maior será a temperatura das partes dos transformadores, principalmente os enrolamentos. Um diferencial deste trabalho foram as simulações realizadas pela autora no software COMSOL Multiphysics, que trazem um modelo 3D de um transformador sofrendo os efeitos térmicos provenientes de harmônicos, sendo possível observar os pontos de maior aquecimento.

O quarto trabalho (TAHER; KAMEL; ALI, 2016) um experimento real realizado pelos autores, onde se tem um sistema (Estação de Bombeamento de Mubarak) contendo harmônicos. Foram calculadas as perdas nos transformadores e também o Fator-K para o transformador em questão. Os autores compararam o mesmo sistema com a aplicação de filtros passivos e mostraram que a aplicação do filtro definido possibilitou a redução da composição harmônica do sistema e consequentemente reduziram as perdas nos transformadores.

A quinta referência (IEEE-C57.110, 2018) é uma recomendação desenvolvida pela IEEE que traz diretrizes para cálculo de perdas nos transformadores que alimentam cargas não-lineares. Além disso, essa recomendação apresenta métodos para quantificar a composição harmônica dos sistemas e define o Fator de Perda Harmônica (F_{HL}), fator que pode ser utilizado como um multiplicador das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos em condições lineares e de potencia nominal para determinação das perdas por correntes parasitas situações com cargas não-lineares. Ao fim, essa recomendação apresenta o Fator-K e compara o F_{HL} com outros métodos disponíveis em outras normas, inclusive com o Fator-K.

2 Referencial teórico

2.1 Transformadores

Transformadores são dispositivos eletromagnéticos estáticos que tem como finalidade transformar um sistema de corrente alternada primário em outro, secundário, mantendo a mesma frequência, porém, modificando outras características, em particular, tensões e correntes (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

2.1.1 Partes principais dos transformadores

De maneira geral, os transformadores são constituídos por um núcleo, construído em sua grande maioria por chapas de aço, dois ou mais enrolamentos condutores e isolados que são acoplados eletromagneticamente (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

2.1.1.1 Núcleo

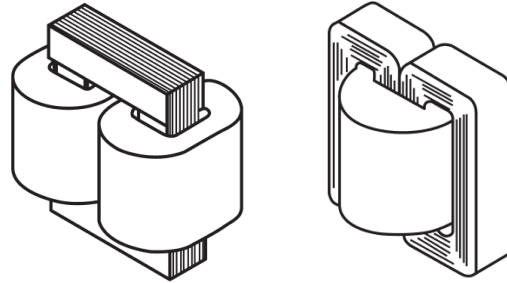
A principal função do núcleo de um transformador é intensificar o acoplamento magnético entre os enrolamentos do primário e os do secundário. Os mesmos são materiais rígidos, em geral formado por placas laminadas para evitar as perdas por Foucault (JORDÃO, 2002).

Existem duas configurações básicas para os núcleos dos transformadores, são elas:

- **Tipo *core*, ou núcleo envolvido:** Nesse tipo de configuração, as bobinas do transformador envolvem as pernas do núcleo magnético (UMANS, 2014)(IEEE-C57.105, 2020). A Figura 1a representa um modelo monofásico do núcleo tipo *core*.
- **Tipo *shell*, ou núcleo envolvente:** Nesse modelo, os enrolamentos envolvem a perna central de um núcleo magnético e são envolvidos pelas outras duas pernas do núcleo (UMANS, 2014) (IEEE-C57.105, 2020). A Figura 1b mostra a representação monofásica deste tipo de núcleo.

Figura 1 – Tipos de núcleo de transformadores

(a) Núcleo tipo Core. (b) Núcleo tipo Shell.



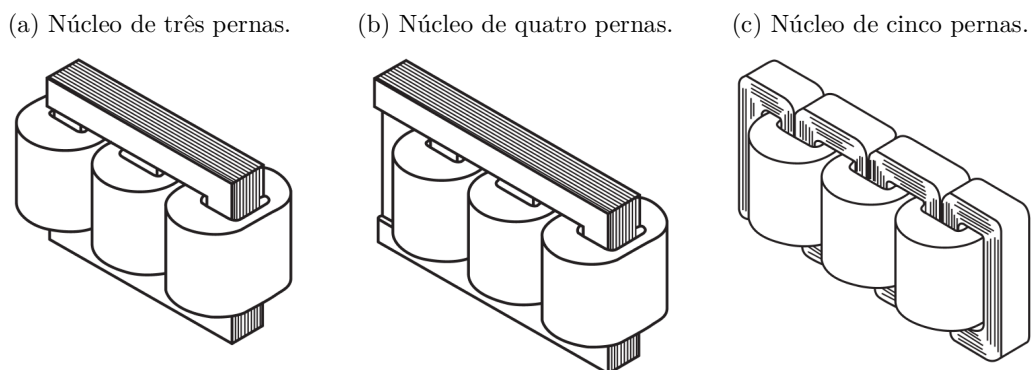
Fonte: IEEE-C57.105 (2020)

Em transformadores trifásicos, as tensões em regime permanente aplicadas em cada fase são defasadas em 120° . Sendo assim, quando não há desequilíbrios, os fluxos de cada fase também são defasados 120° e a soma dos três fluxos é zero. Esse deslocamento de fluxos permite aos transformadores trifásicos utilizarem as pernas do núcleo como um caminho de retorno para outras fases, o que permite menores perdas e mais eficiência do núcleo. Em alguns casos de desequilíbrio, a soma dos fluxos pode não ser zero. A componente de sequência zero do fluxo resultante quando se tem desequilíbrio pode exigir um caminho de retorno para garantia de operação adequada dos transformadores (IEEE-C57.105, 2020). Existem três categoria principais para núcleos de transformadores trifásicos, que são descritas a seguir:

- **Núcleo de três pernas:** A configuração para esse modelo de núcleo segue a mesma ideia do tipo core, onde as bobinas do transformador envolvem as pernas do núcleo. Essa configuração aproveita ao máximo a condição do fluxo líquido ser zero sobre condições de equilíbrio, pois é fornecida apenas uma perna central para cada fase do transformador, eliminando por completo as perdas de retorno de fluxo (IEEE-C57.105, 2020). A Figura 2a traz uma representação do modelo de núcleo de três pernas.
- **Núcleo de quatro pernas:** Essa configuração se parece muito com a configuração de núcleo de três pernas, porém, há uma quarta perna no núcleo que funciona como perna de retorno para o fluxo (IEEE-C57.105, 2020). A representação dessa configuração pode ser observada na Figura 2b.
- **Núcleo de cinco pernas:** A configuração desse modelo segue a ideia do tipo shell, onde as pernas do núcleo envolvem os enrolamentos. Nessa configuração existem duas pernas para retorno do fluxo. Essas pernas de retorno, tanto no

modelo de quatro pernas quanto no de cinco pernas são projetadas para ser um caminho de retorno para componentes de sequência zero, trazendo mais eficiência para os transformadores, mas existe um limite de saturação para essa pernas de retorno, que ocorre quando as componentes de sequência zero atingem aproximadamente 33% da tensão nominal do transformador (IEEE-C57.105, 2020). A representação do modelo de cinco pernas pode ser observado na Figura 2c

Figura 2 – Tipos de núcleo de transformadores trifásicos



Fonte: IEEE-C57.105 (2020)

2.1.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos são partes dos transformadores que são acoplados à uma fonte de tensão ou uma carga (UMANS, 2014).

Os enrolamentos que são conectados à rede de tensão mais alta são conhecidos como enrolamentos de alta tensão (AT) e os enrolamentos conectados à rede de tensão mais baixa são denominados enrolamentos de baixa tensão (BT) (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

2.1.2 Transformadores monofásicos

Os transformadores monofásicos recebem esse nome pois possuem conectados no circuito primário apenas uma fase. Geralmente são constituídos por dois enrolamentos (primário e secundário), onde o primário recebe a fonte de corrente alternada e o secundário é ligado à carga (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

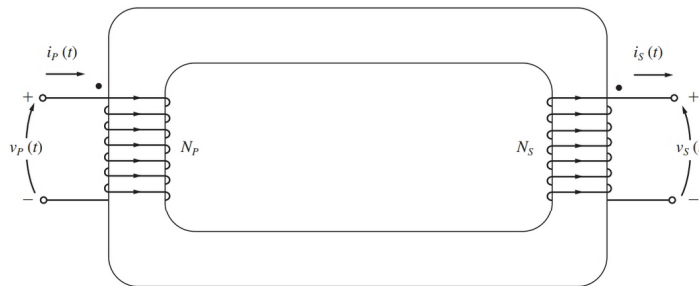
2.1.2.1 Princípio de funcionamento e transformador ideal

O funcionamento das transformadores se baseia nos fundamentos do eletromagnetismo, em especial, nos estudos realizados por Faraday e Lenz, que em resumo, mostram que um campo magnético variável é capaz de produzir um fluxo magnético também variável que em contato com uma espira produz uma tensão induzida na mesma (CARVALHO, 2014).

Assim, aplicando-se uma fonte de tensão alternada no circuito primário de um transformador, o mesmo irá produzir um fluxo magnético variável, que ao se interagir com o núcleo, atingirá as espiras do enrolamento secundário, fazendo com que apareça nesse enrolamento uma tensão alternada por conta da indução magnética (CARVALHO, 2014).

Um *transformador ideal* é um dispositivo onde não há perdas (CHAPMAN, 2013). A Figura 3 mostra a representação desse modelo.

Figura 3 – Transformador ideal



Fonte: CHAPMAN (2013)

No modelo apresentado na Figura 3, o transformador apresenta N_P espiras no enrolamento primário e N_S espiras no enrolamento secundário. A relação entre a tensão $v_P(t)$ aplicada no enrolamento primário e a tensão $v_S(t)$ produzida no secundário é dada pela seguinte equação (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (2.1)$$

onde a é definido como a relação de transformação, ou relação de espiras do transformador.

Já a relação entre a corrente $i_P(t)$ fornecida pela fonte e aplicada ao enrolamento primário e a corrente $i_S(t)$ que sai do enrolamento secundário é dada por (CHAPMAN, 2013):

$$N_P i_P(t) = N_S i_S(t) \quad (2.2)$$

ou

$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{a} \quad (2.3)$$

Ao se analisar as Equações 2.1 e 2.3 é possível concluir que a tensão induzida é sempre proporcional ao número de espiras dos enrolamentos, e a corrente é inversamente proporcional à esse número de espiras (CARVALHO, 2014).

Assim, transformadores onde a tensão no secundário é maior que a tensão aplicada no primário são chamados de transformadores elevadores, ou aumentadores, e quando a tensão no secundário é menor que a tensão do primário são chamados de transformadores abaixadores, ou redutores (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

Em grandezas vetoriais, as equações 2.1 e 2.3 podem ser escritas da seguinte forma (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{V_P}{V_S} = a \quad (2.4)$$

e

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{a} \quad (2.5)$$

Nota-se, a partir das Equações 2.4 e 2.5, que os ângulos de fase de V_P e V_S são iguais, assim como os ângulos de fase de I_P e I_S . Isso mostra que a relação de transformação dos transformadores afeta as magnitudes de tensões e correntes, mas não os ângulos de fase (CHAPMAN, 2013).

Em transformadores ideais, a potência de saída é igual a potência de entrada. Isso pode ser observado nas equações a seguir (CHAPMAN, 2013):

$$P_{entrada} = V_P I_P \cos \theta_P \quad (2.6)$$

$$P_{saída} = V_S I_S \cos \theta_S \quad (2.7)$$

onde θ_P e θ_S são os ângulos entre tensão e corrente primárias e secundárias respectivamente.

Como em transformadores ideais os ângulos não são afetados, tem-se que $\theta_P = \theta_S = \theta$, ou seja, os enrolamentos primário e secundário possuem o mesmo *fator de potência* (CHAPMAN, 2013).

Com isso, a equação de $P_{saída}$ pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_{saída} = V_S I_S \cos \theta \quad (2.8)$$

Aplicando as relações de transformação para tensões e correntes vistas em 2.4 e 2.5 tem-se (CHAPMAN, 2013):

$$P_{saída} = \frac{V_P}{a}(aI_P) \cos \theta \quad (2.9)$$

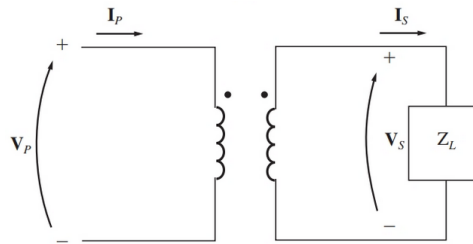
ou seja

$$P_{saída} = V_P I_P \cos \theta = P_{entrada} \quad (2.10)$$

O mesmo se aplica para potência reativa Q e aparente S (CHAPMAN, 2013).

Como transformadores alteram os níveis de tensão e corrente de um sistema, ele também irá alterar a razão entre tensão e corrente. Por outro lado, a *impedância* de um dispositivo ou de um elemento de algum circuito é definida como a razão entre a tensão fasorial no dispositivo e a corrente fasorial que circula por ele. Alterando essa razão se altera a impedância aparente desse elemento (CHAPMAN, 2013). A Figura 4 mostra um transformador ideal com uma carga conectada no seu circuito secundário.

Figura 4 – Impedância conectada no circuito secundário de um transformador ideal



Fonte: CHAPMAN (2013)

Considerando o modelo apresentado na Figura 4, sabe-se que:

$$Z_L = \frac{V_S}{I_S} \quad (2.11)$$

A impedância aparente observada no circuito primário é definida por:

$$Z'_L = \frac{V_P}{I_P} \quad (2.12)$$

Aplicando-se as relações de transformação para tensão e corrente vistas em 2.4 e 2.5, pode-se reescrever a impedância aparente do circuito primário como (CHAPMAN, 2013):

$$Z'_L = \frac{V_P}{I_P} = \frac{aV_S}{\frac{I_S}{a}} = a^2 \frac{V_S}{I_S} \quad (2.13)$$

ou seja,

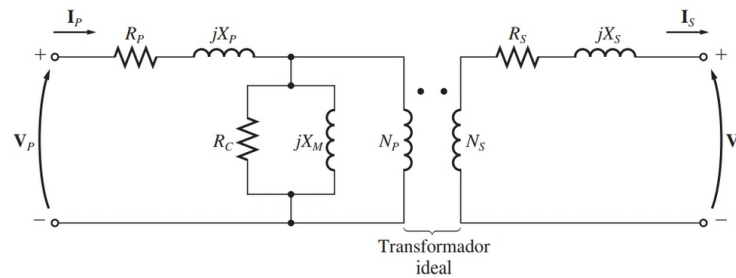
$$Z'_L = a^2 Z_L \quad (2.14)$$

Dessa forma, é possível realizar o casamento de impedância da carga com a impedância da fonte, por meio de transformadores. Esse método é conhecido como reflexão de impedância (CHAPMAN, 2013)(UMANS, 2014).

2.1.2.2 Transformador real

Transformadores ideais são impossíveis de serem construídos fisicamente, desta forma, existe o modelo de transformador real, que contém parâmetros referentes aos elementos construtivos que, mesmo em quantidades mínimas, garantem perdas ao sistema (CHAPMAN, 2013)(UMANS, 2014). A Figura 5 apresenta o circuito equivalente monofásico básico de um transformador real.

Figura 5 – Circuito equivalente básico de um transformador real



Fonte: CHAPMAN (2013)

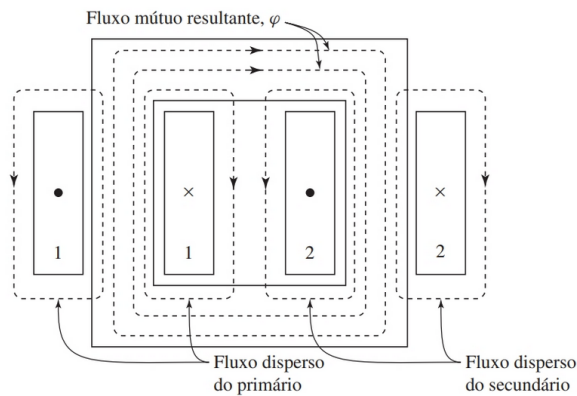
Onde:

- R_P representa a resistência do enrolamento primário;
- X_P representa a reatância indutiva de dispersão do enrolamento primário;
- R_C representa a resistência de magnetização;
- X_m representa a reatância indutiva de magnetização;
- R_S representa a resistência do enrolamento secundário;
- X_S representa a reatância indutiva de dispersão do enrolamento secundário.

2.1.2.3 Reatâncias no transformador real e circuitos equivalentes

O fluxo total que concatena os enrolamentos dos transformadores pode ser dividido em dois elementos, o fluxo mútuo resultante, que circula essencialmente pelo núcleo do transformador e que é produzido pelo efeito combinado das correntes que circulam pelos enrolamento primário e secundário e, o fluxo disperso, que pode ser dividido em duas parcelas, o fluxo disperso primário, que concatena apenas o enrolamento primário e o fluxo disperso secundário, que concatena apenas o enrolamento secundário. A Figura 6 traz um esquemático de um transformador com os fluxos mútuo e disperso (UMANS, 2014).

Figura 6 – Esquemático dos fluxos mútuo e disperso de um transformador



Fonte: UMANS (2014)

Inicialmente, analisando o circuito primário, observa-se que o fluxo disperso induz uma tensão que se soma à tensão gerada pelo fluxo mútuo. Tanto o fluxo disperso quanto a tensão gerada por ele variam linearmente com a corrente do primário I_P . Sendo assim, essa característica do fluxo pode ser representada por uma indutância L_P , denominada *indutância de dispersão do primário*. Dessa forma, pode-se definir o elemento X_P presente no circuito da Figura 5 como (UMANS, 2014):

$$X_P = 2\pi f L_P \quad (2.15)$$

onde f é a frequência do sistema de alimentação.

Além da reatância indutiva X_P , existe ainda no circuito primário a resistência R_P , denominada *resistência do primário*, que está relacionada ao material de construção do enrolamento primário, geralmente cobre, que possui uma resistência característica (KOSOW, 1982)(UMANS, 2014). A Figura 7a mostra as componentes do circuito primário do transformador.

Nota-se então que a tensão nos terminais do primário é formada por três componentes: a queda de tensão na resistência do primário $I_P R_P$, a queda de tensão relacionada ao fluxo disperso que interage com o enrolamento primário $jI_P X_P$ e a força eletromotriz E_P induzida no enrolamento primário pelo fluxo mútuo (UMANS, 2014).

Como visto na Figura 6, o fluxo mútuo concatena os dois enrolamentos do transformador e é criado pela combinação das FMMs. Dessa forma, a corrente do primário deve atender duas condições importantes do circuito magnético, que são (UMANS, 2014):

- Produzir a FMM requerida para gerar o fluxo mútuo;
- Contrabalancear o efeito da FMM do secundário que atua para desmagnetizar o núcleo.

Em outras palavras, a corrente do primário deve não apenas magnetizar o núcleo, como também deve fornecer a corrente drenada pela carga conectada ao secundário do transformador. Dessa forma, a corrente do primário I_P pode ser decomposta em duas componentes, a componente de excitação I_ϕ e a componente de carga I'_S . A componente I_ϕ é definida como uma corrente do primário adicional, responsável por produzir o fluxo mútuo resultante. Já a componente I'_S é definida como uma parcela da corrente do primário que contrabalança a FMM da corrente do secundário I_S (UMANS, 2014).

Como a componente I_ϕ é a responsável por produzir o fluxo do núcleo, a FMM líquida deve ser igual a $N_P I_\phi$ (UMANS, 2014). Assim

$$N_P I_\phi = N_P I_P - N_S I_S = N_P (I_\phi + I'_S) - N_S I_S \quad (2.16)$$

Ou seja, a componente de corrente de carga I'_S pode ser definida como:

$$I'_S = \frac{N_S}{N_P} I_S \quad (2.17)$$

ou

$$I'_S = \frac{1}{a} I_S \quad (2.18)$$

Nota-se que a componente de carga da corrente I_P é igual à corrente do secundário I_S refletida ao lado primário (UMANS, 2014).

A corrente de excitação I_ϕ também pode ser decomposta em duas componentes. Uma componente I_c que está relacionada às perdas no núcleo (histerese e correntes

parasitas), em fase com E_1 , e uma corrente de magnetização I_m , atrasada 90° em relação a E_1 . A corrente de excitação dá origem ao ramo de magnetização presente na Figura 5, onde R_C está relacionada à componente da corrente I_c e X_M está relacionada à componente I_m . A combinação em paralelo de R_C e X_M é referida como *impedância de magnetização* Z_ϕ . A Figura 7b mostra o circuito equivalente do primário com todas as suas variáveis (UMANS, 2014).

Analisando agora o secundário do transformador, observando a Figura 6, nota-se que o fluxo mútuo resultante concatena o enrolamento primário e secundário. Dessa forma, a razão entre as FEMs deve ser igual a razão entre o número de espiras. Assim:

$$\frac{E_P}{E_S} = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (2.19)$$

Entretanto, como visto anteriormente no caso do circuito primário, a tensão presente nos terminais agora do circuito secundário não será E_2 pois, assim como o circuito primário, no circuito secundário existe a presença de uma resistência R_S referente ao material de construção do enrolamento secundário e uma indutância de dispersão L_S resultante do fluxo de dispersão presente no circuito secundário, gerando assim a *reatância de dispersão do secundário* X_S (UMANS, 2014). A Figura 7c mostra o circuito equivalente completo de um transformador.

Geralmente, adota-se um modelo de visualização denominado *circuito equivalente T* onde a representação do transformador ideal, como visto nas Figuras 5 e 7c, não é apresentada e todas as tensões, correntes e impedâncias são refletidas ao circuito primário ou secundário. A Figura 7d mostra a representação de um circuito equivalente T com as variáveis refletidas ao primário, através das seguintes equações (UMANS, 2014):

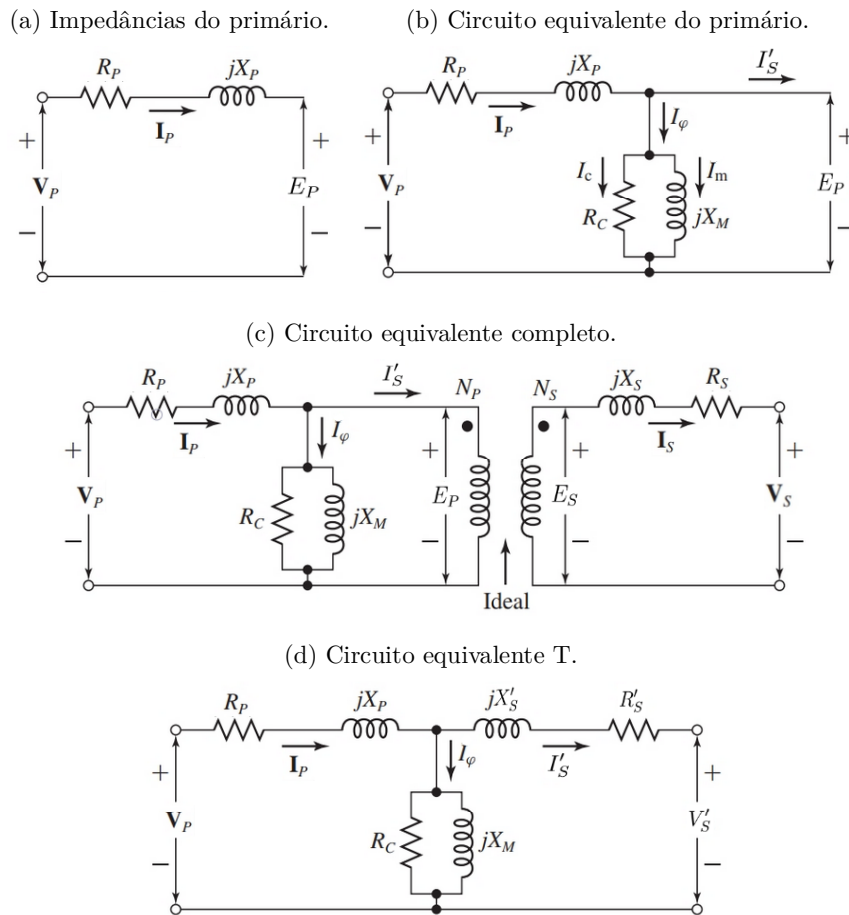
$$jX'_S = a^2 X_S \quad (2.20)$$

$$R'_S = a^2 R_S \quad (2.21)$$

$$V'_S = aV_S \quad (2.22)$$

Todas as variáveis presentes no circuito equivalente dos transformador podem ser obtidas através de dois ensaios, o ensaio a vazio e o ensaio de curto-circuito (CHAPMAN, 2013)(KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

Figura 7 – Circuitos equivalentes



Fonte: Adaptado de UMANS (2014)

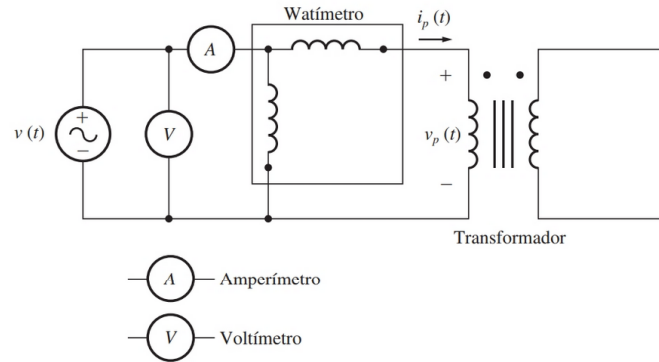
2.1.2.4 Ensaio a vazio

No ensaio a vazio, um enrolamento, geralmente o de baixa tensão (BT), é conectado à uma fonte de tensão nominal enquanto o outro enrolamento é deixado em circuito aberto (CHAPMAN, 2013)(KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975). As principais variáveis medidas nesse ensaio são:

- Tensão nominal aplicada;
- Tensão no secundário;
- Corrente de circuito aberto;
- Potência de circuito aberto.

A Figura 8 representa o modelo de ligação dos instrumentos para o ensaio a vazio.

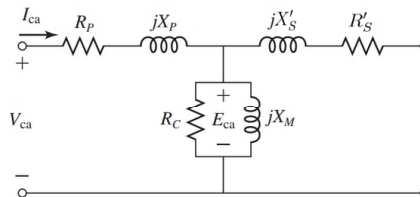
Figura 8 – Ligações para realização do ensaio a vazio



Fonte: CHAPMAN (2013)

Por conveniência, nos ensaios a vazio usualmente escolhe-se o circuito primário como sendo o de baixa tensão (BT). A Figura 9 traz a representação do circuito equivalente de uma transformador onde a impedância do secundário foi refletida ao primário e o secundário é um circuito aberto (UMANS, 2014).

Figura 9 – Circuito equivalente com o secundário aberto



Fonte: Adaptado de UMANS (2014)

Assim, a impedância de circuito aberto Z_{ca} vista a partir do circuito primário é:

$$Z_{ca} = R_P + jX_P + Z_{\phi} = R_P + jX_P + \frac{R_C(jX_M)}{R_C + jX_M} \quad (2.23)$$

Em transformadores de potência a resistência R_P e a reatância X_P são muito menores que R_C e X_M . Dessa forma, o queda de tensão na impedância de dispersão do primário, proveniente da corrente de excitação é muito pequena, podendo ser desprezada, assim como a perda $I_{ca}^2 R_P$. A tensão aplicada ao primário V_{ca} é quase igual à E_{ca} induzida pelo fluxo resultante do núcleo (UMANS, 2014)(KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

Dessa forma, a potência de entrada P_{ca} é quase igual à perda no núcleo E_{ca}^2/R_C . Assim, pode-se ignorar a impedância de dispersão do primário e fazer uma aproximação da impedância de circuito aberto com a impedância de magnetização Z_ϕ (UMANS, 2014). Logo

$$Z_{ca} \approx Z_\phi = \frac{R_C(jX_M)}{R_C + jX_M} \quad (2.24)$$

Como a instrumentação utilizada no ensaio a vazio geralmente mede os valores eficazes das variáveis, tem-se o valor da tensão aplicada V_{ca} , a corrente de circuito aberto I_{ca} e a potência de circuito aberto P_{ca} . Baseando-se nessas medidas, pode-se obter (UMANS, 2014):

$$R_C = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad (2.25)$$

$$|Z_\phi| = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} \quad (2.26)$$

$$X_M = \frac{1}{\sqrt{(1/|Z_\phi|)^2 - (1/R_C)^2}} \quad (2.27)$$

Além das variáveis descritas anteriormente, o ensaio de curto-circuito também permite definir a relação de transformação dos transformadores (UMANS, 2014)(KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975).

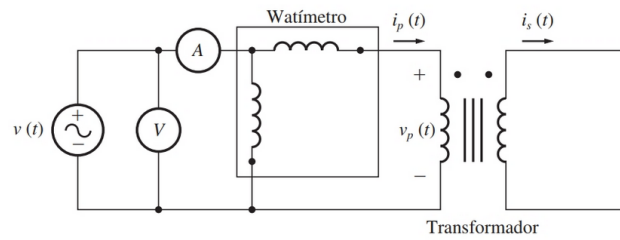
2.1.2.5 Ensaio de curto-circuito

No ensaio de curto-circuito, os terminais de baixa tensão (BT) são curto-circuitados e os terminais de alta tensão (AT) são conectados à uma fonte de tensão variável. A tensão de entrada é ajustada no ponto em que se atinge a corrente nominal do transformador. As principais variáveis medidas nesse ensaio são (CHAPMAN, 2013):

- Tensão de curto circuito;
- Corrente de curto-circuito;
- Potência de curto-circuito.

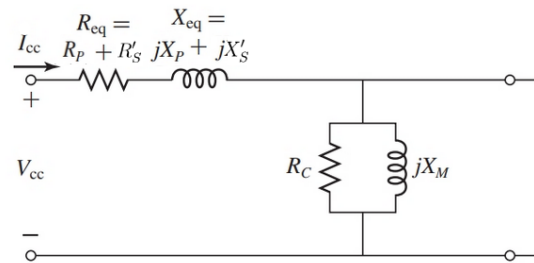
A Figura 10 mostra as ligações dos instrumentos utilizados no ensaio de curto-circuito.

Figura 10 – Ligações para realização do ensaio de curto-circuito



Fonte: CHAPMAN (2013)

Figura 11 – Circuito equivalente com o secundário curto-circuitado



Fonte: Adaptado de UMANS (2014)

Esse ensaio é utilizado para determinar a impedância equivalente em série $R_{eq} + jX_{eq}$, que é a combinação das impedâncias do primário e secundário do transformador, como mostra a Figura 11 (UMANS, 2014).

Como pode ser visto na Figura 11, a impedância de curto-circuito Z_{cc} vista a partir do lado primário pode ser definida como (UMANS, 2014):

$$Z_{cc} = R_P + jX_P + \frac{Z_\phi(R'_S + jX'_S)}{Z_\phi + R'_S + jX'_S} \quad (2.28)$$

Como a impedância do ramo de excitação Z_ϕ é muito maior que a impedância de dispersão do secundário, a equação 2.28 pode ser reescrita como (UMANS, 2014):

$$Z_{cc} = R_P + jX_P + R'_S + jX'_S = R_{eq} + jX_{eq} = Z_{eq} \quad (2.29)$$

Assim, levando em consideração que normalmente os instrumentos utilizados medem os valores eficazes da tensão de entrada V_{cc} , da corrente de curto-circuito I_{cc} e da potência P_{cc} , pode-se determinar (UMANS, 2014):

$$|Z_{eq}| = |Z_{cc}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (2.30)$$

$$R_{eq} = R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (2.31)$$

$$X_{eq} = X_{cc} = \sqrt{|Z_{cc}|^2 - R_{cc}^2} \quad (2.32)$$

2.1.3 Transformadores trifásicos

Transformadores trifásicos podem ser obtidos de duas maneiras. Uma forma é utilizar três transformadores monofásicos e ligá-los como um banco trifásico. Outra forma é construir um transformador contendo três conjuntos de enrolamentos que envolvem um núcleo comum. Ambos os tipos são largamente utilizados. Transformadores com um núcleo comum tem a vantagem de serem mais leves, menores, mais baratos de serem produzidos e ligeiramente mais eficientes que os bancos com transformadores monofásicos. Por outro lado, o uso de bancos trifásicos tem a vantagem de que cada unidade do banco pode ser substituída individualmente caso ocorra algum problema, o que não é possível nos transformadores de núcleo comum. Além disso, pode-se manter em estoque de reserva apenas uma unidade, reduzindo assim o custo com materiais "parados" em estoque, já que no caso onde se aplica transformadores de núcleo comum, se faz necessário manter um transformador completo no estoque de reserva (CHAPMAN, 2013).

Os enrolamentos dos transformadores trifásicos, tanto primário quanto secundário, podem ser acoplados de quatro maneiras, sendo elas: a) estrela, b) triângulo, ou delta, c) zig-zag e d) conexão T. As configurações estrela e delta são as mais utilizadas. Conexões em estrela podem ter seu neutro aterrado ou não (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1975)(IEEE-C57.105, 2020).

Este trabalho tratará dos modelos mais comuns de conexões, que são as conexões Estrela-Estrela, Estrela-Delta, Delta-Estrela e Delta-Delta.

2.1.3.1 Ligação Estrela-Estrela

Nesse modelo de ligação, tanto o primário quanto o secundário do transformador estão ligados em estrela. Sendo assim, a tensão de fase no primário de cada uma das fases do transformador equivale a $1/\sqrt{3}$ da tensão de linha, ou seja $V_{\phi P} = V_{LP}/\sqrt{3}$. Em ligações Estrela-Estrela, a tensão de fase do primário se relaciona com a tensão de fase do secundário pela relação de transformação do transformador. No lado secundário, a tensão de linha V_{LS} equivale a $\sqrt{3}$ da tensão de fase $V_{\phi S}$, ou seja,

$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$. Assim, a razão de tensão nos transformadores Estrela-Estrela pode ser expressa por (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a \quad (2.33)$$

Esse modelo de ligação tem problemas sérios quando utilizados em ambientes desequilibrados e distorcidos. Caso seja conectado à cargas desequilibradas, as tensões nas fases do transformador podem se tornar completamente desequilibradas. Outro problema comum nesse modelo de ligação está relacionado às componentes de terceira harmônica, que pode ser extremamente elevadas (CHAPMAN, 2013).

Nos transformadores com ligação Estrela-Estrela, as tensões de cada fase estão defasadas 120° entre si, porém, as componentes de terceira harmônica de todas as fases estarão em fase entre si. Essas componentes harmônicas sempre estarão presentes nos transformadores, independente do modelo de ligação, pois estão relacionadas a não linearidades do núcleo. Porém, no caso da ligação em questão, por estarem em fase e se somarem, essas componentes de terceira harmônica pode ser extremamente elevadas, em casos extremos, mais elevadas que a própria componente fundamental (CHAPMAN, 2013).

Esses problemas relacionados à componentes de terceira harmônica pode ser resolvidos de duas maneiras (CHAPMAN, 2013):

- Aterrando solidamente os neutros dos transformadores, especialmente do primário, pois essa conexão permite que as componentes de terceira harmônica aditivas causem uma circulação de corrente em direção ao neutro em vez de se somarem e produzir tensões elevadas;
- Acrescentando um enrolamento terciário ligado em Delta ao transformador. Quando se acrescente um terceiro enrolamento em Delta no transformador, as componentes de terceira harmônica da ligação Delta irão se somar, provocando um fluxo de corrente que circulará dentro do enrolamento. Isso irá suprimir as componentes de terceira harmônica da tensão.

Quando se utiliza transformadores com ligação Estrela-Estrela, deve-se usar uma das técnicas descritas acima (CHAPMAN, 2013).

2.1.3.2 Ligação Estrela-Delta

Nesse modelo de ligação, o primário é ligado em Estrela e o secundário é ligado em Delta. Geralmente se usa esse modelo em transformadores abaixadores, onde se abaixa um nível de alta tensão para um nível de média ou baixa tensão. Uma razão

para essa aplicação é que dessa forma pode-se dispor de um neutro para aterramento no lado de alta tensão, o que é conveniente em diversas situações (UMANS, 2014).

Na ligação Estrela-Delta, a tensão de linha do primário é equivalente a $\sqrt{3}$ a tensão de fase, ou seja, $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$. Já a tensão de linha do secundário é igual a tensão de fase, $V_{LS} = V_{\phi S}$. A razão de tensões de cada fase pode ser descrita como (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \quad (2.34)$$

Dessa forma, a relação entre as tensões de linha do primário e do secundário é (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3}a \quad (2.35)$$

Nesse modelo de ligação não se tem o problema de componentes de terceira harmônica elevadas, como no caso da ligação Estrela-Estrela. Isso se deve ao fato de que as componentes harmônicas são suprimidas por uma corrente que circula no enrolamento ligado em Delta. Essa ligação também é mais estável quando alimenta cargas desequilibradas, pois o circuito ligado em Delta redistribui parcialmente os desequilíbrios (CHAPMAN, 2013).

O problema relacionado à esse modelo de ligação está no deslocamento de 30° da tensão secundária em relação à primária. Isso acontece pois o primário está em Estrela e o secundário em Delta. Esse deslocamento se torna um problema quando transformadores são colocados em paralelo. Nesse caso, se os secundários forem colocados em paralelo, os ângulos de fase devem ser iguais, então deve-se ter o cuidado de analisar qual o sentido do deslocamento de 30° nos transformadores que estarão em paralelo (CHAPMAN, 2013).

2.1.3.3 Ligação Delta-Estrela

A ligação Delta-Estrela geralmente é usada em transformadores elevadores (UMANS, 2014). Nesse modelo, a tensão de linha do primário é igual a tensão de fase, ou seja, $V_{LP} = V_{\phi P}$. Já no secundário a tensão de linha equivale a $\sqrt{3}$ da tensão de fase, $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$. Sendo assim, a relação entre as tensões de linha do primário e secundário é (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.36)$$

Esse modelo traz as mesmas vantagens relacionadas às componentes harmônicas descritas no modelo Estrela-Delta, porém, nesse caso, o enrolamento onde as componentes ficam confinadas é o primário (CHAPMAN, 2013).

No modelo Delta-Estrela também há um deslocamento de fase de 30° entre as tensões do primário e do secundário. Em casos onde se usará transformadores em paralelo esse efeito deve ser considerado, assim como descrito no modelo Estrela-Delta (CHAPMAN, 2013).

2.1.3.4 Ligação Delta-Delta

Nesse modelo de ligação, a tensão de fase do primário é igual a tensão de linha, assim como a tensão de fase do secundário é igual a tensão de linha do secundário. Dessa forma, a relação entre as tensões de linha do primário com as do secundário é (CHAPMAN, 2013):

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \quad (2.37)$$

Nessa ligação não existe deslocamento de fase entre as tensões primária e secundária. Também não há problemas relacionados às componentes de terceira harmônica e desequilíbrio das cargas (CHAPMAN, 2013).

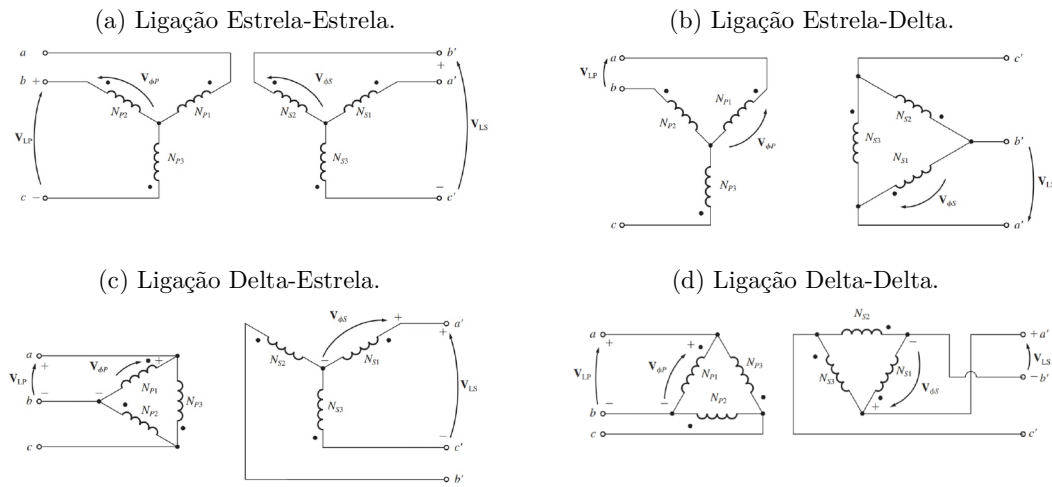
Uma vantagem significativa desse modelo está no fato de que, quando usado banco de transformadores monofásicos, pode-se remover um transformador para possíveis manutenções enquanto os dois transformadores restantes continuam trabalhando como um banco trifásico, com o valor nominal reduzido a 58% do valor nominal original do banco. Esse tipo de conexão é conhecida com V ou *delta aberto* (UMANS, 2014).

A Figura 12 traz a representação dos tipos de ligação descritos.

2.2 Cargas Lineares

São definidas como cargas lineares, aquelas cargas que em regime de operação apresentam uma impedância de carga constante à alimentação durante o ciclo da tensão aplicada. Essas cargas são compostas por elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores. Esse modelo de cargas não modifica o formato da onda de tensão, dessa forma, ondas de tensão e corrente possuem a mesma forma, no caso de cargas que contém indutores e capacitores as ondas possuem apenas uma defasagem angular entre elas (FIGUEIREDO, 2006).

Figura 12 – Modelos de ligações de transformadores trifásicos



Fonte: CHAPMAN (2013)

Em resumo, as cargas lineares apresentam as seguintes características (KNES-CHKE, 1999):

- Quando as cargas lineares são conectadas a um sistema com tensões senoidais, drenam correntes senoidais.
- A tensão de alimentação não é modificada.
- As ondas de tensão e corrente possuem o mesmo formato, podendo haver apenas defasagem entre as mesmas.
- As ondas de corrente e tensão possuem apenas a componente da frequência fundamental do sistema.

2.3 Cargas não-lineares

As cargas não-lineares drenam correntes que não são senoidais, em alguns casos podem ser descontínuas e a impedância equivalente varia durante um ciclo da onda de tensão aplicada. Essas cargas podem causar alterações na onda de tensão, o que pode ser prejudicial ao sistema elétrico. Dispositivos de eletrônica de potência compostos por semicondutores ativos e passivos (Pontes retificadoras, conversores, etc) são exemplos de cargas não-lineares (FIGUEIREDO, 2006).

Em resumo, as principais características de uma carga não linear são (KNES-CHKE, 1999):

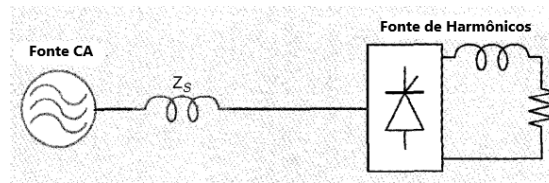
- Quando as cargas lineares são conectadas à um sistema com tensões senoidais, drenam correntes não senoidais.
- A tensão de alimentação pode ser modificada, se tornando uma tensão não senoidal.
- As ondas de tensão e corrente não possuem o mesmo formato, e geralmente são ondas deformadas.
- As ondas de corrente e tensão possuem, além da componente da frequência fundamental do sistema, componentes múltiplas dessa frequência, denominadas componentes harmônicas.

2.3.1 Cargas CSI (current-source inverter) e VSI (voltage-source inverter)

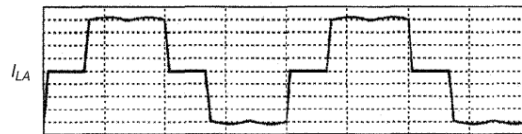
Conversores tiristorizados são fontes comuns de correntes harmônicas. A distorção das ondas de correntes nesse caso se dá pela comutação dos elementos semicondutores. Como os conteúdos e características das correntes harmônicas são pouco dependentes do circuito CA, esse tipo de conversor se comporta como uma fonte de corrente. Nesse modelo de conversor, uma indutância presente no lado de busca manter a corrente constante (PENG, 1998). A Figura 13 mostra um modelo de carga CSI, sua forma de onda de corrente característica e a representação do conversor como fonte de corrente.

Figura 13 – Modelo geral das cargas CSI

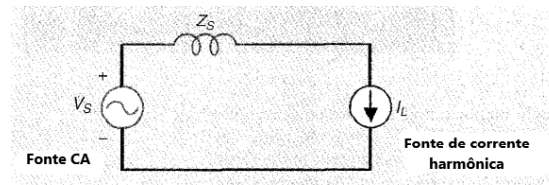
(a) Modelo de carga CSI



(b) Forma de onda da corrente



(c) Representação do modelo como fonte de corrente

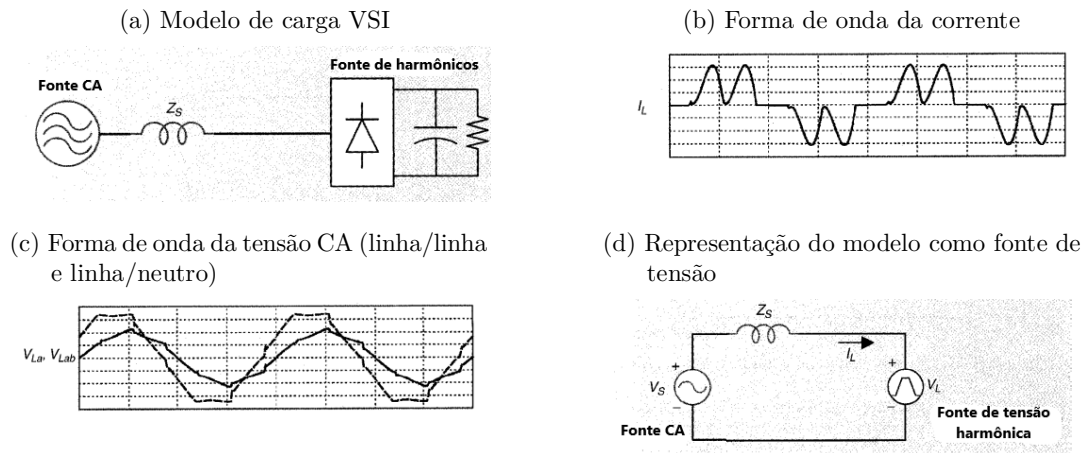


Fonte: Adaptado de Peng (1998)

Onde I_{LA} é a corrente que flui entre a fonte CA e a carga.

As cargas VSI são compostas por um sistema de retificação com um capacitor do lado dc. Esse modelo apresenta uma corrente extremamente distorcida, onde sua amplitude harmônica é afetada de forma significativa pela impedância CA do circuito, e a tensão no terminal de entrada do retificador é característica e menos dependente da impedância CA. Assim, esse modelo se comporta como uma fonte de tensão. Dessa forma, a corrente harmônica presente nesse modelo se origina da tensão do retificador e é dependente tanto dessa tensão quanto da impedância CA do sistema (PENG, 1998). A Figura 14 mostra um modelo de carga VSI, suas formas de onda de corrente e tensão características e a representação do conversor como fonte de tensão.

Figura 14 – Modelo geral das cargas VSI



Fonte: Adaptado de Peng (1998)

Onde I_{LA} é a corrente que flui entre a fonte CA e a carga, V_{La} é a tensão de linha/neutro nos terminais do retificador e V_{Lab} é a tensão de linha/linha nos terminais do retificador.

2.4 Distorções harmônicas

Em redes elétricas, as distorções harmônicas podem ser definidas como o surgimento de correntes e tensões não-senoidais provocadas por cargas não-lineares que são conectadas à rede. O estudo dessas distorções é realizado através da Análise de Fourier (decomposição harmônica), na qual a rede elétrica é estudada em um número finito de frequências harmônicas (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

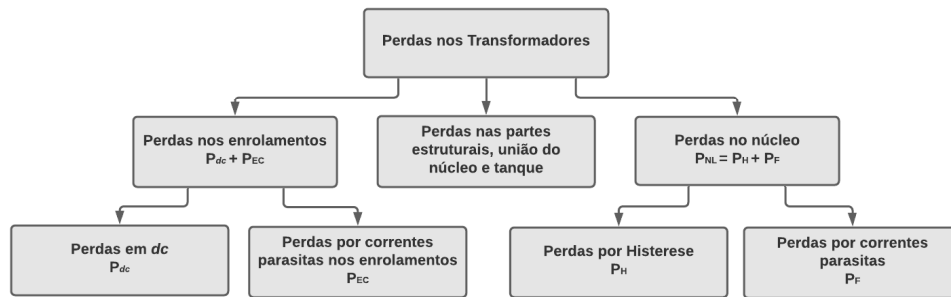
A existência de distorção harmônica em sistemas elétricos é um fenômeno indesejado, pois diversos equipamentos são sensíveis à essas distorções podendo ser danificados ou ter sua vida útil reduzida significativamente (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

A Análise de Fourier diz que uma onda periódica com frequência f pode ser decomposta em uma soma infinita de senoides, ou harmônicos, cada uma com uma frequência múltipla inteira da frequência f , denominada *frequência fundamental*. Em aplicações reais que exigem uma boa precisão nos resultados, considera-se harmônicos com frequências até a 49º ordem (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

2.5 Perdas em transformadores

Os transformadores, quando carregados, dissipam potência através do efeito Joule em seus enrolamentos. Essas perdas são relativas às correntes que circulam pelos mesmos (correntes de carga, de magnetização e parasitas). As perdas nos enrolamentos podem ser divididas em dois tipos básicos, as perdas em dc (referente à resistência equivalente dc) e as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos P_{EC} . Além das perdas nos enrolamentos, existem também o que se chama de perdas fora dos enrolamentos, como núcleo, conexões, estrutura metálica e tanque (SANTOS, 2012).

Figura 15 – Diagrama representativo das perdas nos transformadores



Fonte: Adaptado de SANTOS (2012)

As perdas nos núcleos dos transformadores são provenientes do fluxo magnético que circula por eles e podem se divididas em duas perdas principais, a perda por histerese P_H e a perda por correntes parasitas P_F (SANTOS, 2012).

$$P_H = v f B^n K_h \quad (2.38)$$

$$P_F = K_e f^2 B^2 \tau_{chapa}^2 v \quad (2.39)$$

Onde

- K_h e K_e são constantes que dependem do material de construção do núcleo;
- v é o volume do material (m^3);
- n é uma valor que depende do material de construção do núcleo, variando de 1,5 a 2,5;
- τ_{chapa} é a espessura de laminação das chapas do núcleo (mm);

- B é o valor máximo da densidade de fluxo magnético no núcleo (Wb/m^2);
- f é a frequência da onda do campo magnético (Hz).

Dessa forma, como mostrado no diagrama da Figura 15, a perda total no núcleo pode ser definida como a soma das perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas, assim (SANTOS, 2012):

$$P_{núcleo} = P_H + P_F \quad (2.40)$$

A perda em carga (P_{LL}) de um transformador é composta por três variáveis, sendo elas (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018):

- Perdas na resistência equivalente dc dos enrolamentos (R_{dc});
- Perdas adicionais por correntes parasitas (P_{TSL}), que corresponde à soma das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos (P_{EC}) e as perdas por correntes parasitas em partes que não sejam os enrolamentos (P_{NL}).

Dessa forma, tem-se:

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{NL} \quad (2.41)$$

$$P_{LL} = P + P_{TSL} \quad (2.42)$$

Onde

- P_{TSL} é a perda adicional por correntes parasitas (W).
- P_{EC} é a perda por correntes parasitas nos enrolamentos (W);
- P_{NL} é a perda por correntes parasitas em partes que não sejam enrolamentos (W);
- P_{LL} é a perda em carga (W);
- P é a perda $I^2 R_{dc}$ em carga (W);

2.6 Influência dos harmônicos nos transformadores

Quando um transformador é submetido à cargas que drenam correntes harmônicas, aumentam-se as perdas. Dessa forma, os transformadores apresentam sobreaquecimento, o que pode comprometer seu isolamento e reduzir sua vida útil (SANTOS, 2012).

Os transformadores que alimentam cargas não-lineares produzem fluxos adicionais, gerando correntes parasitas nos enrolamentos, núcleo e partes estruturais. Cargas onde prevalecem harmônicos ímpares e múltiplas de três e que contenham componente dc da corrente de carga, podem gerar em alguns transformadores conectados em estrela, um aumento da corrente de excitação, o que eleva as perdas no núcleo (SANTOS, 2012).

2.6.1 Efeitos da componente dc da corrente de carga

Em alguns casos, as correntes harmônicas podem estar acompanhadas de uma componente dc da corrente de carga, fazendo com que as perdas no núcleo aumentem. Essa componente dc também é capaz de aumentar a corrente de excitação, fazendo o nível de som audível aumentar e em alguns casos fazer o núcleo saturar. Espera-se que a componente dc da corrente de carga não afete a capacidade de transferência de potência dos transformadores (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018).

2.6.2 Efeito das correntes harmônicas nas perdas no núcleo

Harmônicos presentes na corrente de carga podem distorcer ondas de tensão e corrente. Essas distorções, com acréscimo da componente dc da corrente de carga, aumentam a densidade de campo magnético nas partes que compreendem o núcleo. Esse aumento na densidade de campo pode provocar aumento da corrente de excitação, que em casos extremos, pode atingir níveis de curto-circuito, afetando permanentemente a curva de histerese dos transformadores. Em geral, esse aumento da densidade de campo magnético eleva o nível de ruído sonoro dos transformadores e correntes parasitas no núcleo (SANTOS, 2012).

2.6.3 Efeito das correntes harmônicas na perda nos enrolamentos referentes à resistência equivalente dc

Quando o valor da corrente de carga I é aumentado devido à presença de harmônicos, então a perda $R_{dc}I^2$ nos enrolamentos será incrementada na ordem do quadrado do aumento do nível da corrente. Se o valor da componente fundamental é

mantido com o incremento de correntes harmônicas, então o valor *rms* da corrente de carga irá aumentar, podendo levar o transformador à operar em sobrecarga. Esse fator limita a potência aparente dos transformadores que alimentam cargas não lineares (SANTOS, 2012).

2.6.4 Efeito das correntes harmônicas nas perdas por correntes parasitas nos enrolamentos P_{EC}

A presença de correntes harmônicas aumenta a quantidade dos fluxos dispersos nos transformadores, conseqüentemente, aumenta-se a produção de correntes parasitas. O aumento das correntes parasitas tende a causar o aumento da temperatura do equipamento, podendo afetar o isolamento dos enrolamentos e núcleo do transformador. Esse efeito é o que mais afeta o bom funcionamento do transformador, sendo visto como o aspecto mais crítico em relação às perdas oriundas de correntes harmônicas (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018).

2.6.5 Efeito das correntes harmônicas nas perdas adicionais P_{NL}

Quando transformadores são submetidos à cargas não-lineares, as perdas adicionais P_{NL} produzidas no núcleo, conexões, tanque e partes estruturais aumentam. Esse aumento nas perdas causa elevação da temperatura nas partes metálicas acima do normal. Quando os transformadores tem as partes metálicas imersas em óleo, podem-se gerar gases combustíveis, aumentando o risco de incêndios. Além disso, as partes isolantes em contato com os pontos mais quentes dos transformadores podem ter sua vida útil reduzida (SANTOS, 2012).

2.7 Métodos para quantificação e análise de harmônicos nos transformadores

Medir e quantificar os níveis de harmônicos em que os transformadores estão submetidos é de extrema importância para se tomar ações efetivas em casos de manutenção. Além disso, para questões de projeto essas análises são extremamente relevantes (SANTOS, 2012)(LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). A seguir serão apresentados métodos para quantificação e análise de harmônicos nos transformadores.

2.7.1 Distorção harmônica total (THD)

A THD proporciona o cálculo do desvio total de uma determinada onda em relação à sua componente fundamental (IEEE-1459, 2010). Pode ser utilizada para analisar sinais de tensão (THD_v) e sinais de corrente (THD_i) como é mostrado a seguir (SANTOS, 2012):

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}{V_1^2}} \quad (2.43)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}{I_1^2}} \quad (2.44)$$

Onde

- h é a ordem harmônica;
- V_h é a tensão harmônica de ordem h ;
- h_{max} é a ordem harmônica máxima;
- V_1 é a tensão fundamental eficaz;
- I_h é a corrente harmônica de ordem h ;
- I_1 é a corrente fundamental eficaz.

Para sistemas elétricos trifásicos, as medições para determinação da THD devem ser realizadas através das tensões fase-neutro quando se tem um sistema estrela aterrado e fase-fase para os demais sistemas (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.7.2 Distorção harmônica individual (IHD)

Também chamada de *fator harmônico*, a IHD é utilizada para se quantificar a distorção harmônica individual de cada componente de uma onda. Sua formulação é a seguinte (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$IHD = \frac{C_h}{C_1} \cdot 100\% \quad (2.45)$$

Onde

- C_h é a componente harmônica, podendo ser tensão ou corrente;
- C_1 é a componente fundamental.

2.7.3 Potência instantânea

A potência instantânea pode ser definida da seguinte maneira (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.46)$$

Essa potência pode ser dividida em duas componentes, a potência instantânea ativa (p_a) e a potência instantânea não ativa (p_{na}) (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)(IEEE-1459, 2010). Dessa forma, pode-se definir a potência instantânea como:

$$p = p_a + p_{na} \quad (2.47)$$

2.7.3.1 Potência instantânea ativa

A potência instantânea ativa pode ser definida da seguinte maneira (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$p_a = V_0 I_0 + \sum_{k \neq 0} V_k I_k \cos \Theta_k [1 - \cos (2kw_1 t + 2\phi_k)] \quad (2.48)$$

ou

$$p_a = P_0 + \sum_{k \neq 0} P_k [1 - \cos (2kw_1 t + 2\phi_k)] \quad (2.49)$$

A potência instantânea ativa de ordem k é formada tensão harmônica de ordem k V_k e pela corrente harmônica de ordem k I_k que está em fase com V_k (IEEE-1459, 2010). Essa potência é composta por dois termos, a potência harmônica P_k e a potência harmônica intrínseca $P_k \cos (2kw_1 t + 2\phi_k)$, onde essa última componente não contribui para transferência líquida de energia nem para as perdas nos enrolamentos condutores (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.7.3.2 Potência instantânea não ativa

A potência instantânea não ativa pode ser definida como (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)(IEEE-1459, 2010):

$$\begin{aligned} p_{na} = & V_0 \sum_{m \neq 0} I_m \sin(mw_1 t + \phi_m \pm \Theta_m) + I_0 \sum_{k \neq 0} V_k \sin(kw_1 t + \phi_k) \\ & \pm \frac{1}{2} \sum_{k \neq 0} V_k I_k \sin \Theta_k \sin(2kw_1 t + 2\phi_k) \\ & + \sum_m \sum_{k \neq m} V_k I_m \sin(kw_1 t + \phi_k) \sin(mw_1 t + \phi_m \pm \Theta_m) \end{aligned} \quad (2.50)$$

O valor médio da potência instantânea é nulo, assim, a transferência líquida de potência associada a parte não ativa da potência instantânea também é nula, porém, a corrente associada a essa componente pode causar perdas adicionais de potência nos transformadores (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.7.3.3 Fator de potência

O fator de potência é uma medida que indica o quão eficiente é a drenagem de potência útil realizada por uma carga à uma fonte de alimentação, definido pela relação entre potência útil (ativa) e aparente (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.51)$$

Em casos onde se tem apenas componentes lineares drenando corrente, o fator de potência é medido através do cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente fundamentais. Nesse caso, o fator de potência é conhecido como fator de potência de deslocamento e pode ser calculado da seguinte forma (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos \Theta_1 \quad (2.52)$$

Quando se tem presença de harmônicos no sistema, o fator de potência (total ou verdadeiro) é calculado da seguinte forma (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$FP = \frac{V_0 I_0 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k} I_{rms,k} \cos \Theta_k}{(\sqrt{V_0^2 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k}^2}) \cdot (\sqrt{I_0^2 + \sum_{k \neq 0} I_{rms,k}^2})} \quad (2.53)$$

Nota-se que a capacidade de utilização de um sistema diminui quando há presença de distorções (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

O fator de potência verdadeiro ainda pode ser representando em função da THD (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$FP = \frac{P_0 + \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \dots + \bar{P}_k}{V_{1,rms} I_{1,rms} (\sqrt{1 + THD_v^2}) \cdot (\sqrt{1 + THD_i^2})} \quad (2.54)$$

Onde \bar{P}_k é a potência média da componente de ordem k.

2.7.3.4 Fator de crista

O fator de crista mostra a relação entre o valor de pico e o valor eficaz de um sinal, e pode ser calculado da seguinte forma (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

$$FC = \frac{F_p}{F_{rms}} \quad (2.55)$$

Para sinais *dc* o fator de crista é unitário, pois o valor de pico e rms são iguais. Quando uma onda é senoidal, o fator de crista é 1,414, ou $\sqrt{2}$. Quando se tem um valor para o fator de crista maior que 1,414 é indicado que a onda é pontiaguda. Já se o fator de crista for menor que 1,414 a onda é achatada. Um fator de crista muito elevado indica sobrecargas pontuais consideráveis (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.7.3.5 Fator de perda harmônica

O fator de perda harmônica F_{HL} relaciona as perdas totais por correntes parasitas nos enrolamentos dos transformadores causadas por componentes harmônicas e as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos quando não existem correntes harmônicas circulando (IEEE-C57.110, 2018). Esse fator pode ser utilizado como um multiplicador das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos em condições lineares e de potencia nominal na determinação das perdas por correntes parasitas em enrolamentos em situações com cargas não-lineares (SANTOS, 2012). O fator de perda harmônica é definido como:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (2.56)$$

Onde

- I_h é o valor *rms* da corrente harmônica de ordem h ;
- h é a ordem harmônica;
- h_{max} é a ordem máxima da harmônica de potência significativa.

Para se calcular o fator de perda harmônica para perdas fora dos enrolamentos, utiliza-se o *Fator de Perda Harmônica Fora dos Enrolamentos* F_{HL-STR} , definido da seguinte maneira (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018):

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (2.57)$$

As componentes de corrente de carga harmônicas podem ser normalizadas com base no valor *rms* da componente fundamental I_1 . Dessa forma, as equações 2.56 e 2.57 podem ser reescritas da seguinte forma (SANTOS, 2012):

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2.58)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2.59)$$

2.7.3.6 Fator K

O Fator K está relacionado à capacidade de um transformador para servir diferentes graus de cargas não-lineares sem exceder os limites definidos de temperatura (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). Esse é outro método que pode ser utilizado como um multiplicador das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos em situações lineares de potência nominal na determinação das perdas por correntes parasitas nos enrolamentos em condições não-lineares. Essa fator foi apresentado pelas normas UL-1561 e UL-1562 e é definido como (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018):

$$Fator K = \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^2 \quad (2.60)$$

Os transformadores de fator K comumente encontrados atualmente são das seguintes categorias: K-4, K-9, K-13, K-20, K-30, K-40 e K-50 (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Uma relação entre o Fator K e o Fator de Perda Harmônica é mostrada na Equação 2.61 (SANTOS, 2012).

$$Fator K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (2.61)$$

A diferença entre o Fator K e o F_{HL} é a corrente adotada como base. Enquanto o Fator K é normalizado pela corrente nominal I_R , o F_{HL} é normalizado pela corrente da componente fundamental I_1 (SANTOS, 2012).

2.7.3.7 Método de depreciação da potência nominal (*Derating*)

Em geral, os transformadores são projetados para trabalharem em sua frequência nominal e em condições senoidais. Dessa forma, quando os transformadores alimentam cargas não-lineares, os mesmos estão sujeitos ao aumento das perdas. Assim,

para evitar problemas maiores, a capacidade do transformador deve ser reduzida, ou seja, utiliza-se uma potência menor que a nominal para situações com cargas não-lineares. Esse processo é conhecido como *derating* ou depreciação da potência nominal (SANTOS, 2012).

A Equação 2.62 apresenta o cálculo para a potência depreciada ($S_{derated}$). Esse valor representa um fator que deve ser multiplicado pela potência nominal dos transformadores (S_R) para o cálculo da potência máxima que os transformadores podem alimentar (S_{max}) (SANTOS, 2012).

$$S_{derated} = \frac{S_{max}}{S_R} \quad (2.62)$$

A Equação 2.63 determina o cálculo da corrente máxima por unidade para transformadores que alimentam cargas não lineares (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018).

$$I_{max(pu)} = \sqrt{\frac{P_{W-R(pu)}}{1 + P_{EC-R(pu)} \times F_{HL}}} \quad (2.63)$$

Onde

- $P_{W-R(pu)}$ representa a perda nos enrolamentos em condições de carga linear e potência nominal;
- $P_{EC-R(pu)}$ representa a perda por corrente parasita dos enrolamentos por unidade sob condições nominais;
- F_{HL} representa o fator de perda harmônica.

Visando evitar o sobreaquecimento dos transformadores que alimentam cargas não-lineares é recomendado que a corrente $I_{max(pu)}$ não seja superior à corrente nominal do equipamento. Dessa forma, a potência máxima que o transformador pode alimentar, em pu , se iguala à corrente máxima em pu calculada ($I_{max(pu)}$) (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018). Assim:

$$I_{max(pu)} = S_{derated(pu)} \quad (2.64)$$

Para se calcular a redução da potência aparente nominal (RAPR) dos transformadores que alimentam cargas não-lineares, define-se como base a potência aparente nominal (S_R) em relação à potência aparente máxima (S_{max}) (SANTOS, 2012)(FUCHS, 2002). Assim:

$$RAPR = \frac{S_R - S_{max}}{S_R} \times 100\% \quad (2.65)$$

Visto que a potência aparente dos transformadores que alimentam cargas não-lineares será reduzida, a potência ativa também será menor que a potência nominal para situações senoidais. Dessa forma, a potência ativa máxima que o transformador submetido ao *derating* poderá suprir é definido pela Equação 2.66, e a capacidade de potência ativa (RPC) é definida pela Equação 2.67 (SANTOS, 2012)(FUCHS, 2002).

$$P_{max} = S_{max} \times FP \quad (2.66)$$

Onde FP é o fator de potência total do sistema.

$$RPC = \frac{P_{max}}{S_R} \quad (2.67)$$

3 Metodologia

Este trabalho trará uma visão computacional dos sistemas contendo transformadores trifásicos e cargas não lineares. O foco principal será a simulações de sistemas variados onde analisar-se-á o comportamento dos transformadores trifásicos para diferentes situações com presença de harmônicos.

3.1 Simulações

Para realização das simulações computacionais presentes no trabalho, utilizou-se o software Simulink da Mathworks. As simulações foram divididas em casos, cada um com suas características.

Foram definidos 40 casos de estudo, que contemplam os principais modelos de ligações de transformadores trifásicos, que serão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2 – Casos simulados

Caso	Núcleo do Transformador	Fechamento	Zcc	Carga
1	Banco de transformadores	Δ - Δ	Z	CSI
2	Banco de transformadores	Δ -Y	Z	CSI
3	Banco de transformadores	Y- Δ	Z	CSI
4	Banco de transformadores	Y-Y	Z	CSI
5	Banco de transformadores	Δ - Δ	Z	VSI
6	Banco de transformadores	Δ -Y	Z	VSI
7	Banco de transformadores	Y- Δ	Z	VSI
8	Banco de transformadores	Y-Y	Z	VSI
9	Núcleo tipo Core	Δ - Δ	Z	CSI
10	Núcleo tipo Core	Δ -Y	Z	CSI
11	Núcleo tipo Core	Y- Δ	Z	CSI
12	Núcleo tipo Core	Y-Y	Z	CSI
13	Núcleo tipo Core	Δ - Δ	Z	VSI
14	Núcleo tipo Core	Δ -Y	Z	VSI
15	Núcleo tipo Core	Y- Δ	Z	VSI
16	Núcleo tipo Core	Y-Y	Z	VSI
17	Núcleo tipo Shell	Δ - Δ	Z	CSI
18	Núcleo tipo Shell	Δ -Y	Z	CSI
19	Núcleo tipo Shell	Y- Δ	Z	CSI
20	Núcleo tipo Shell	Y-Y	Z	CSI
21	Núcleo tipo Shell	Δ - Δ	Z	VSI
22	Núcleo tipo Shell	Δ -Y	Z	VSI
23	Núcleo tipo Shell	Y- Δ	Z	VSI
24	Núcleo tipo Shell	Y-Y	Z	VSI
25	Banco de transformadores	Δ - Δ	Z	CSI Controlada
26	Banco de transformadores	Δ -Y	Z	CSI Controlada
27	Banco de transformadores	Y- Δ	Z	CSI Controlada
28	Banco de transformadores	Y-Y	Z	CSI Controlada
29	Banco de transformadores	Δ - Δ	Z	Carga Mista
30	Banco de transformadores	Δ -Y	Z	Carga Mista
31	Banco de transformadores	Y- Δ	Z	Carga Mista
32	Banco de transformadores	Y-Y	Z	Carga Mista
33	Banco de transformadores	Δ - Δ	Z \times 10	CSI
34	Banco de transformadores	Δ -Y	Z \times 10	CSI
35	Banco de transformadores	Y- Δ	Z \times 10	CSI
36	Banco de transformadores	Y-Y	Z \times 10	CSI
37	Banco de transformadores	Δ - Δ	Z \times 10	VSI
38	Banco de transformadores	Δ -Y	Z \times 10	VSI
39	Banco de transformadores	Y- Δ	Z \times 10	VSI
40	Banco de transformadores	Y-Y	Z \times 10	VSI

Onde Z é a impedância de curto-circuito, equivalente a $0,5 + j0,4 \times 10^{-3} \Omega$.
Os valores das cargas utilizadas nas simulações foram definidas visando

manter os sistemas dentro da capacidade dos transformadores (3kVA), com valores compatíveis às cargas existentes em laboratórios para possíveis experimentos futuros.

As principais configurações das simulações foram as seguintes:

- **Tempo de simulação:** 0,5s, equivalente à 30 ciclos das ondas em 60Hz;
- **Solver:** ODE23tb;
- **Tipo de simulação:** Discreto;
- **Tempo de amostragem:** 1 μ s.

De maneira geral, o ponto de referência analisado nas simulações será o secundário dos transformadores. Isso se dá pelo fato de que a fonte trifásica utilizada é ideal, dessa forma, variáveis de potência por exemplo serão modificadas no primário, devido a tensão ideal.

3.1.1 Comparações entre os casos simulados

Os casos citados acima serão subdivididos em grupos para serem comparados.

Os grupos foram definidos da seguinte forma:

- **Grupo 1 - Banco de transformadores alimentando uma carga CSI:** Este grupo é formado pelos casos 1, 2, 3 e 4;
- **Grupo 2 - Banco de transformadores alimentando uma carga VSI:** Este grupo é formado pelos casos 5, 6, 7 e 8;
- **Grupo 3 - Transformadores trifásicos com núcleo tipo Core alimentando uma carga CSI:** Este grupo é formado pelos casos 9, 10, 11, 12;
- **Grupo 4 - Transformadores trifásicos com núcleo tipo Core alimentando uma carga VSI:** Este grupo é formado pelos casos 13, 14, 15 e 16;
- **Grupo 5 - Transformadores trifásicos com núcleo tipo Shell alimentando uma carga CSI:** Este grupo é formado pelos casos 17, 18, 19 e 20;
- **Grupo 6 - Transformadores trifásicos com núcleo tipo Shell alimentando uma carga VSI:** Este grupo é formado pelos casos 21, 22, 23 e 24;
- **Grupo 7 - Banco de transformadores alimentando uma carga CSI controlada:** Este grupo é formado pelos casos 25, 26, 27 e 28;

- **Grupo 8 - Banco de transformadores alimentando uma carga híbrida, composta por uma carga CSI controlada e uma carga VSI:** Este grupo é formado pelos casos 29, 30, 31 e 32;
- **Grupo 9 - Banco de transformadores com impedância de curto-circuito 10x maior alimentando uma carga CSI:** Este grupo é formado pelos casos 33, 34, 35 e 36;
- **Grupo 10 - Banco de transformadores com impedância de curto-circuito 10x maior alimentando uma carga VSI:** Este grupo é formado pelos casos 37, 38, 39 e 40;

A primeira comparação a ser realizada entre os resultados obtidos nas simulações será referente aos grupos 1 e 2. Essa primeira análise irá tratar da influência dos fechamentos dos transformadores nos sistemas, principalmente na composição harmônica. Serão feitas comparações de valores de THD_i e THD_v , comportamento da potência instantânea, fatores de potência dentre outras variáveis.

A segunda comparação será entre os grupos 1,3 e 5 e entre os grupos 2, 4 e 6. Essa análise buscará comparar a influência dos tipos de núcleos dos transformadores nos sistemas com presença de harmônicos.

A terceira, e última, comparação será realizada entre os grupos 1 e 8 e entre 2 e 9. Essa comparação busca analisar a influência da impedância de curto circuito dos transformadores nos sistemas, principalmente na composição harmônica dos mesmos.

O grupo 7 trará o comportamento de um sistema contendo um banco de transformadores alimentando uma carga CSI controlada. Esse modelo de carga é muito comum nas indústrias e possui algumas peculiaridades, principalmente na questão do fator de potência de deslocamento (PENG, 1998).

O grupo 8 apresentará um sistema híbrido, contendo uma carga CSI controlada e uma carga VSI, ambas alimentadas por um banco de transformadores. Esse perfil de sistema é mais próximo da realidade, onde se tem cargas de diferentes modelos juntas sendo alimentadas por uma fonte comum.

4 Simulações

Este capítulo trará os resultados das simulações realizadas no trabalho.

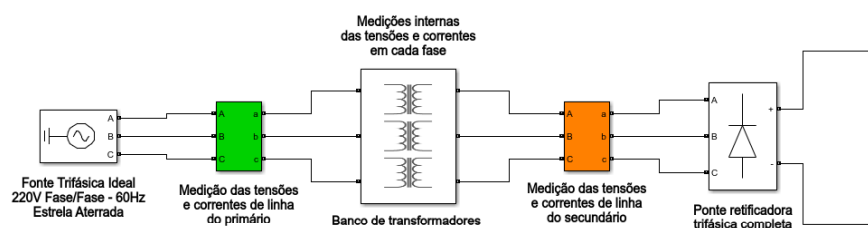
4.1 Influência dos fechamentos dos transformadores nos sistemas com presença de harmônicos

Essa seção tratará da influência das principais ligações dos transformadores nos sistemas contendo cargas não lineares CSI e VSI.

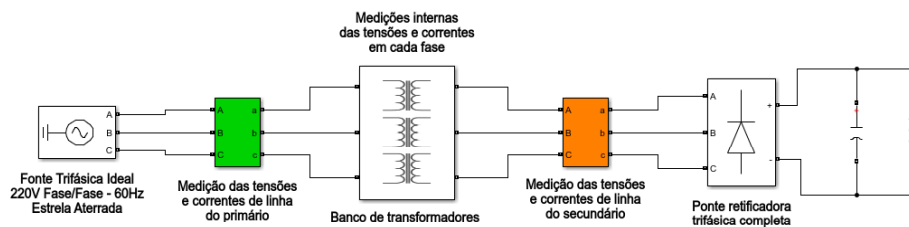
A Figura 16 traz a representação dos sistemas simulados, onde serão analisados casos com fechamentos Δ - Δ , Δ -Y, Y- Δ e Y-Y.

Figura 16 – Representação dos sistemas simulados para análise da influência dos fechamentos dos transformadores

(a) Sistema com banco de transformadores alimentando carga CSI



(b) Sistema com banco de transformadores alimentando carga VSI



Fonte: Autor

Os dados dos sistemas simulados são os seguintes:

Dados de cada transformador do banco:

- **Potência nominal:** 1kVA;
- **Frequência de operação:** 60Hz;

- **Impedância de curto-circuito equivalente:** $0,5 + j0,4 \times 10^{-3} \Omega$;
- **Tensão de linha nominal do primário:** 220V RMS;
- **Tensão de linha nominal do secundário:** 220V RMS;
- **Resistência de magnetização:** $1.0567 \times 10^{12} \Omega$;
- **Indutância de magnetização:** 19723 H;

Dados da carga CSI:

- Ponte retificadora trifásica completa à diodos;
- **Resistência da carga:** 30,5 Ω ;
- **Indutância da carga:** 500 mH;

Dados da carga VSI:

- Ponte retificadora trifásica completa à diodos;
- **Resistência da carga:** 30,5 Ω ;
- **Capacitância da carga:** 500 μF ;

4.1.1 Carga CSI

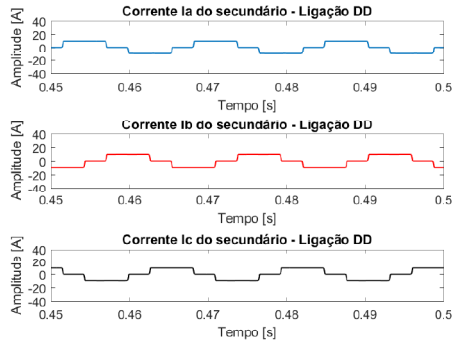
A seguir serão apresentadas algumas comparações dos resultados obtidos nas simulações com os bancos de transformadores conectados em Δ - Δ , Δ -Y, Y- Δ e Y-Y.

4.1.1.1 Correntes

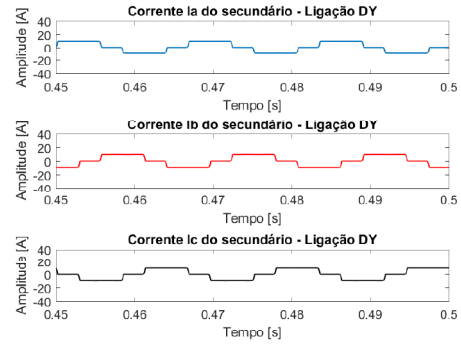
Nessa seção serão apresentados as comparações entre correntes medidas em cada modelo de ligação, bem como seus espectros harmônicos.

Figura 17 – Ondas das correntes de linha no secundário

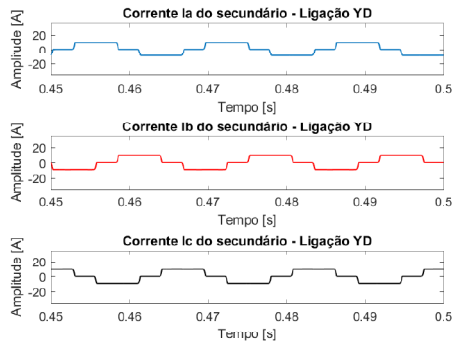
(a) Ligação Δ - Δ



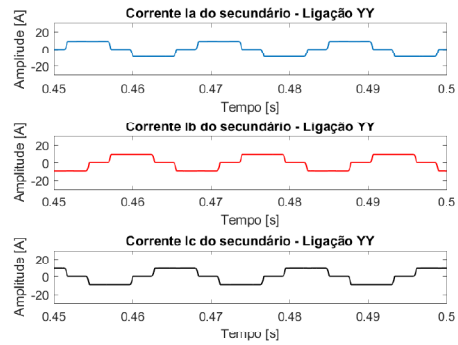
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

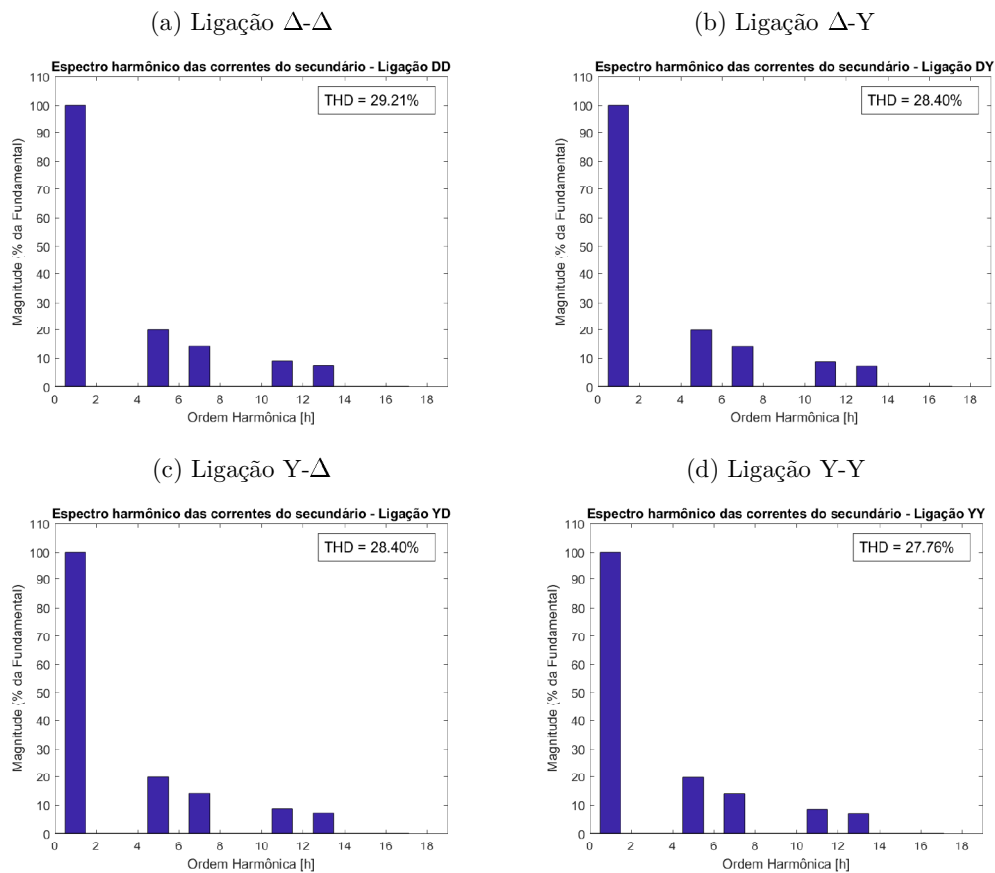


(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

Figura 18 – Espectro das correntes de linha no secundário



Fonte: Autor

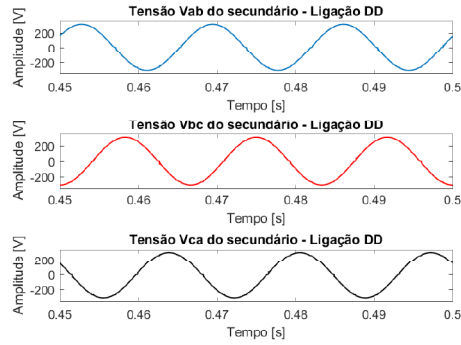
É possível observar uma ligeira diferença nos valores de THD_i dos casos analisados. Mesmo sendo uma diferença bem pequena, é um indicativo que alterações nos fechamentos dos transformadores modificam o comportamento do sistema, sendo o pior resultado para ligação Δ - Δ e o melhor resultado para ligação Y-Y.

4.1.1.2 Tensões

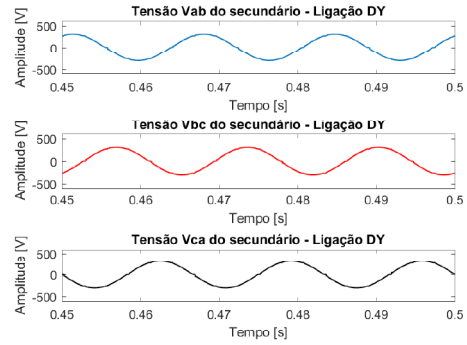
Nessa seção serão apresentados as comparações entre tensões fase/fase e fase/neutro medidas em cada modelo de ligação, bem como seus espectros harmônicos.

Figura 19 – Ondas das tensões fase/fase do secundário

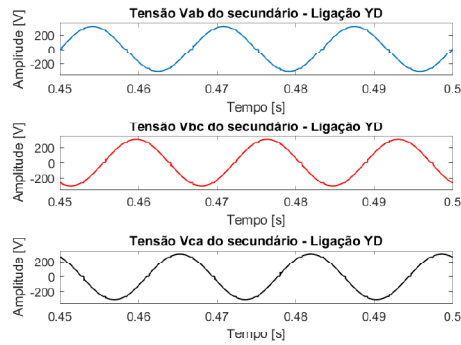
(a) Ligação Δ - Δ



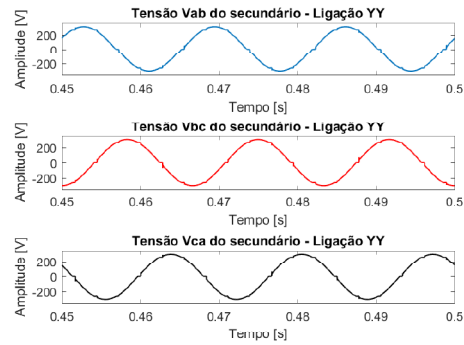
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

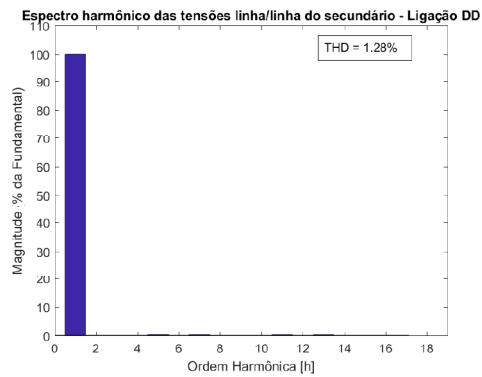
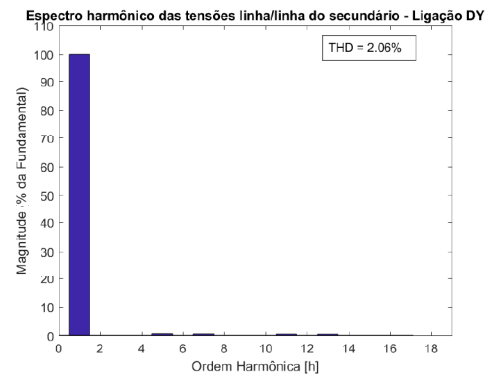
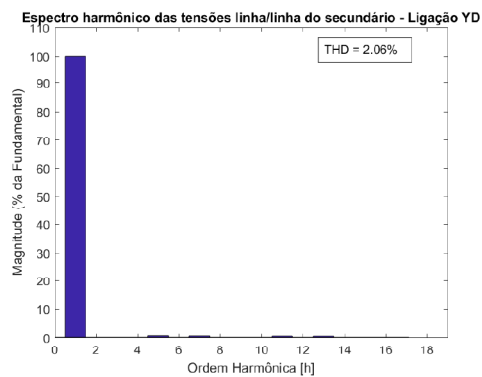


(d) Ligação Y-Y

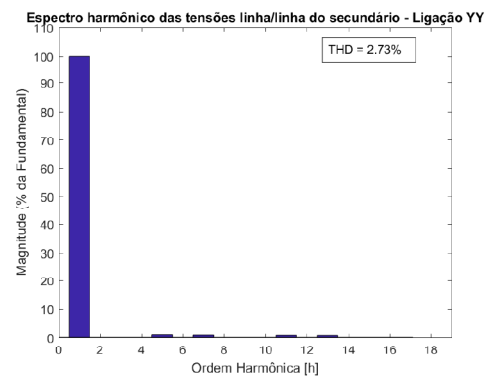


Fonte: Autor

Figura 20 – Espectro das tensões fase/fase do secundário

(a) Ligação Δ - Δ (b) Ligação Δ -Y(c) Ligação Y- Δ 

(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

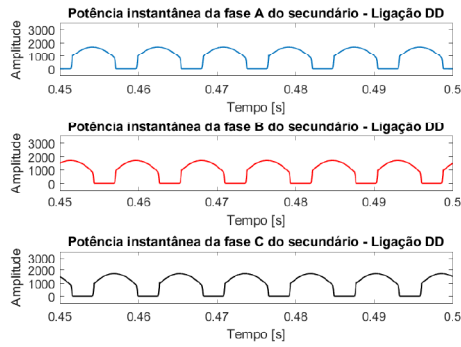
Os resultados de tensão seguem a mesma dinâmica apresentada pelas medições de corrente. Existe uma ligeira alteração nos índices de distorção para cada tipo de ligação, lembrando que as ondas de tensão do primário são ideais, devido à fonte ser ideal.

4.1.1.3 Potências

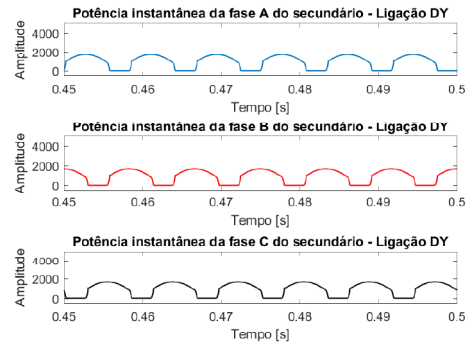
Nessa seção serão apresentados as comparações entre as potências dos sistemas.

Figura 21 – Potências Instantâneas do secundário

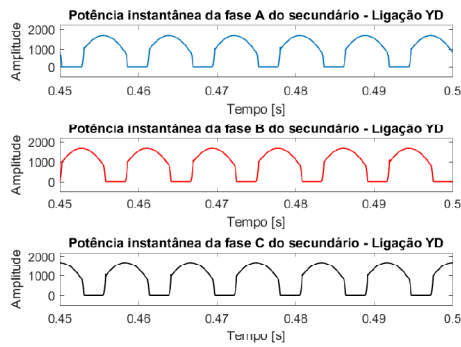
(a) Ligação Δ - Δ



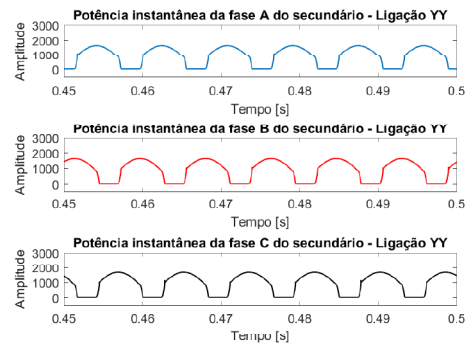
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

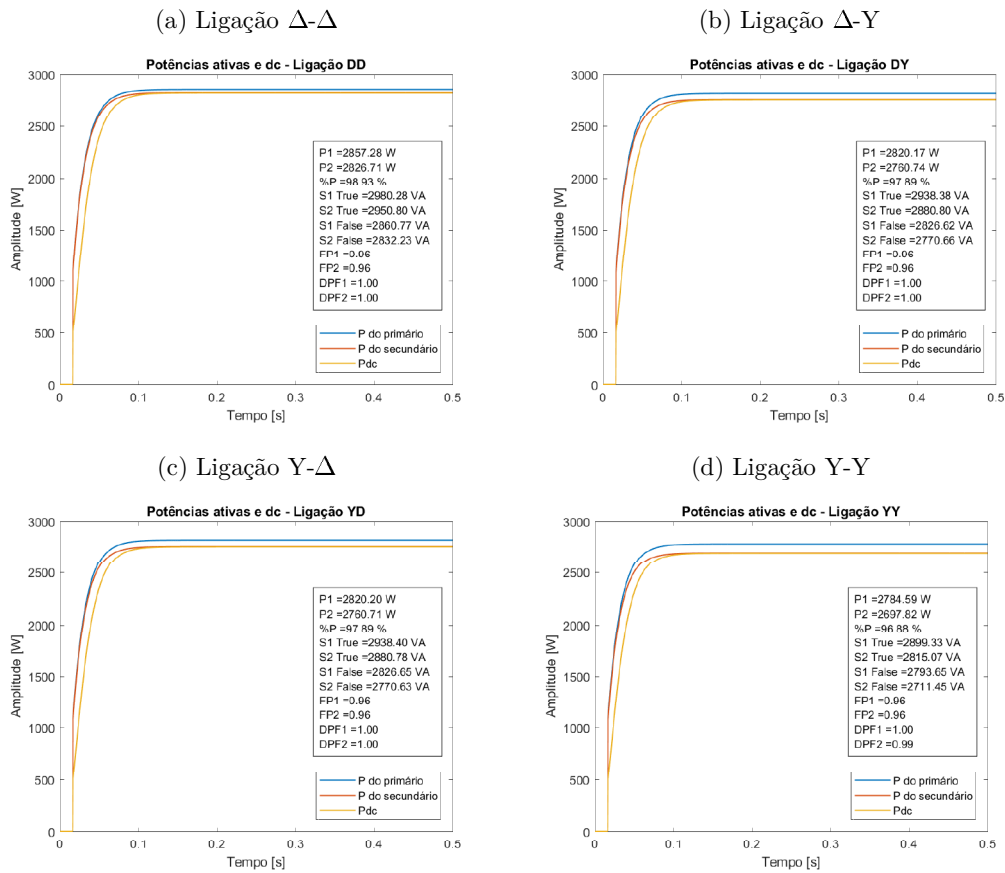


(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

Figura 22 – Potências Ativas



Fonte: Autor

As ondas de potências instantânea apresentam um pico em cada fase mais elevado que a potência nominal de cada transformador (1kVA).

Nota-se que para os modelos CSI, não fica tão evidente a influência dos fechamentos dos transformadores. De toda forma, é possível notar ligeiras diferenças nos valores de pico das potências instantâneas, sendo a ligação $\Delta-\Delta$ a que apresenta maior valor de pico.

4.1.1.4 Medições

A seguir são apresentadas as medições realizadas nas simulações.

Tabela 3 – Medições dos sistemas com carga CSI

Variável	$\Delta - \Delta$	$\Delta - Y$	$Y - \Delta$	$Y - Y$
$V1_{FF}$ [V]	220	220	220	220
$V1_{FFf_0}$ [V]	220	220	220	220
$I1_L$ [A]	7,8212	7,71	7,71	7,61
$I1_{Lf_0}$ [A]	7,5076	7,42	7,42	7,33
$V2_{FF}$ [V]	217,82	215,68	215,68	213,6
$V2_{FFf_0}$ [V]	217,8	215,64	215,64	213,53
$I2_L$ [A]	7,8212	7,71	7,71	7,61
$I2_{Lf_0}$ [A]	7,5076	7,42	7,42	7,33
$S1_{3\phi}$ [VA]	2980,28	2938,38	2938,38	2899,33
$S1_{3\phi f_0}$ [VA]	2860,77	2826,62	2826,62	2793,65
$P1_{3\phi}$ [W]	2857,28	2820,17	2820,17	2784,59
$S2_{3\phi}$ [VA]	2950,8	2880,8	2880,8	2815,07
$S2_{3\phi f_0}$ [VA]	2832,23	2770,66	2770,66	2711,45
$P2_{3\phi}$ [W]	2826,71	2760,74	2760,74	2697,82
$THD_{I_{L1}}$ [%]	29,21	28,4	28,4	27,76
$THD_{I_{L2}}$ [%]	29,21	28,4	28,4	27,76
$THD_{V_{FF1}}$ [%]	0	0	0	0
$THD_{V_{FF2}}$ [%]	1,28	2,06	2,06	2,73
$THD_{I_{F1}}$ [%]	29,21	28,4	28,4	27,76
$THD_{I_{F2}}$ [%]	29,21	28,4	28,4	27,76
$THD_{V_{FN1}}$ [%]	0	0	0	0
$THD_{V_{FN2}}$ [%]	1,28	2,06	2,06	2,73
Fator K	2,900	2,720	2,720	2,561
PF 1	0,96	0,96	0,96	0,96
PF 2	0,96	0,96	0,96	0,96
DPF 1	1	1	1	1
DPF 2	1	1	1	1

4.1.2 Carga VSI

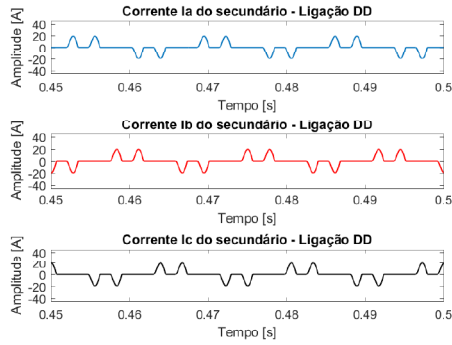
A seguir serão apresentadas algumas comparações dos resultados obtidos nas simulações com os bancos de transformadores conectados em Δ - Δ , Δ -Y, Y- Δ e Y-Y.

4.1.2.1 Correntes

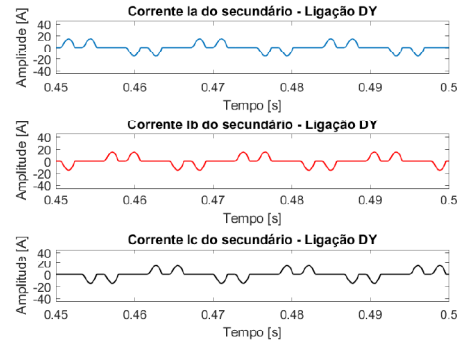
Nessa seção serão apresentados as comparações entre correntes medidas em cada modelo de conexão dos transformadores, bem como seus espectros harmônicos.

Figura 23 – Ondas das correntes de linha no secundário

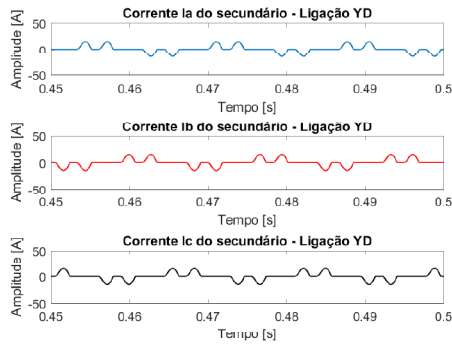
(a) Ligação Δ - Δ



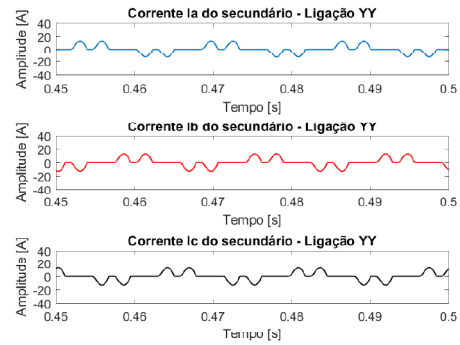
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

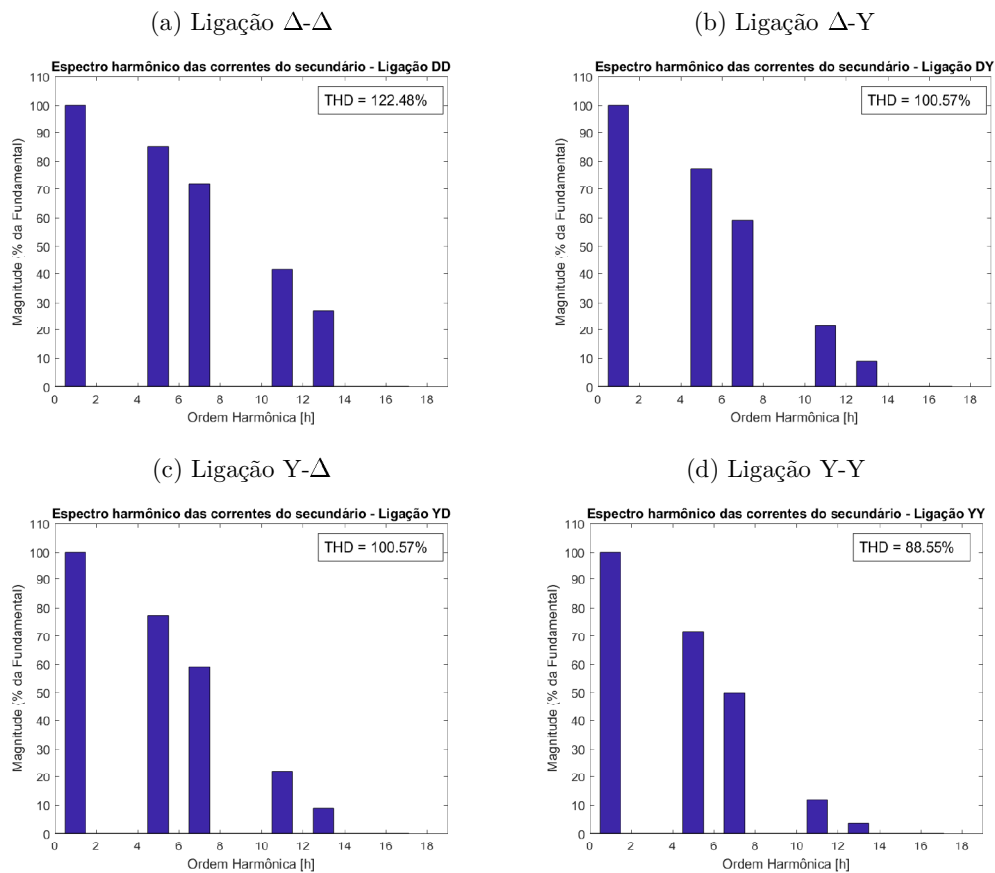


(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

Figura 24 – Espectro das correntes de linha no secundário



Fonte: Autor

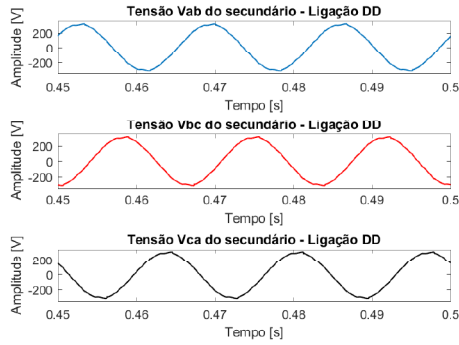
No caso das cargas VSI é possível observar uma diferença maior entre os espectros harmônicos das correntes bem como os valores de THD_i . Assim como no modelo CSI, a conexão Δ - Δ apresenta um resultado pior que os outros tipos de conexão e a ligação Y-Y apresenta um resultado um pouco melhor. Nota-se que no modelo Y-Y houve uma redução significativa dos harmônicos de 11^o e 13^o ordens, enquanto no modelo Δ - Δ acontece o contrário, essas componentes são mais elevadas.

4.1.2.2 Tensões

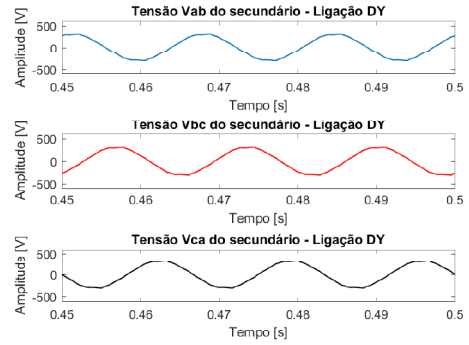
Nessa seção serão apresentados as comparações entre tensões fase/fase e fase/neutro medidas em cada modelo de ligação, bem como seus espectros harmônicos.

Figura 25 – Ondas das tensões fase/fase do secundário

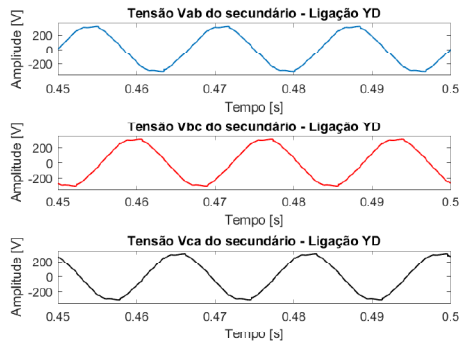
(a) Ligação Δ - Δ



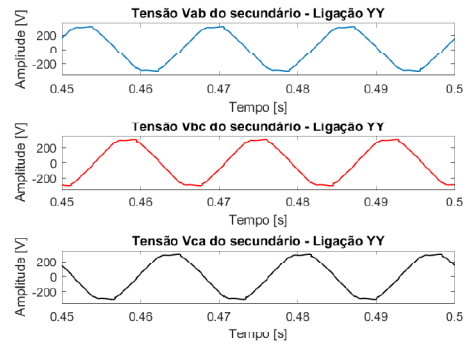
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

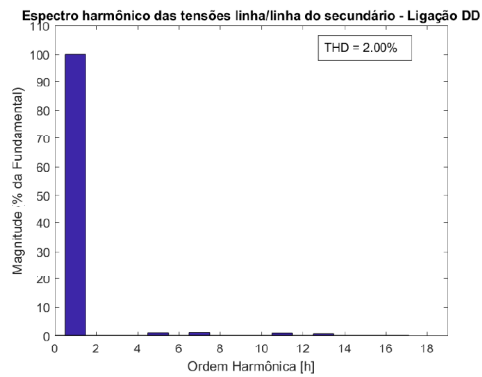
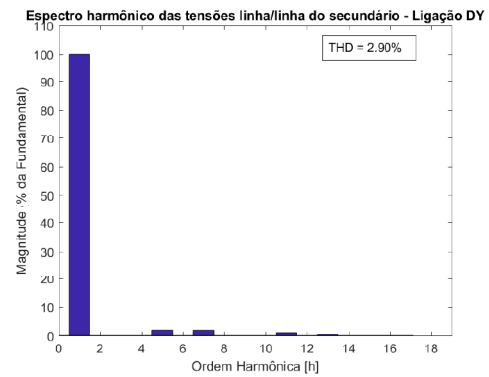
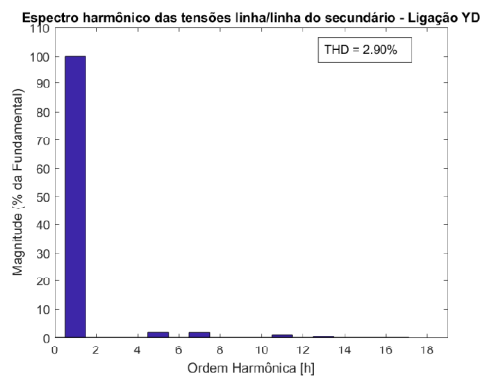


(d) Ligação Y-Y

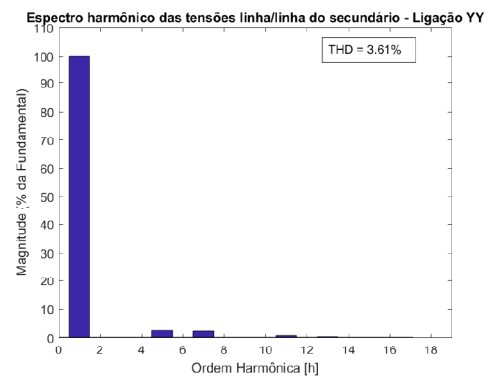


Fonte: Autor

Figura 26 – Espectro das tensões fase/fase do secundário

(a) Ligação Δ - Δ (b) Ligação Δ -Y(c) Ligação Y- Δ 

(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

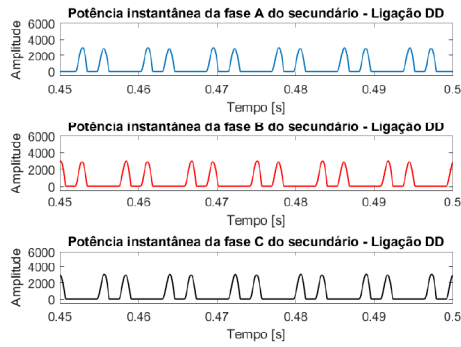
Nota-se que os níveis de distorção nas ondas de tensão são um pouco mais elevados nos modelos com carga VSI. De toda forma, os resultados obtidos ainda estão dentro da recomendação da IEEE 519 (IEEE-519, 2014), sendo o pior caso a conexão Y-Y e o melhor caso a conexão Δ - Δ .

4.1.2.3 Potências

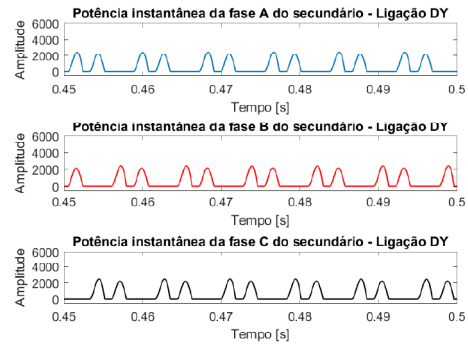
Nessa seção serão apresentados as comparações entre as potências dos sistemas.

Figura 27 – Potências Instantâneas do secundário

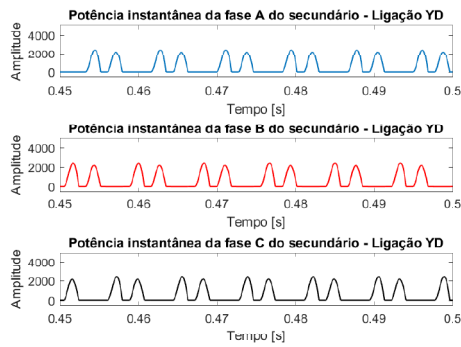
(a) Ligação Δ - Δ



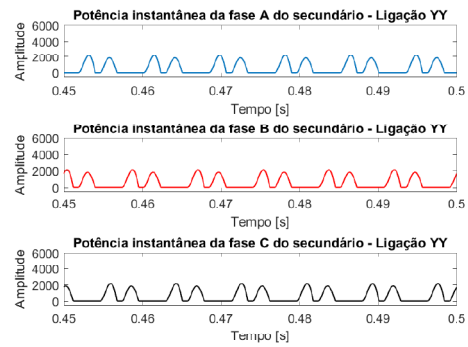
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

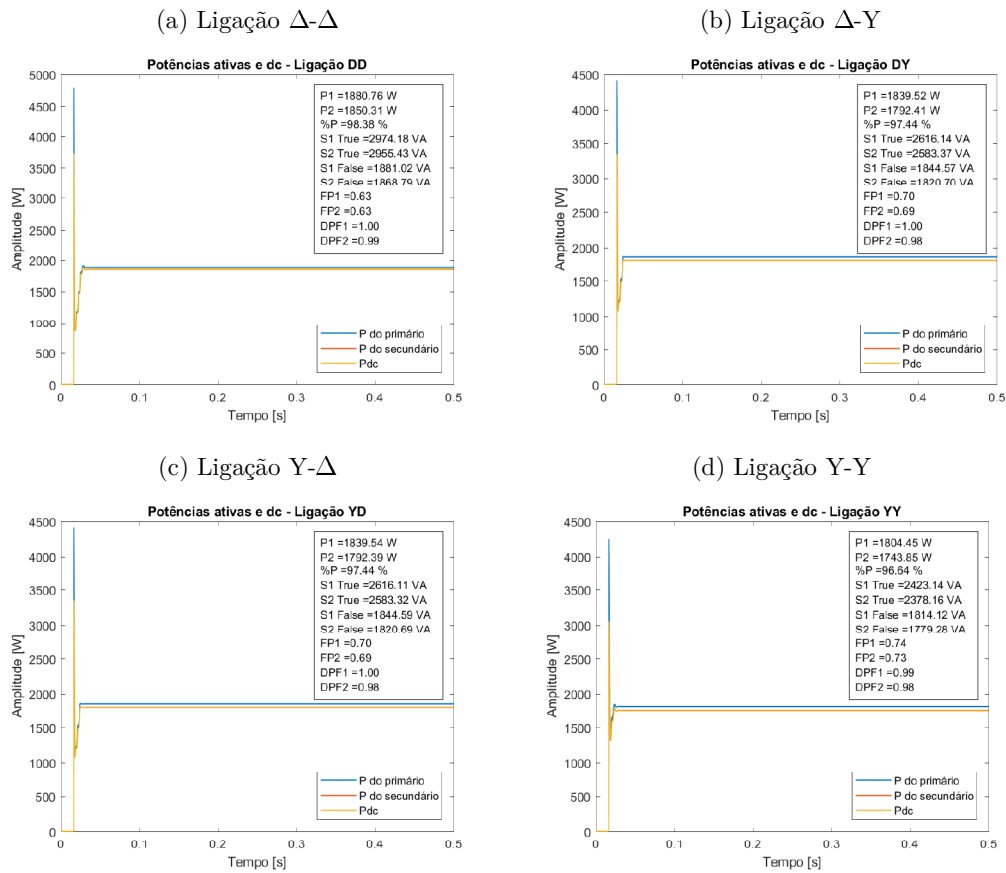


(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

Figura 28 – Potências Ativas



Para a carga VSI fica mais evidente o efeito da modificação das ligações dos transformadores. Os picos apresentados pelas potências instantâneas não maiores para ligação Δ - Δ e menores para ligação Y-Y. Além disso, o tempo de condução (abertura de cada onda) é maior no caso Y-Y e menor no Δ - Δ . Nota-se também que o fator de potência real é menor para o caso Δ - Δ em relação às outras ligações.

4.1.2.4 Medições

Tabela 4 – Medições dos sistemas com carga VSI

Variável	DD	DY	YD	YY
$V1_{FF}$ [V]	220	220	220	220
$V1_{FFf_0}$ [V]	220	220	220	220
$I1_L$ [A]	7,8051	6,8658	6,8658	6,3589
$I1_{Lf_0}$ [A]	4,9363	4,8409	4,8409	4,7607
$V2_{FF}$ [V]	218,61	217,24	217,24	215,91
$V2_{FFf_0}$ [V]	218,57	217,15	217,15	215,77
$I2_L$ [A]	7,8051	6,8658	6,8658	6,3589
$I2_{Lf_0}$ [A]	4,9363	4,8409	4,8409	4,7607
$S1_{3\phi}$ [VA]	2974,18	2616,14	2616,14	2423,14
$S1_{3\phi f_0}$ [VA]	1881,02	1844,57	1844,57	1814,12
$P1_{3\phi}$ [W]	1880,76	1839,52	1839,52	1804,45
$S2_{3\phi}$ [VA]	2955,43	2583,37	2583,37	2378,16
$S2_{3\phi f_0}$ [VA]	1868,79	1820,7	1820,7	1779,28
$P2_{3\phi}$ [W]	1850,31	1792,41	1792,41	1743,85
$THD_{I_{L1}}$ [%]	122,48	100,58	100,58	88,55
$THD_{I_{L2}}$ [%]	122,48	100,58	100,58	88,55
$THD_{V_{FF1}}$ [%]	0	0	0	0
$THD_{V_{FF2}}$ [%]	2	2,9	2,9	3,61
$THD_{I_{F1}}$ [%]	122,48	100,58	100,58	88,55
$THD_{I_{F2}}$ [%]	122,48	100,58	100,58	88,55
$THD_{V_{FN1}}$ [%]	0	0	0	0
$THD_{V_{FN2}}$ [%]	2	2,9	2,9	3,61
Fator K	6,8979	5,3536	5,3536	4,7595
PF 1	0,63	0,69	0,69	0,74
PF 2	0,63	0,69	0,69	0,74
DPF 1	1	1	1	0,99
DPF 2	1	1	1	0,99

4.1.3 Conclusões sobre a seção

Nesta seção foi apresentada a comparação entre o comportamento dos sistemas com diferentes tipos de ligação dos transformadores.

Foi possível observar que, modificando as ligações dos transformadores, existe alterações na composição de harmônicos nos sistemas, onde a ligação Δ - Δ apresentou o pior resultado para composição de harmônicos nas correntes, tanto para cargas CSI quanto para VSI, e a ligação Y-Y apresentou o melhor resultado. Porém, ligações Y-Y apresentam problemas em ambientes desequilibrados contendo componentes de sequência zero, e cargas não lineares, em geral, não necessitam de neutro (UMANS, 2014)(KOSOW, 1982)(PENG, 1998)(CHAPMAN, 2013). Assim, de acordo com

as simulações desse seção, as ligações mais interessantes para situações contendo cargas não lineares seriam as ligações Δ -Y e Y- Δ . Essas ligações tem a vantagem de conter um Δ em sua composição, eliminando assim os problemas relacionados à desequilíbrios presentes nas ligações Y-Y. Como dito, caso exista apenas cargas não lineares no sistema, estas não precisarão de neutro, sendo a ligação Y- Δ uma boa opção (PENG, 1998)(CHAPMAN, 2013).

De toda forma, a modificação das ligações não tem uma influência grande na composição harmônica no sistema, deixando os transformadores suscetíveis aos problemas gerados pela presença desses harmônicos. Ou seja, apenas modificar as ligações dos transformadores não resolve os problemas, necessitando de outras manipulações no sistema.

4.2 Influência dos tipos de núcleo dos transformadores nos sistemas com presença de harmônicos

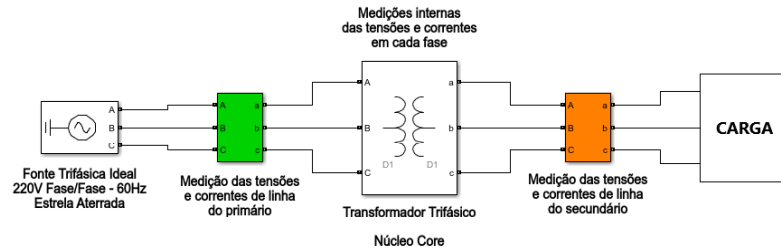
Esta seção apresentará comparações entre três sistemas diferentes. O primeiro é composto por um banco trifásico, o segundo é composto por um transformador trifásico com núcleo tipo Core e por fim, o terceiro sistema composto por um transformador tipo Shell.

Serão apresentadas comparações entre dois tipos de fechamento dos transformadores, sendo eles $\Delta - \Delta$ e Y- Δ .

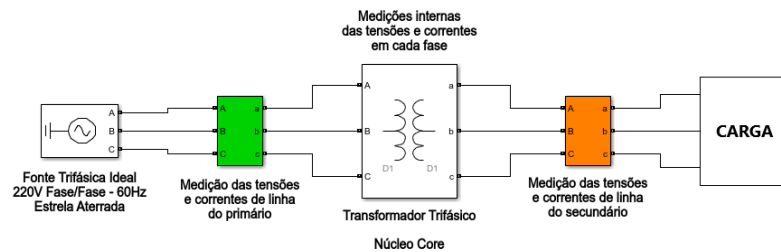
A Figura 29 traz a representação dos circuitos simulados.

Figura 29 – Representação dos sistemas simulados para análise da influência dos núcleos dos transformadores

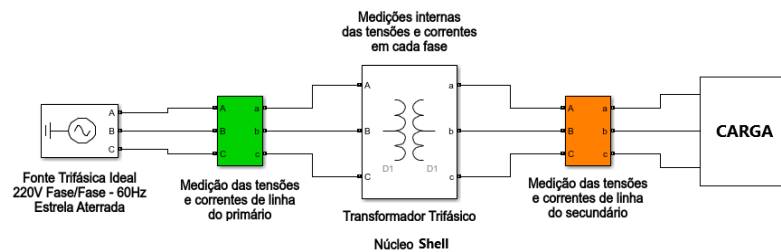
(a) Sistema com banco de transformadores



(b) Sistema com transformador trifásico com núcleo Core



(c) Sistema com transformador trifásico com núcleo Shell



Fonte: Autor

Os transformadores possuem as seguintes características:

- Potência nominal do sistema: 3kVA;
- Frequência de operação: 60Hz;
- Impedância de curto-circuito equivalente: $0,5 + j0,4 \times 10^{-3} \Omega$;
- Tensão de linha nominal do primário: 220V RMS;
- Tensão de linha nominal do secundário: 220V RMS;
- Resistência de magnetização: $1.0567 \times 10^{12} \Omega$;

- **Indutância de magnetização:** 19723 H;

As cargas CSI e VSI possuem os mesmos valores descritos anteriormente na comparação entre os fechamentos dos transformadores.

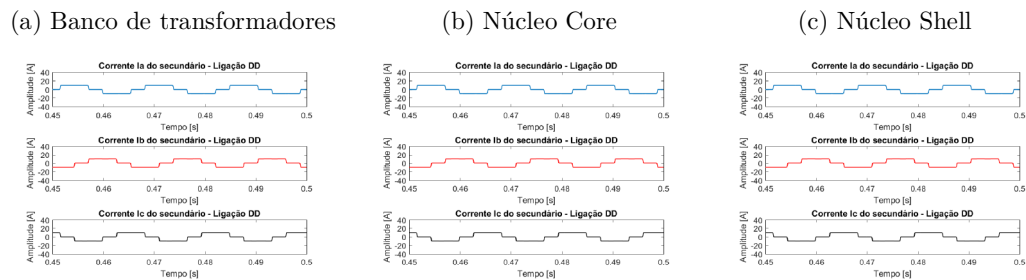
4.2.1 Carga CSI

A seguir serão apresentados os resultados das simulações para carga CSI.

4.2.1.1 Ligação Δ - Δ

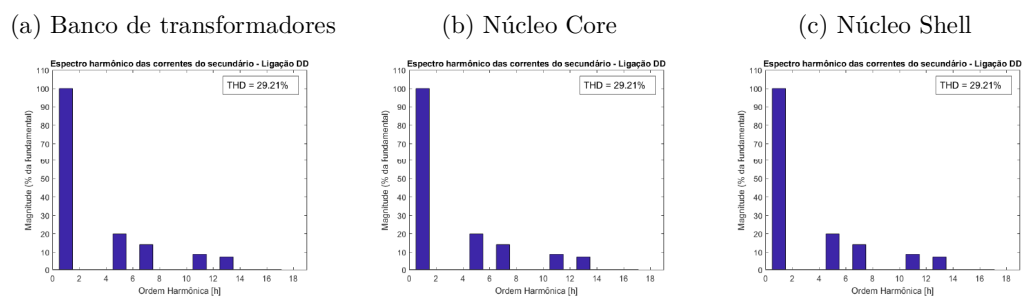
4.2.1.2 Correntes

Figura 30 – Correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

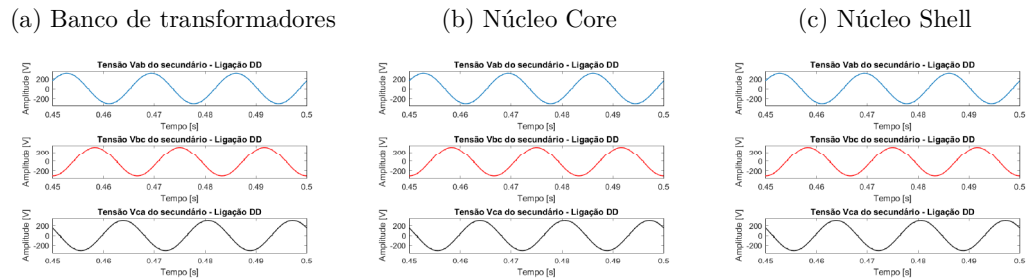
Figura 31 – Espectro das correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

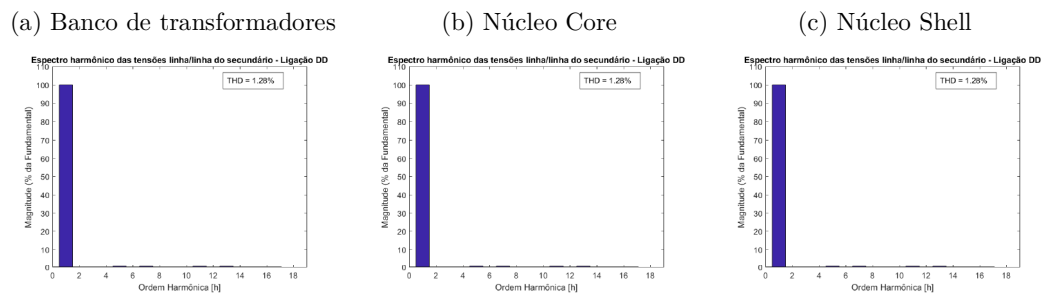
4.2.1.3 Tensões

Figura 32 – Tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

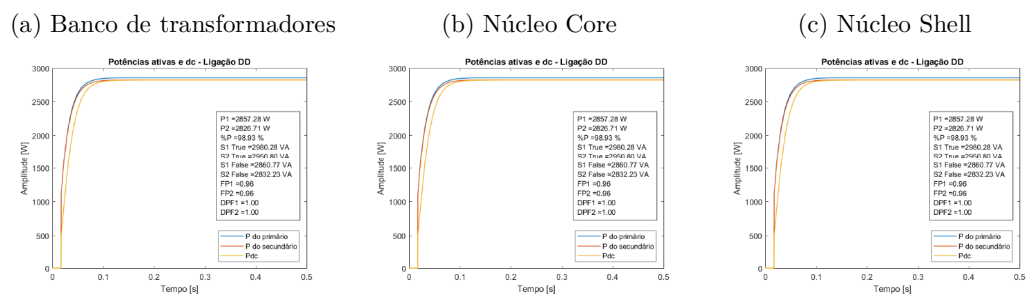
Figura 33 – Espectro das tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

4.2.1.4 Potências

Figura 34 – Potências ativas e medições

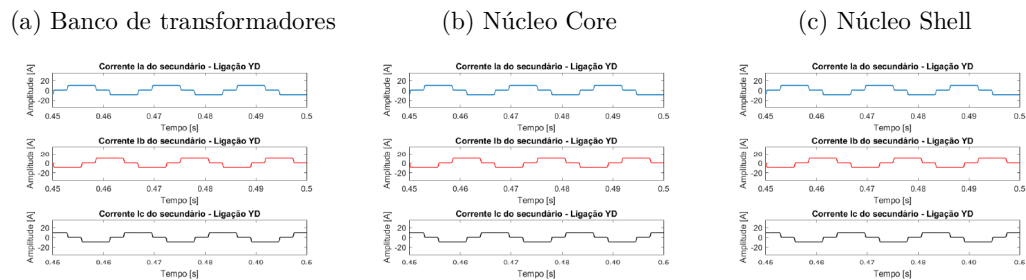


Fonte: Autor

4.2.1.5 Ligação Y- Δ

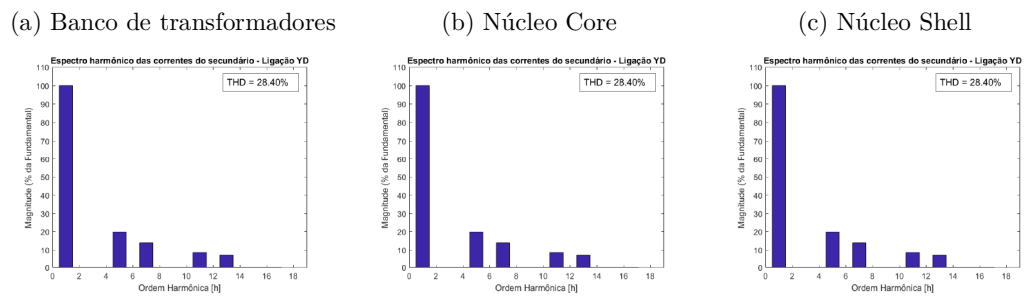
4.2.1.6 Correntes

Figura 35 – Correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

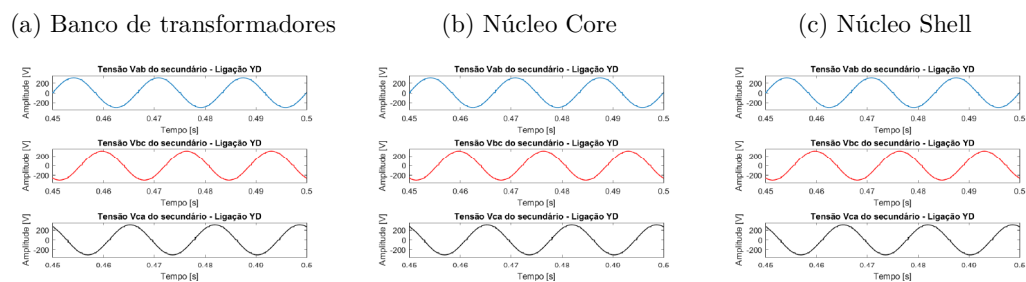
Figura 36 – Espectro das correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

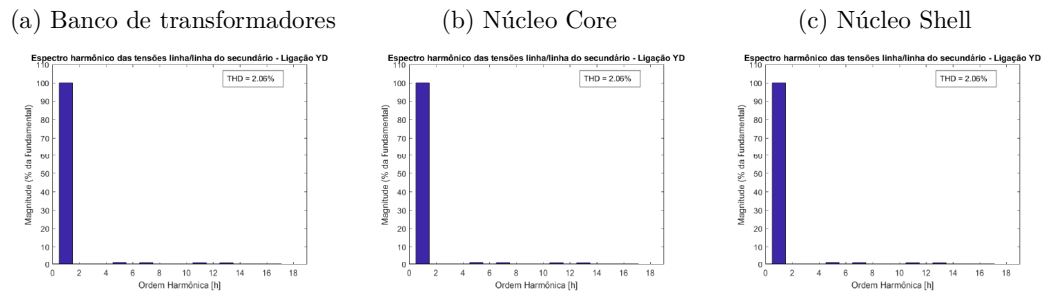
4.2.1.7 Tensões

Figura 37 – Tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

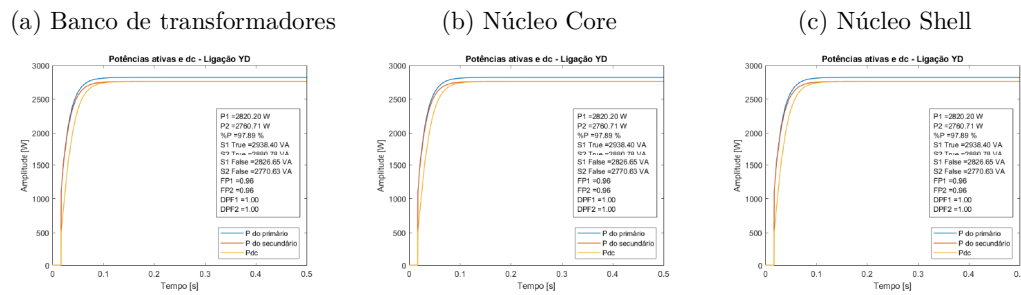
Figura 38 – Espectro das tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

4.2.1.8 Potências

Figura 39 – Potências ativas e medições



Fonte: Autor

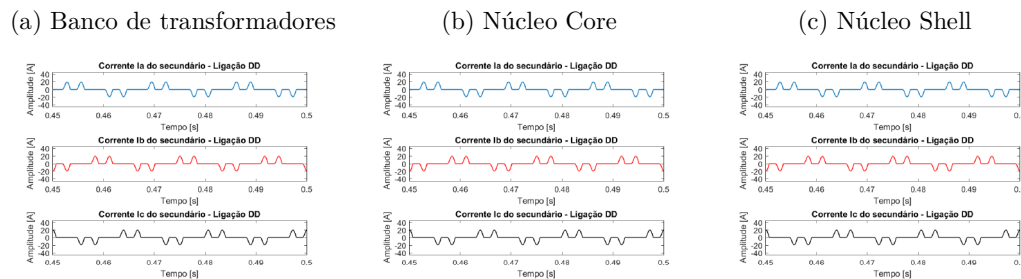
4.2.2 Carga VSI

A seguir serão apresentados os resultados das simulações para carga VSI.

4.2.2.1 Ligação Δ - Δ

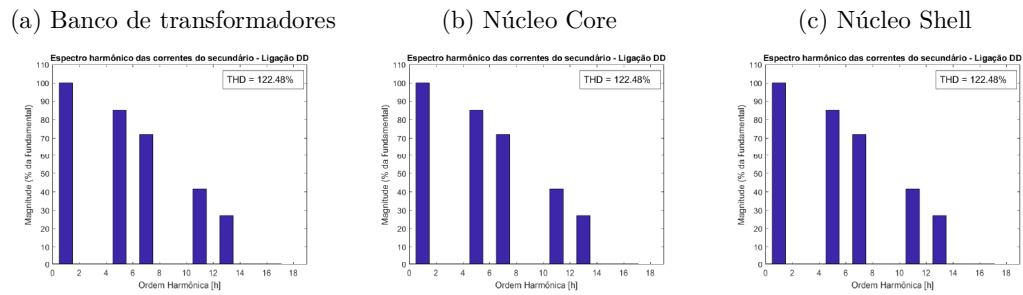
4.2.2.2 Correntes

Figura 40 – Correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

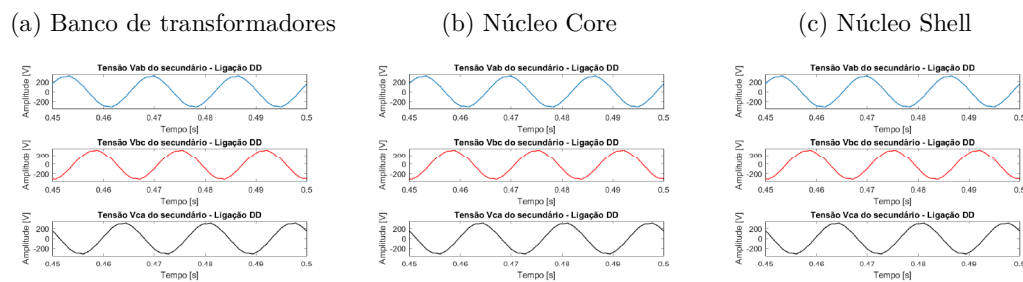
Figura 41 – Espectro das correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

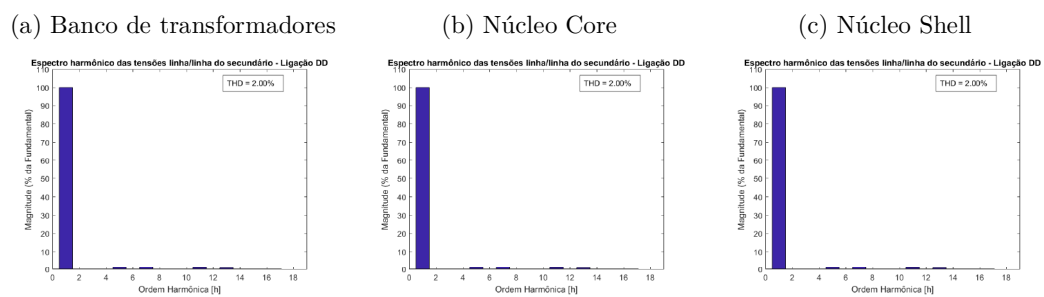
4.2.2.3 Tensões

Figura 42 – Tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

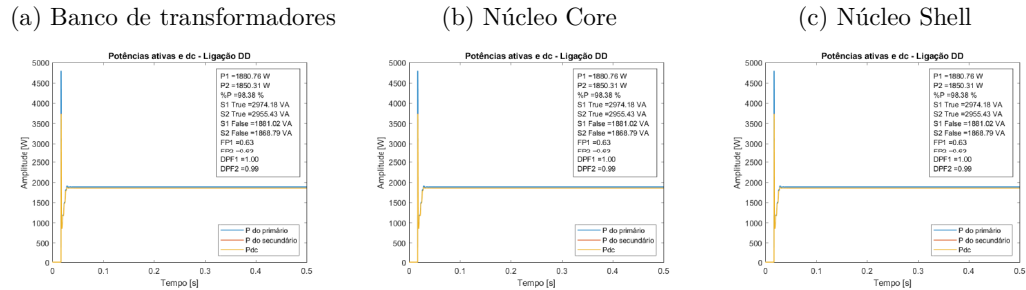
Figura 43 – Espectro das tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

4.2.2.4 Potências

Figura 44 – Potências ativas e medições

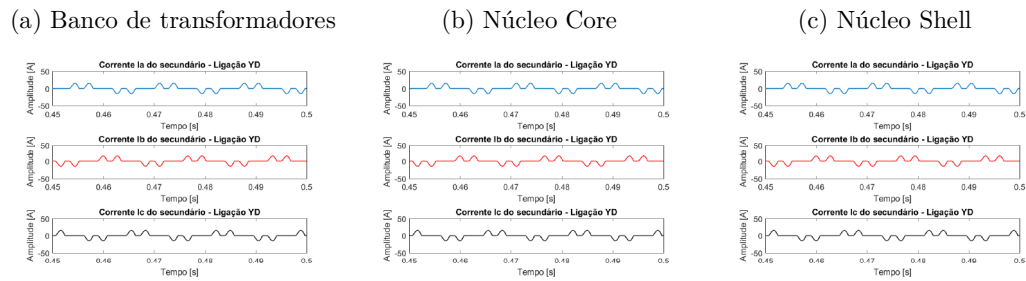


Fonte: Autor

4.2.2.5 Ligação Y- Δ

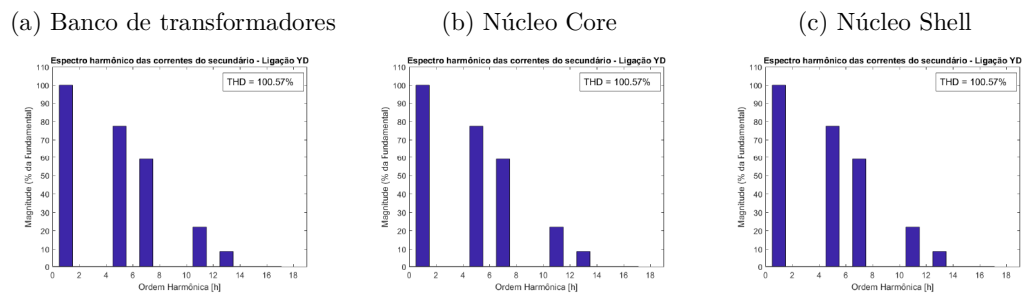
4.2.2.6 Correntes

Figura 45 – Correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

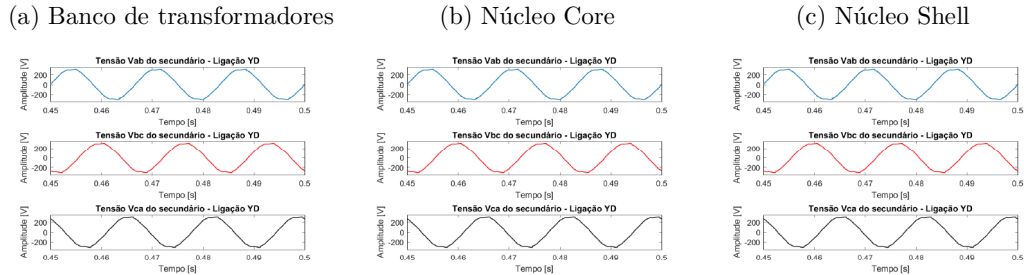
Figura 46 – Espectro das correntes de linha do secundário



Fonte: Autor

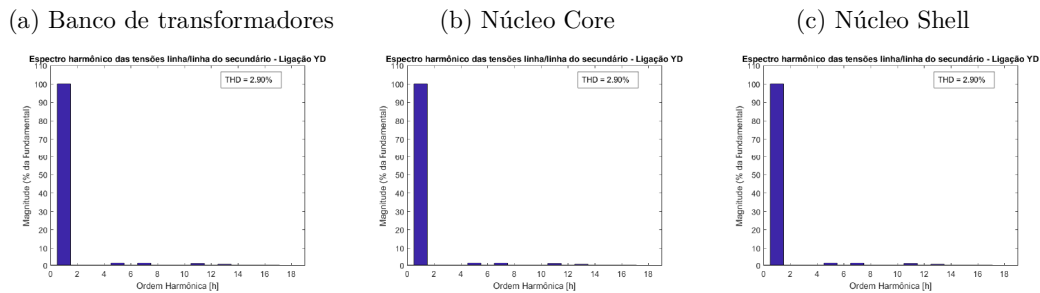
4.2.2.7 Tensões

Figura 47 – Tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

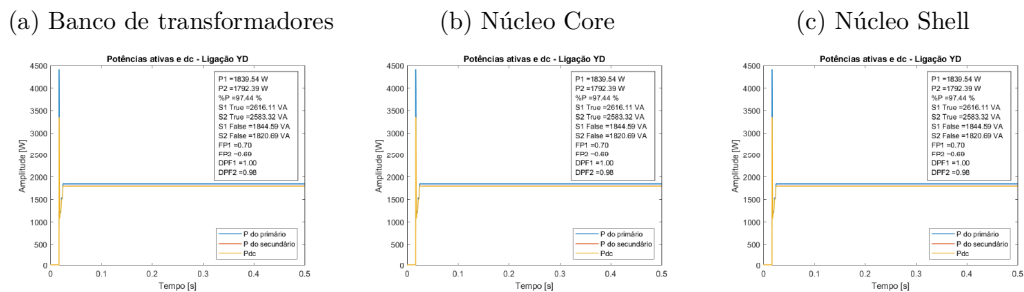
Figura 48 – Espectro das tensões de linha do secundário



Fonte: Autor

4.2.2.8 Potências

Figura 49 – Potências ativas e medições



Fonte: Autor

4.2.3 Conclusões sobre a seção

Foi possível observar nessa seção que a modificação do tipo de núcleo, mantendo-se as mesmas características em cada um, não tem um efeito significativo no comportamento do sistema em geral.

A opção de mudança de núcleo seria mais viável caso se tenha sistemas com desequilíbrios. Porém, para sistemas distorcidos apenas, essa opção não se mostrou eficiente.

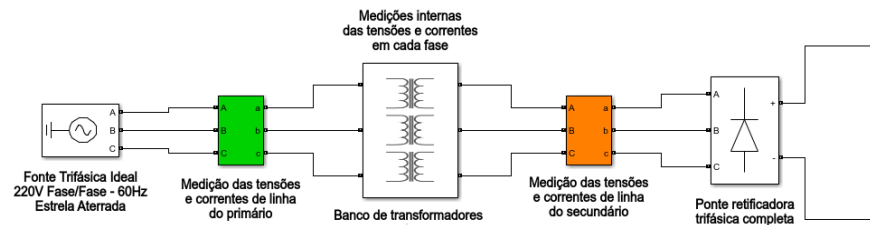
4.3 Efeito da impedância de curto-circuito dos transformadores nos sistemas com presença de harmônicos

Esta seção apresentará o efeito da modificação da impedância de curto circuito dos transformadores nos sistemas distorcidos. Para isso, utilizou-se os mesmo bancos de transformadores das simulações anteriores, com a parte indutiva da impedância de curto circuito aumentada em 10 vezes.

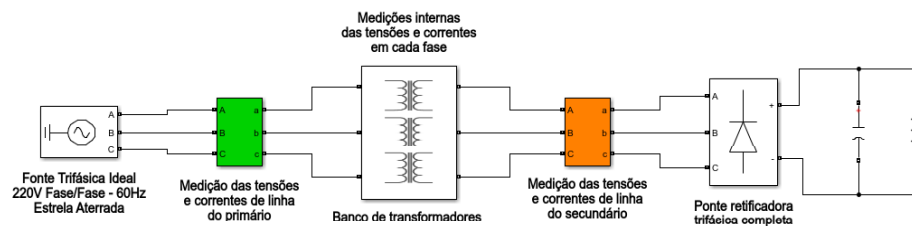
A Figura 50 traz o modelo dos circuitos simulados.

Figura 50 – Representação dos sistemas simulados para análise da influência da impedância de curto-circuito dos transformadores

(a) Sistema com banco de transformadores alimentando carga CSI



(b) Sistema com banco de transformadores alimentando carga VSI



Fonte: Autor

As cargas CSI e VSI são as mesmas das simulações anteriores.

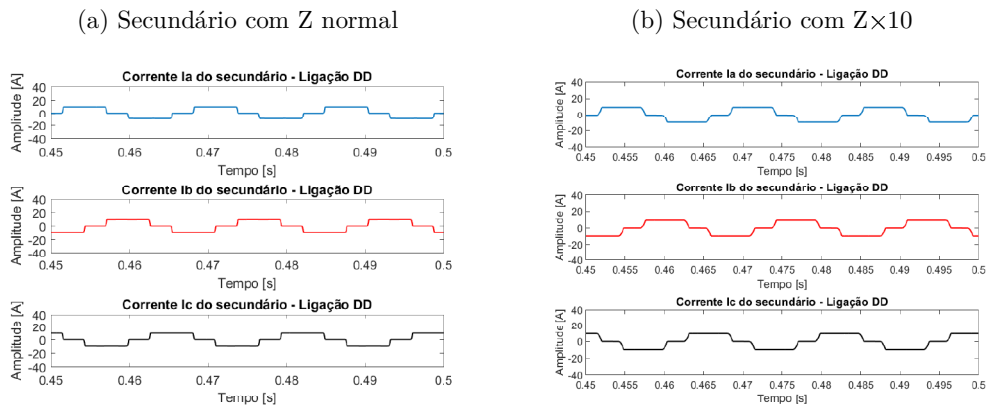
4.3.1 Carga CSI

A seguir serão apresentados os resultados para carga CSI.

4.3.1.1 Ligação Δ - Δ

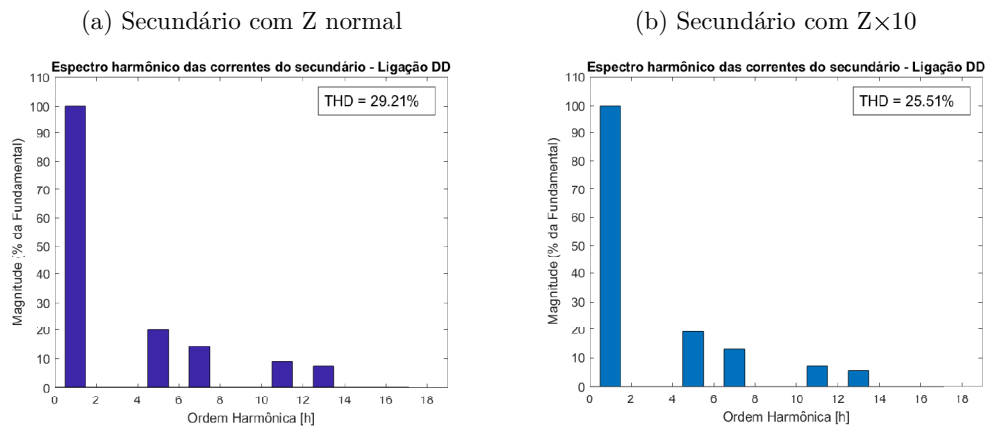
4.3.1.1.1 Correntes

Figura 51 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

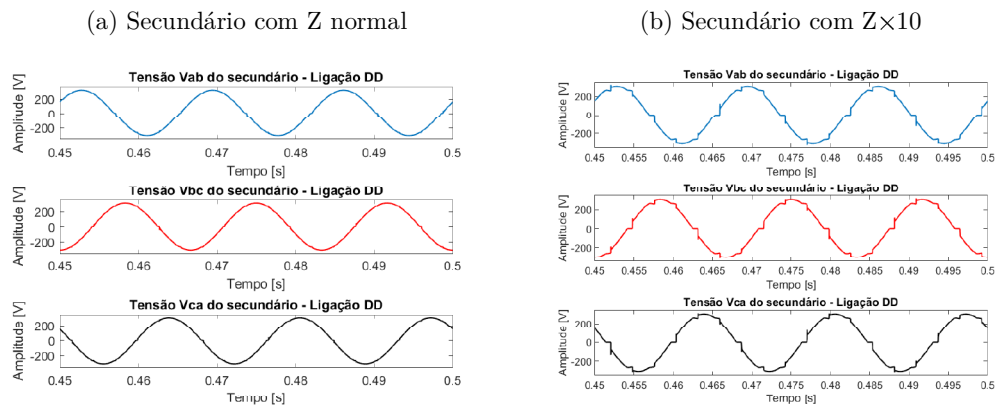
Figura 52 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

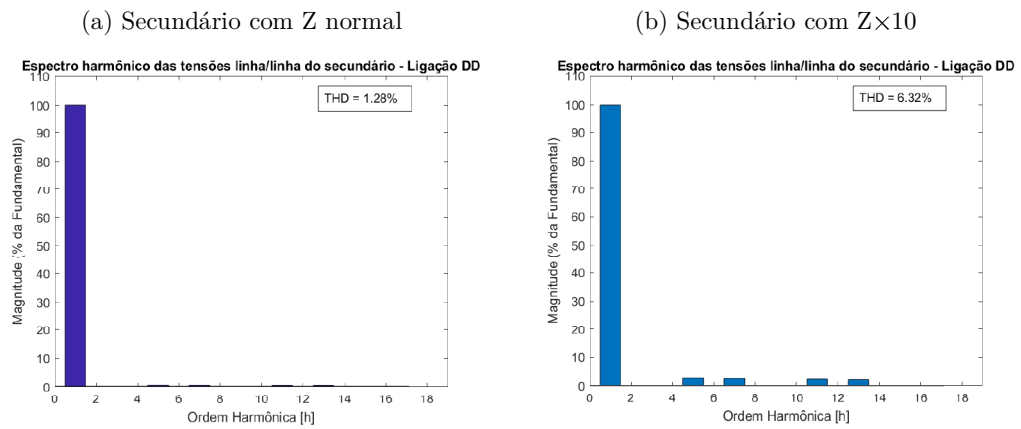
4.3.1.1.2 Tensões

Figura 53 – Ondas das tensões de linha



Fonte: Autor

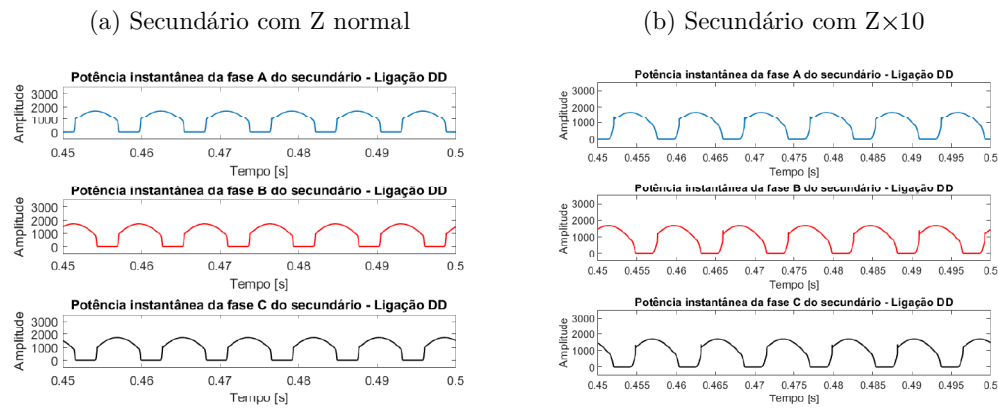
Figura 54 – Espectros harmônicos das tensões de linha



Fonte: Autor

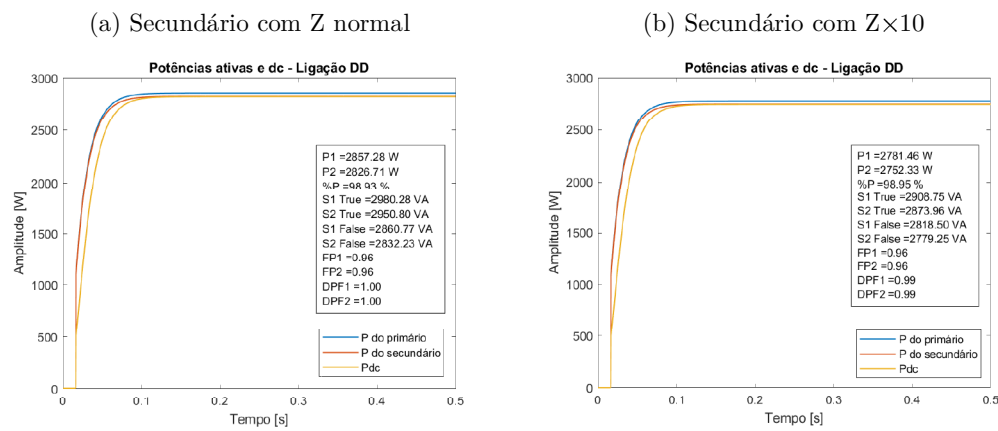
4.3.1.1.3 Potências

Figura 55 – Potências instantâneas



Fonte: Autor

Figura 56 – Potências ativas

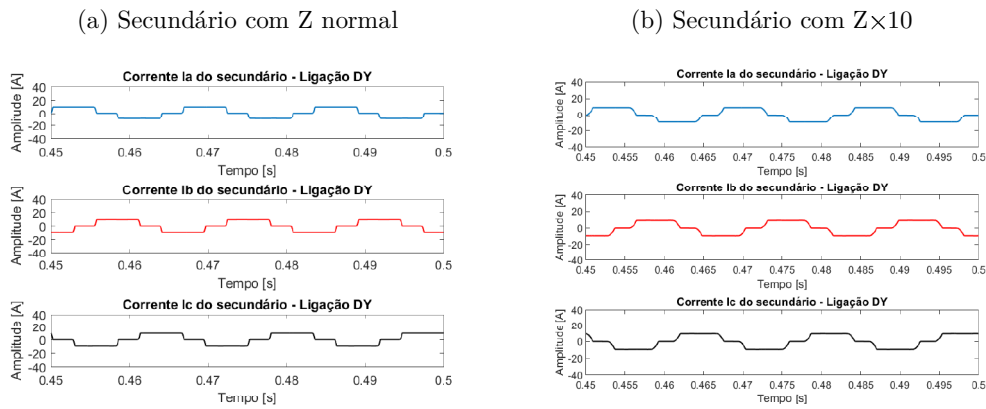


Fonte: Autor

4.3.1.2 Ligação Δ -Y

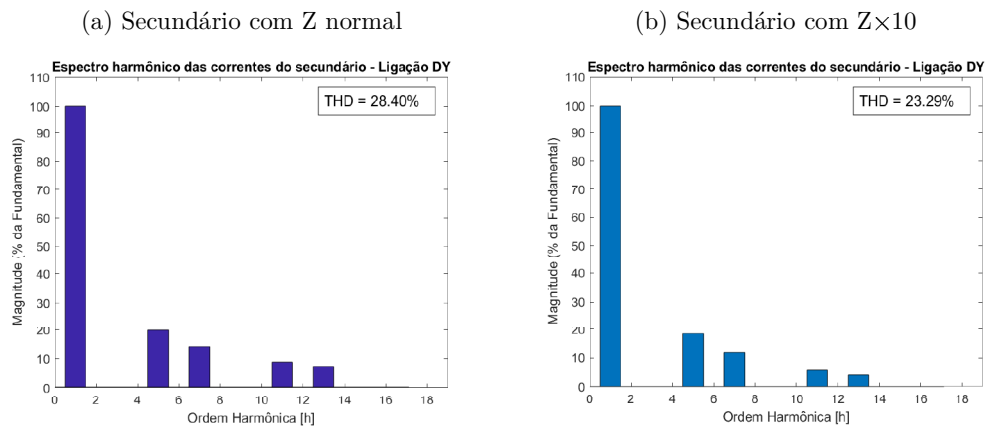
4.3.1.2.1 Correntes

Figura 57 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

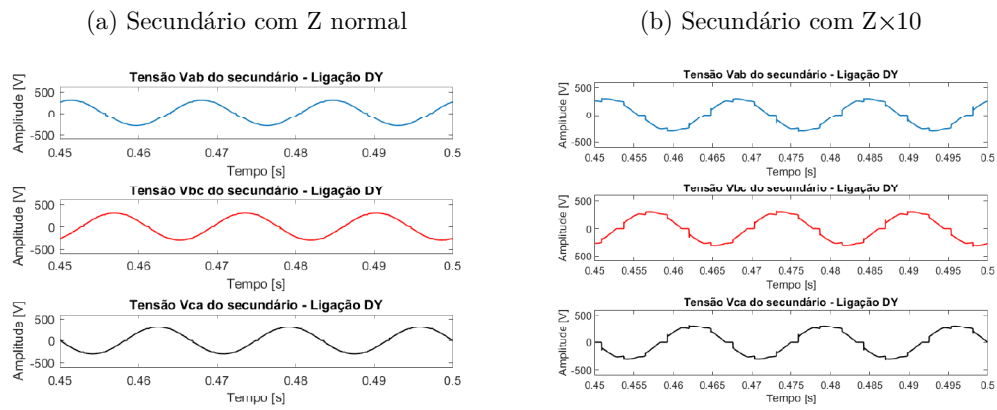
Figura 58 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

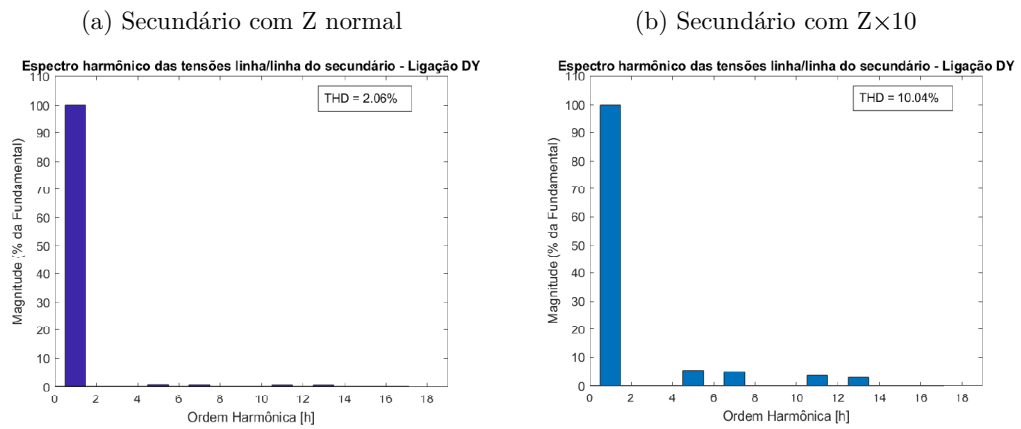
4.3.1.2.2 Tensões

Figura 59 – Ondas das tensões de linha



Fonte: Autor

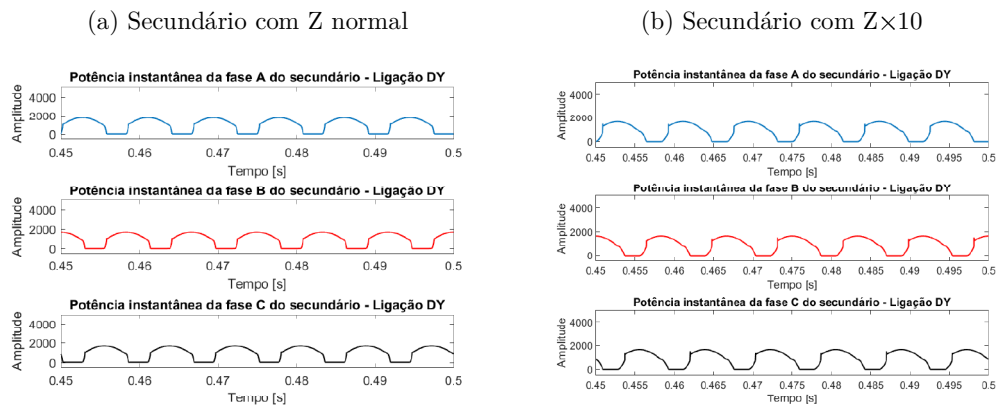
Figura 60 – Espectros harmônicos das tensões de linha



Fonte: Autor

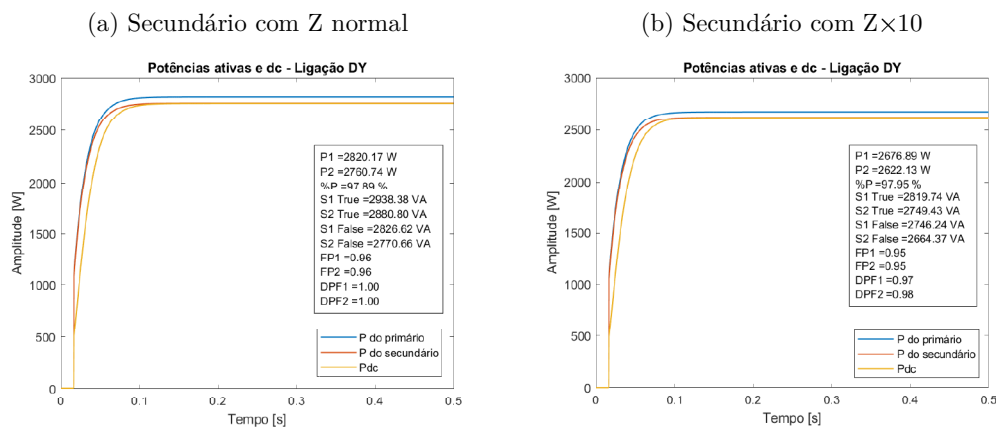
4.3.1.2.3 Potências

Figura 61 – Potências instantâneas



Fonte: Autor

Figura 62 – Potências ativas

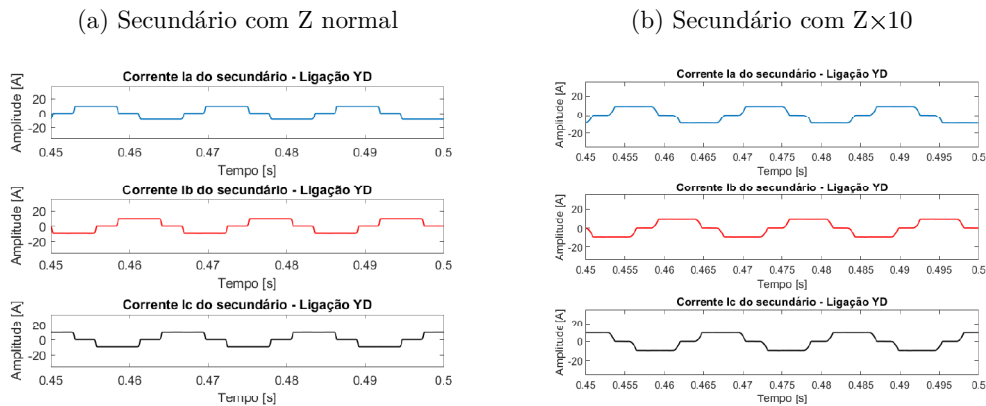


Fonte: Autor

4.3.1.3 Ligação Y- Δ

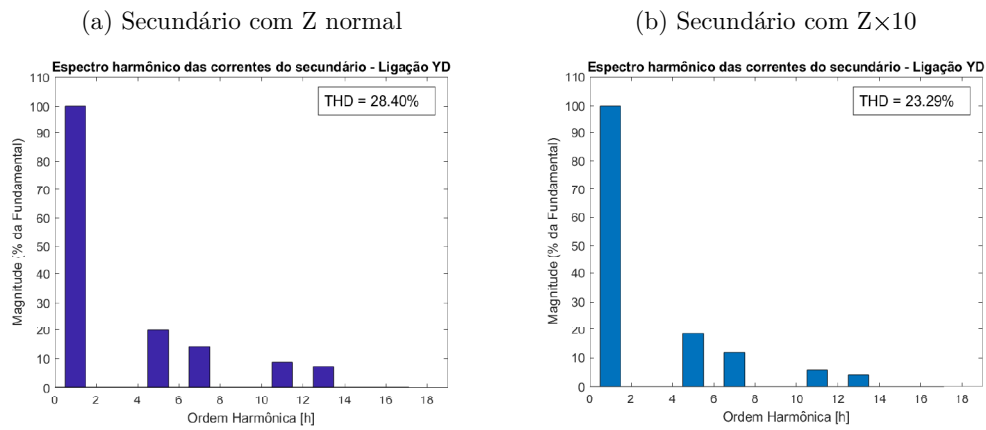
4.3.1.3.1 Correntes

Figura 63 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

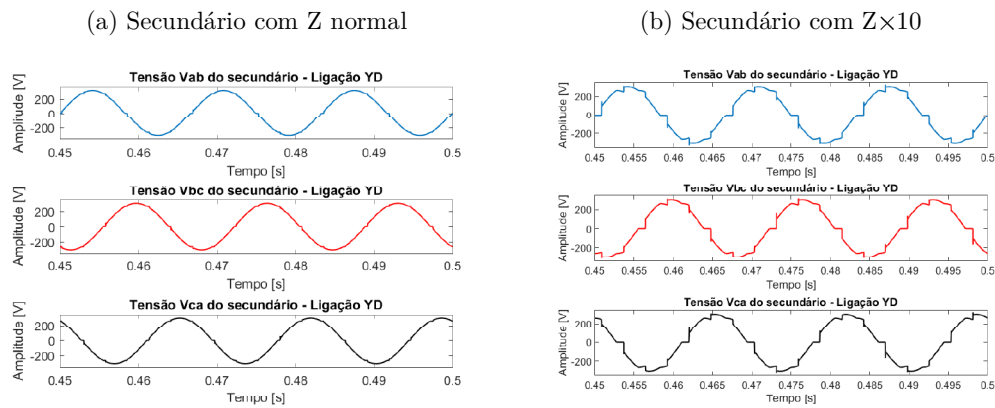
Figura 64 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

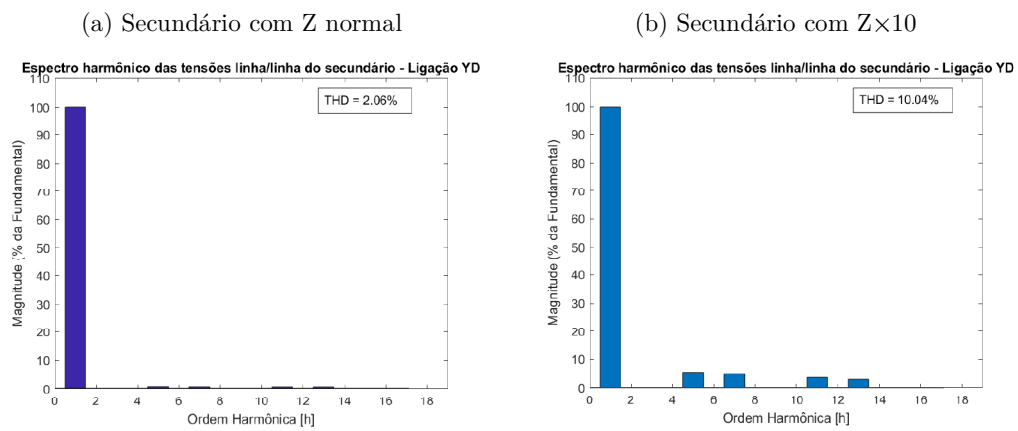
4.3.1.3.2 Tensões

Figura 65 – Ondas das tensões de linha



Fonte: Autor

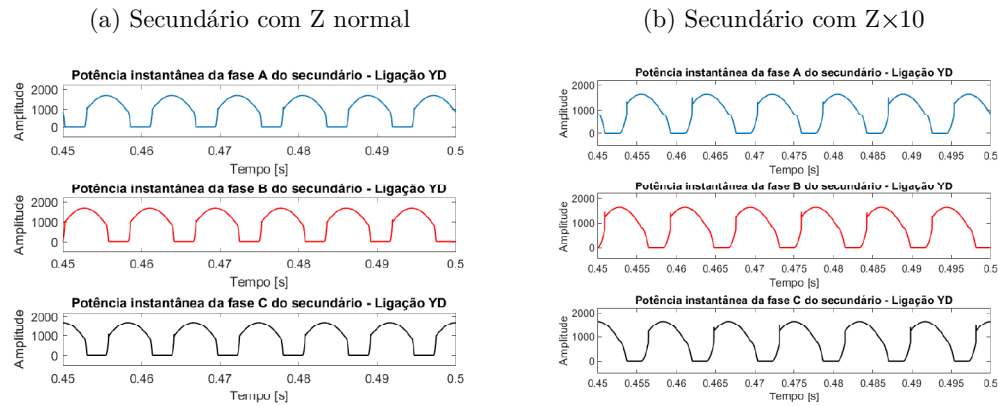
Figura 66 – Espectros harmônicos das tensões de linha



Fonte: Autor

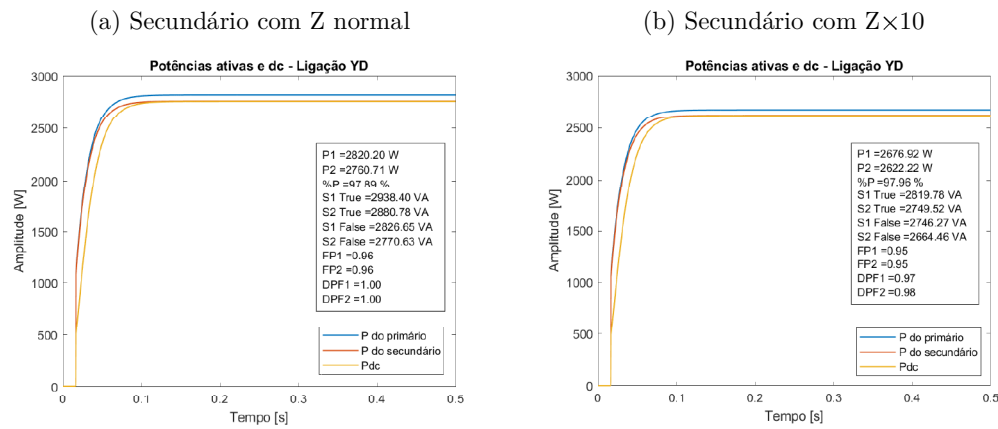
4.3.1.3.3 Potências

Figura 67 – Potências instantâneas



Fonte: Autor

Figura 68 – Potências ativas

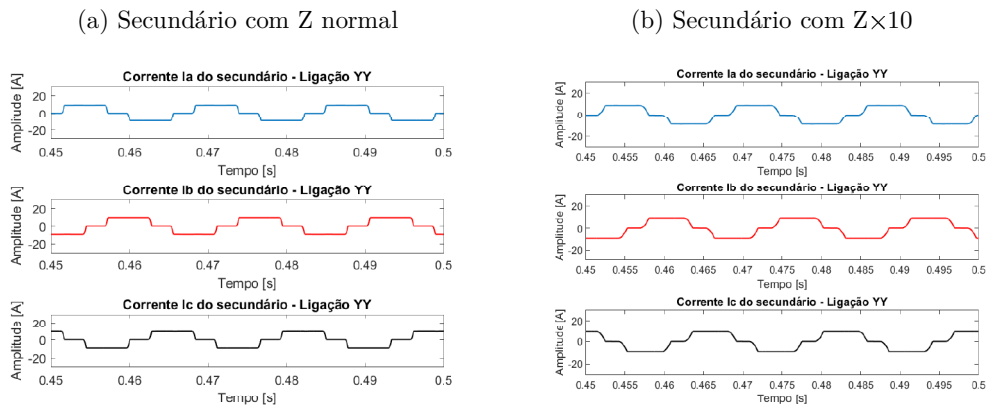


Fonte: Autor

4.3.1.4 Ligação Y-Y

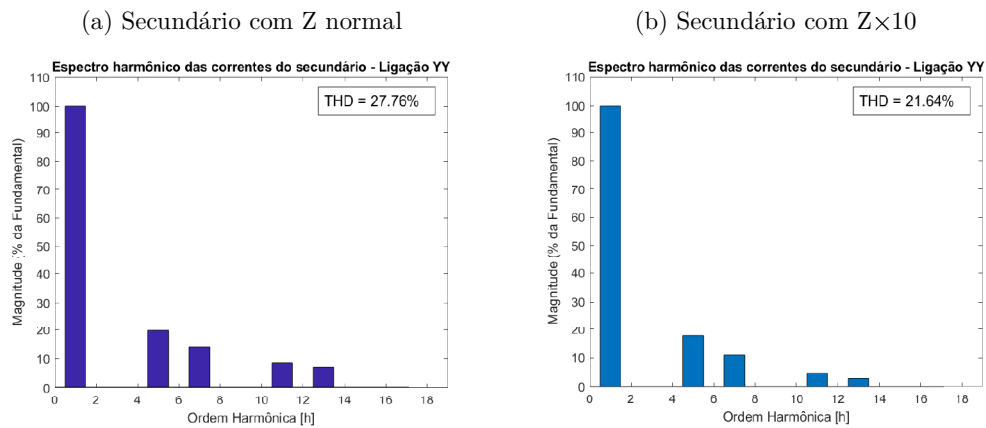
4.3.1.4.1 Correntes

Figura 69 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

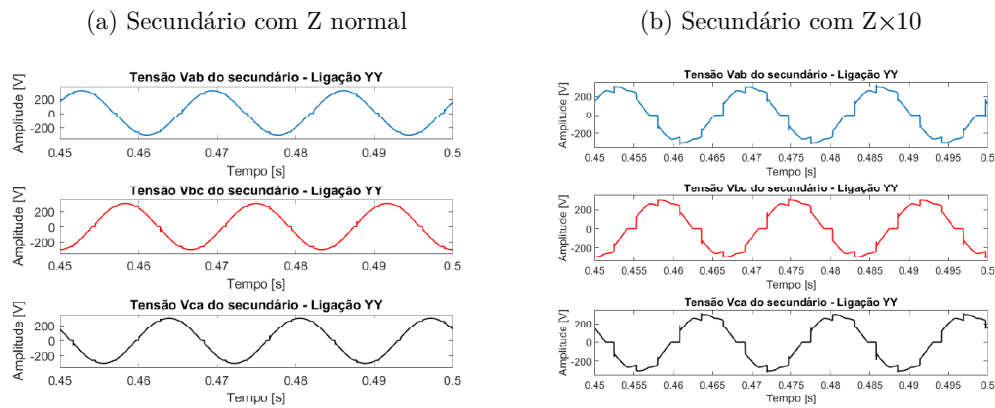
Figura 70 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

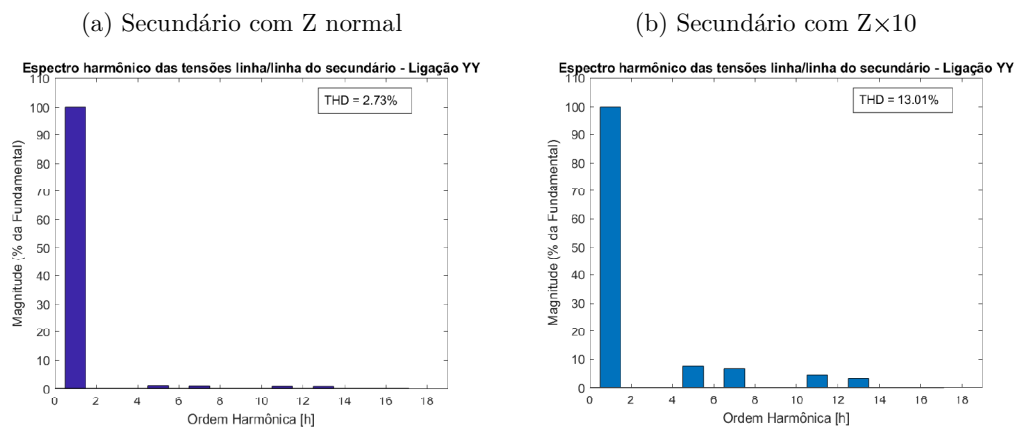
4.3.1.4.2 Tensões

Figura 71 – Ondas das tensões de linha



Fonte: Autor

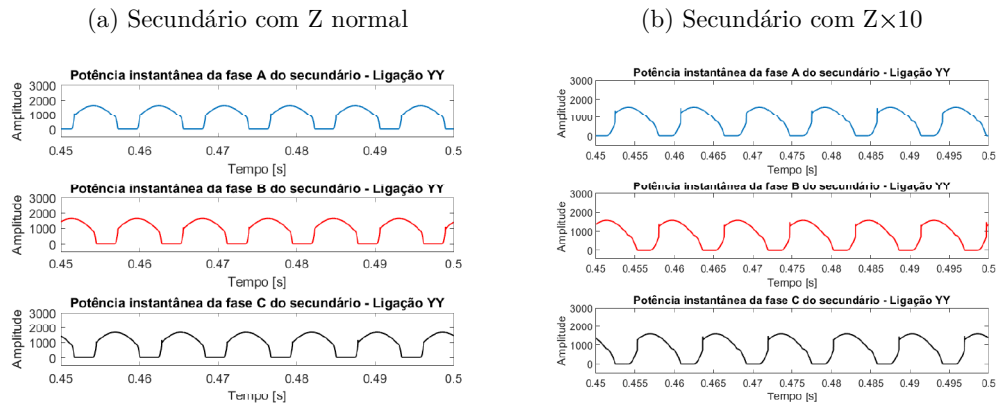
Figura 72 – Espectros harmônicos das tensões de linha



Fonte: Autor

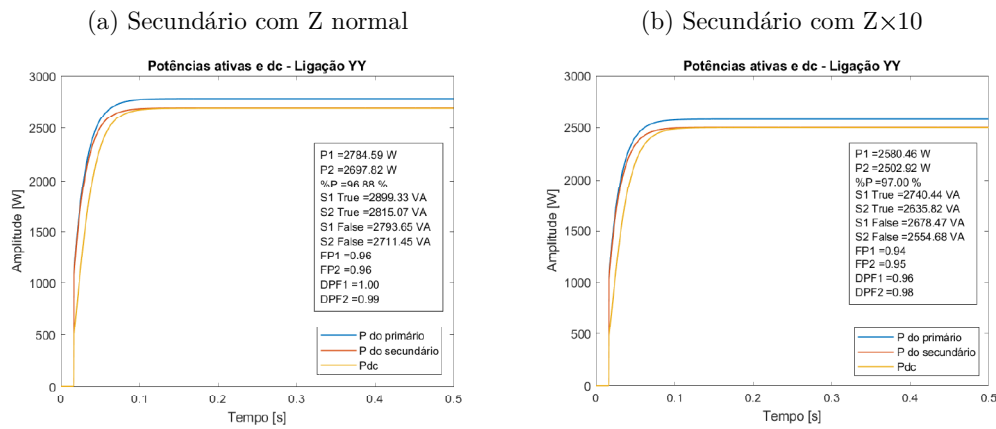
4.3.1.4.3 Potências

Figura 73 – Potências instantâneas



Fonte: Autor

Figura 74 – Potências ativas



Fonte: Autor

4.3.1.5 Comparações

Tabela 5 – Comparações dos valores medidos para carga CSI

Variáveis	Comparações							
	$\Delta\Delta$		ΔY		$Y\Delta$		YY	
	Z	Z x 10	Z	Z x 10	Z	Z x 10	Z	Z x 10
$S_{1_{3\phi}}$ [VA]	2980,28	2908,75	2938,38	2819,74	2938,38	2819,74	2899,33	2740,44
$S_{1_{3\phi f_0}}$ [VA]	2860,77	2818,5	2826,62	2746,24	2826,62	2746,24	2793,65	2678,47
$S_{2_{3\phi}}$ [VA]	2950,8	2873,96	2880,8	2749,43	2880,8	2749,43	2815,07	2635,82
$S_{2_{3\phi f_0}}$ [VA]	2832,23	2779,25	2770,66	2664,37	2770,66	2664,37	2711,45	2554,68
$P_{1_{3\phi}}$ [W]	2857,28	2781,46	2820,17	2676,89	2820,17	2676,89	2784,59	2580,46
$P_{2_{3\phi}}$ [W]	2826,71	2752,33	2760,74	2622,14	2760,74	2622,14	2697,82	2502,92
PF 1	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,96	0,95
PF 2	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,96	0,95
DPF 1	1	0,99	1	0,98	1	0,98	1	0,98
DPF 2	1	0,99	1	0,98	1	0,98	1	0,98
Carreg.	99,34%	96,96%	97,95%	93,99%	97,95%	93,99%	96,64%	91,35%
$THD_{I_{L2}}$	29,21%	25,51%	28,40%	23,29%	28,40%	23,29%	27,76%	21,64%
$THD_{V_{FF2}}$	1,28%	6,32%	2,06%	10,04%	2,06%	10,04%	2,73%	13,01%
Fator K	2,900231	2,008811	2,720787	1,663015	2,720787	1,663015	2,561066	1,50103

Fonte: Autor

4.3.2 Carga VSI

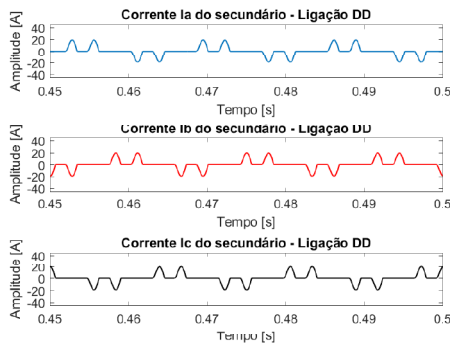
A seguir serão apresentados os resultados para carga VSI.

4.3.2.1 Ligação Δ - Δ

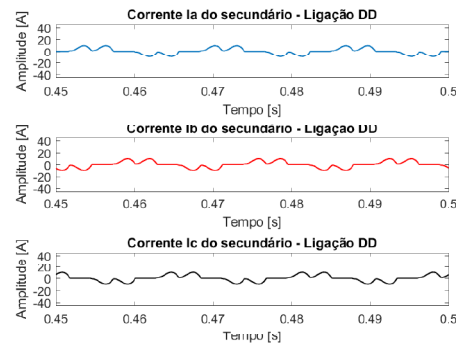
4.3.2.1.1 Correntes

Figura 75 – Ondas das correntes de linha

(a) Secundário com Z normal

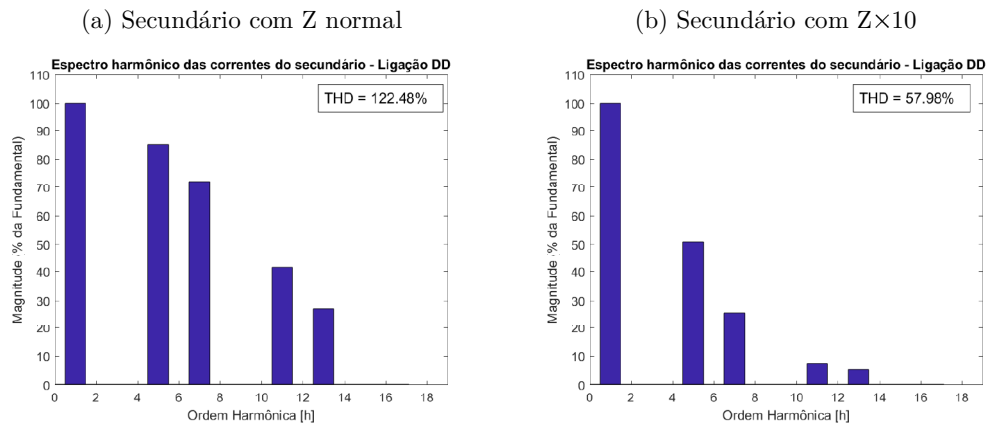


(b) Secundário com Zx10



Fonte: Autor

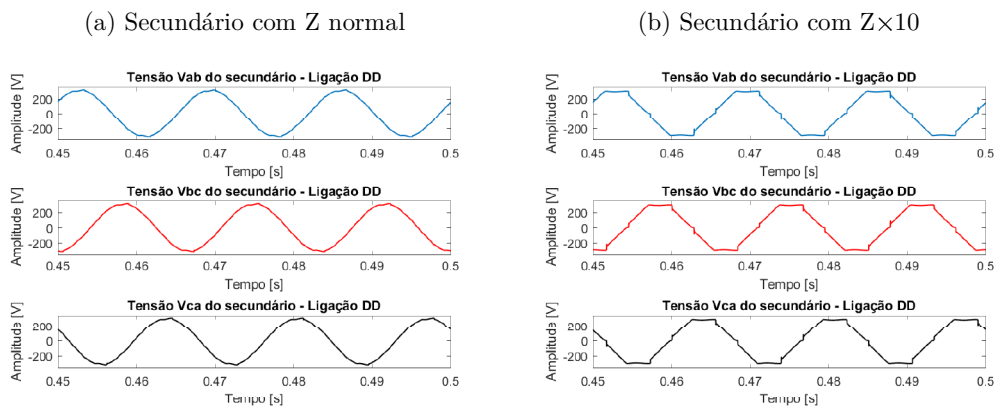
Figura 76 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

4.3.2.1.2 Tensões

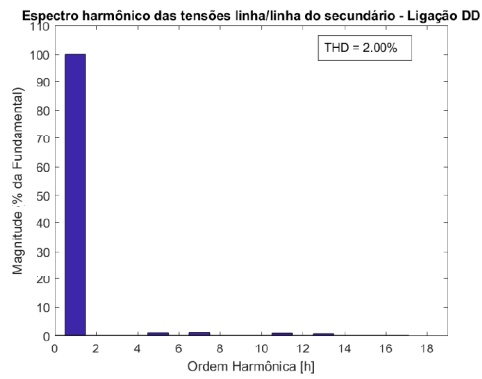
Figura 77 – Ondas das tensões de linha



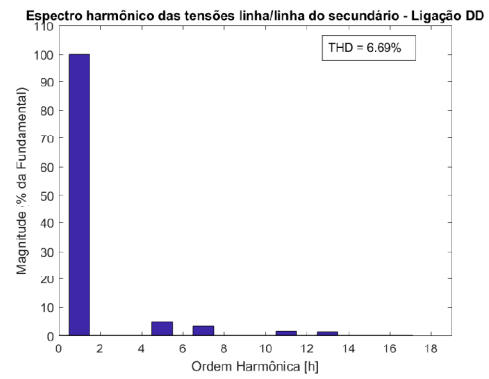
Fonte: Autor

Figura 78 – Espectros harmônicos das tensões de linha

(a) Secundário com Z normal



(b) Secundário com Z×10

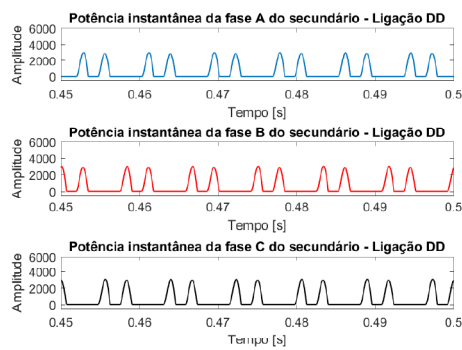


Fonte: Autor

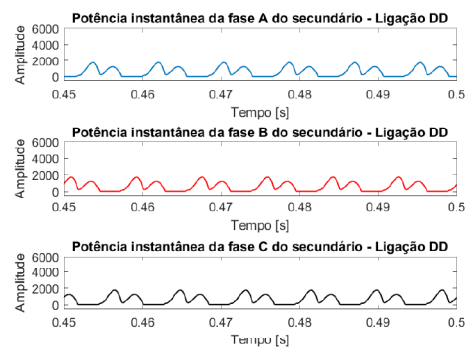
4.3.2.1.3 Potências

Figura 79 – Potências instantâneas

(a) Secundário com Z normal

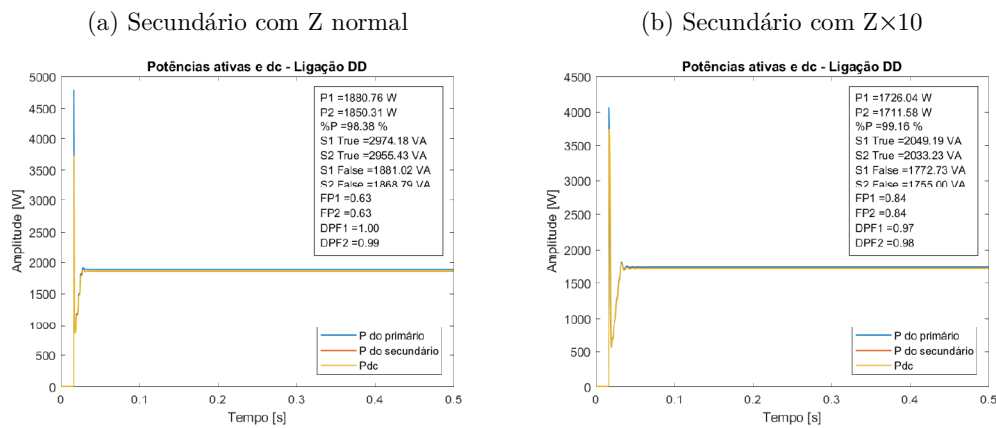


(b) Secundário com Z×10



Fonte: Autor

Figura 80 – Potências ativas

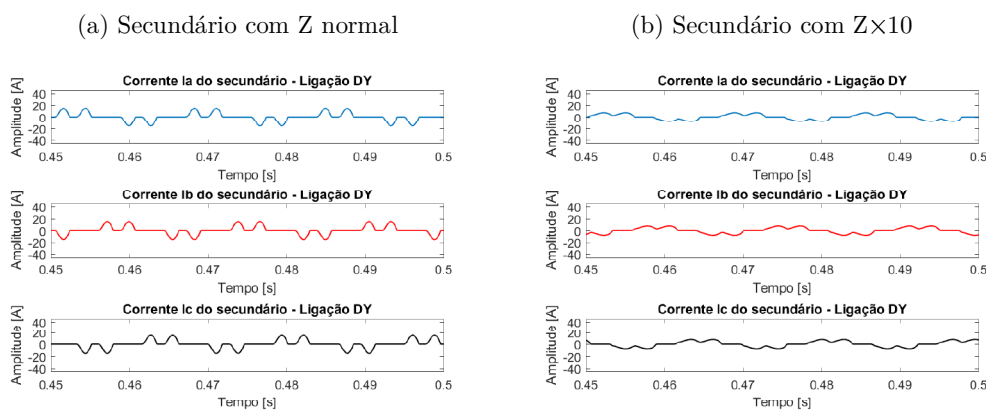


Fonte: Autor

4.3.2.2 Ligação Δ -Y

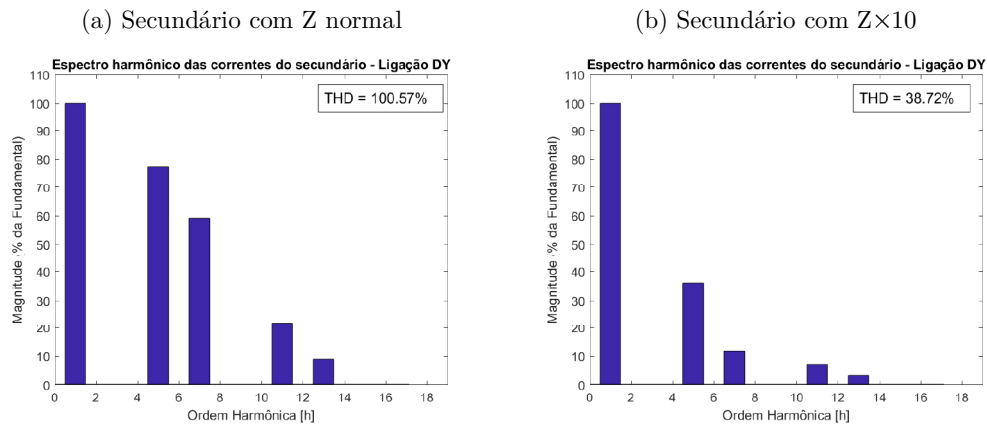
4.3.2.2.1 Correntes

Figura 81 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

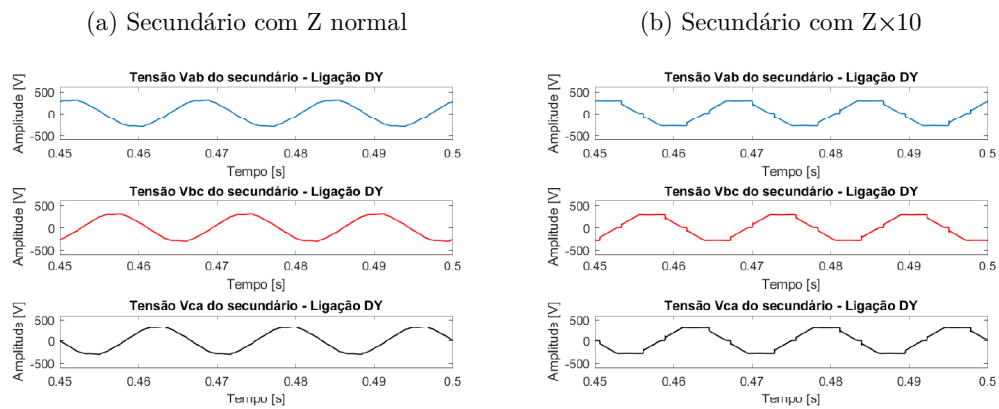
Figura 82 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

4.3.2.2.2 Tensões

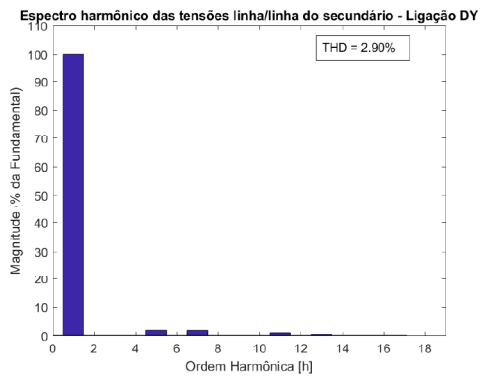
Figura 83 – Ondas das tensões de linha



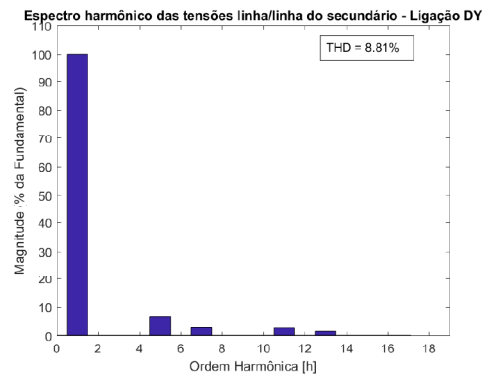
Fonte: Autor

Figura 84 – Espectros harmônicos das tensões de linha

(a) Secundário com Z normal



(b) Secundário com Z×10

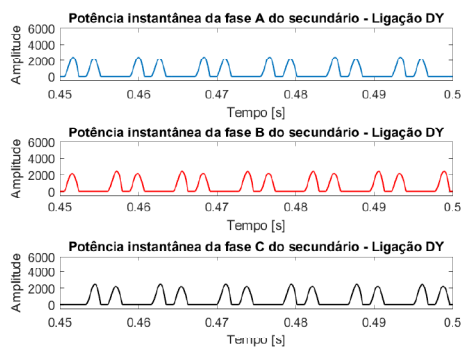


Fonte: Autor

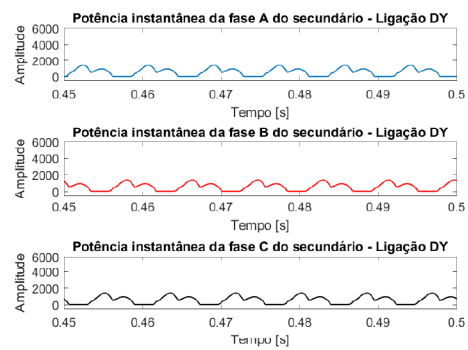
4.3.2.2.3 Potências

Figura 85 – Potências instantâneas

(a) Secundário com Z normal

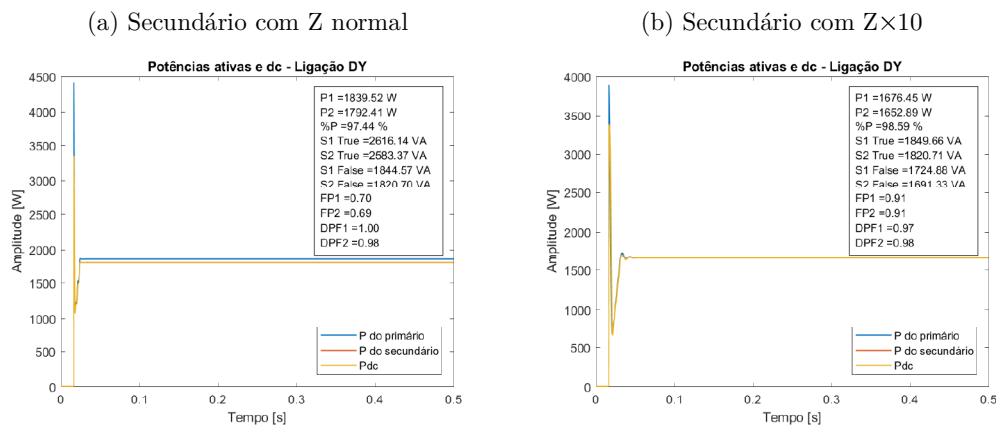


(b) Secundário com Z×10



Fonte: Autor

Figura 86 – Potências ativas

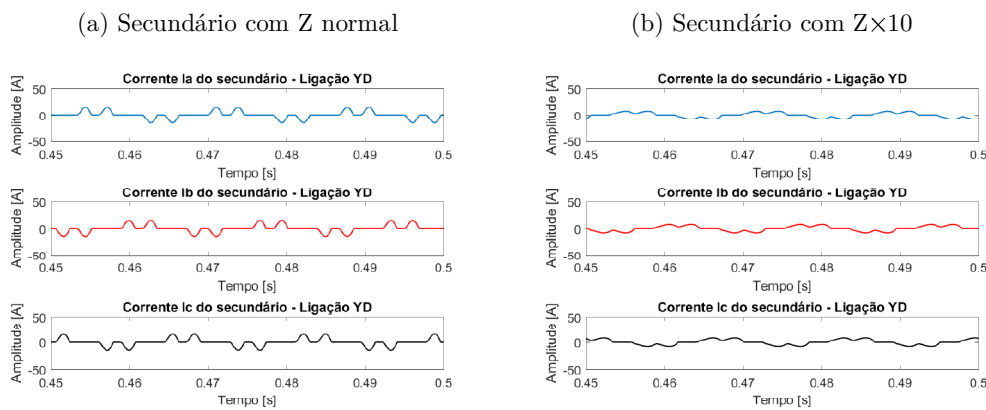


Fonte: Autor

4.3.2.3 Ligação Y-Δ

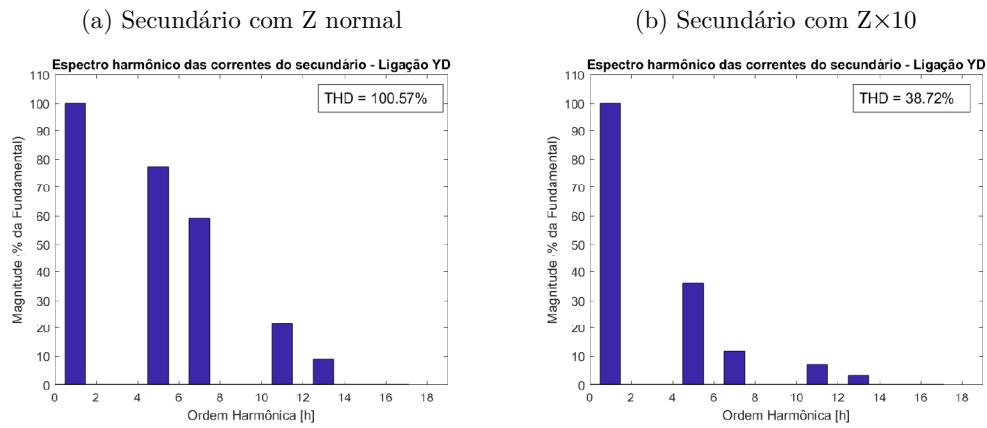
4.3.2.3.1 Correntes

Figura 87 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

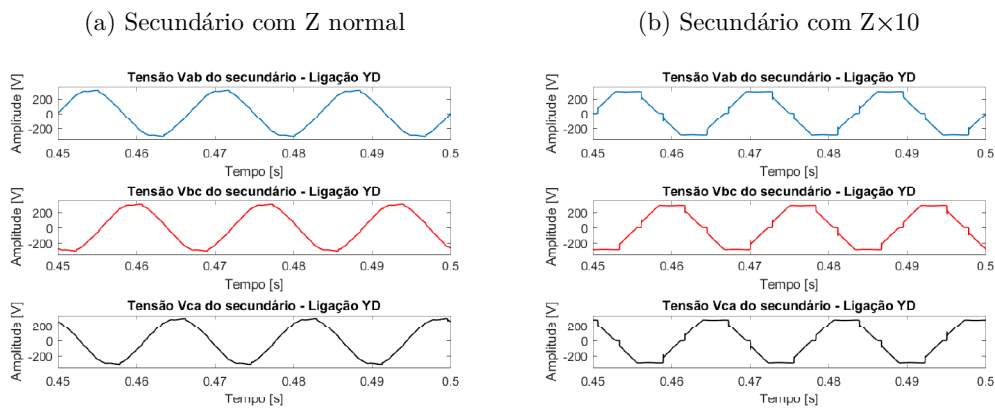
Figura 88 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

4.3.2.3.2 Tensões

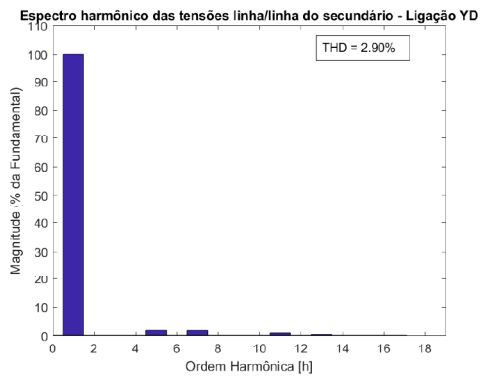
Figura 89 – Ondas das tensões de linha



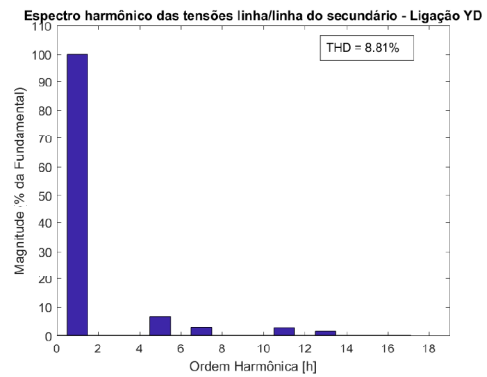
Fonte: Autor

Figura 90 – Espectros harmônicos das tensões de linha

(a) Secundário com Z normal



(b) Secundário com Z×10

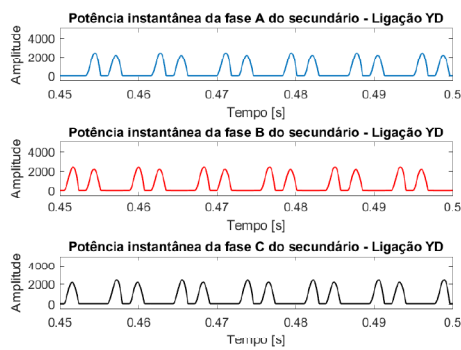


Fonte: Autor

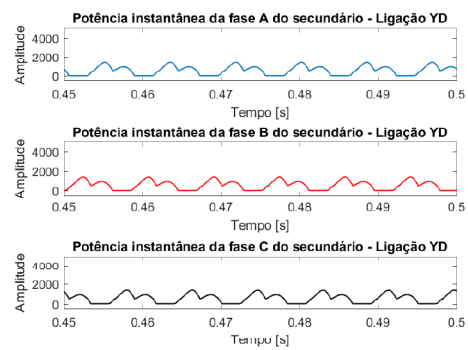
4.3.2.3.3 Potências

Figura 91 – Potências instantâneas

(a) Secundário com Z normal

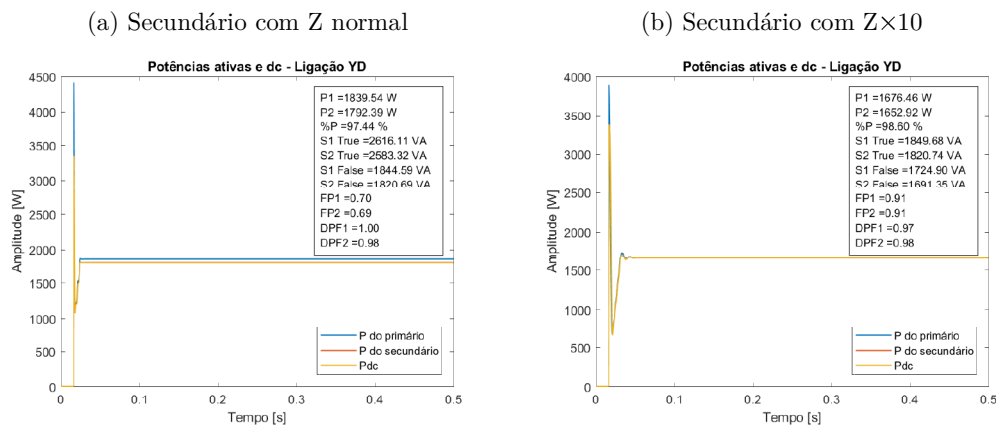


(b) Secundário com Z×10



Fonte: Autor

Figura 92 – Potências ativas

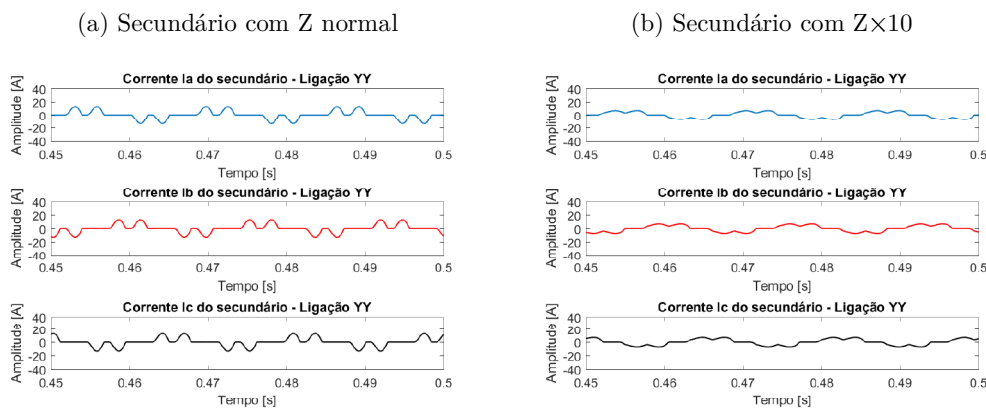


Fonte: Autor

4.3.2.4 Ligação Y-Y

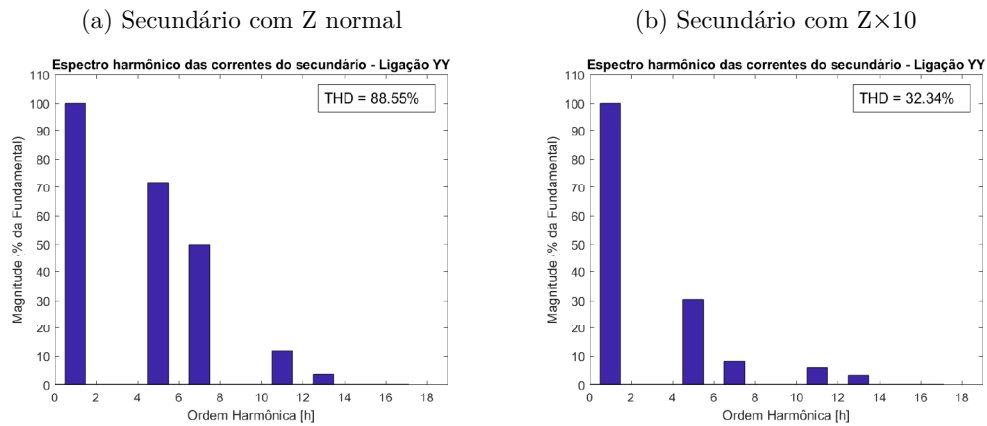
4.3.2.4.1 Correntes

Figura 93 – Ondas das correntes de linha



Fonte: Autor

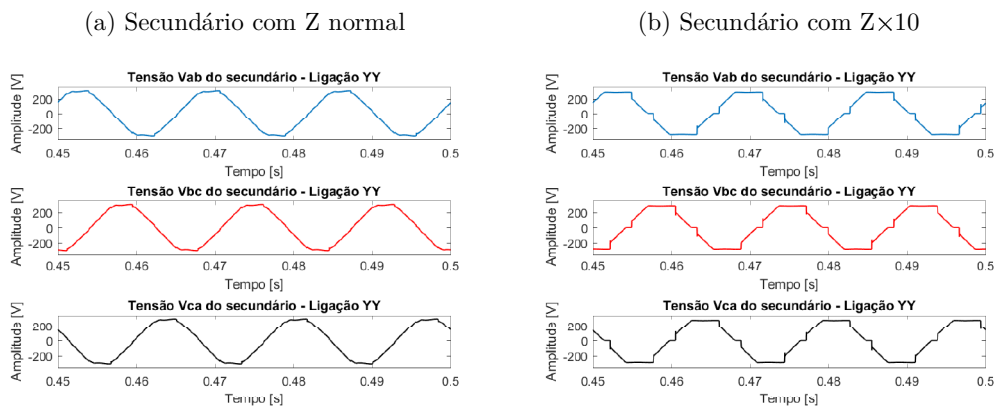
Figura 94 – Espectros harmônicos das correntes de linha



Fonte: Autor

4.3.2.4.2 Tensões

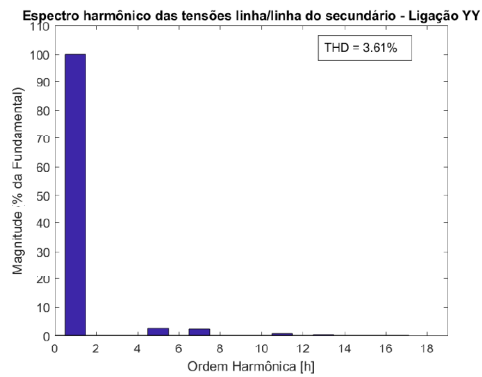
Figura 95 – Ondas das tensões de linha



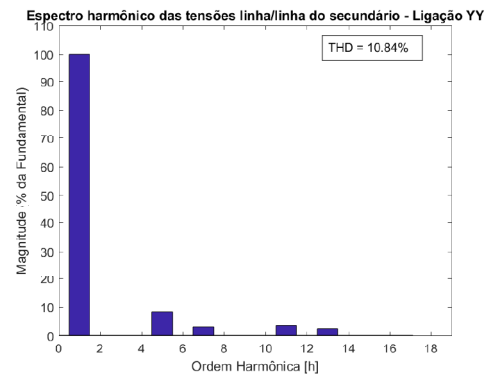
Fonte: Autor

Figura 96 – Espectros harmônicos das tensões de linha

(a) Secundário com Z normal



(b) Secundário com Z×10

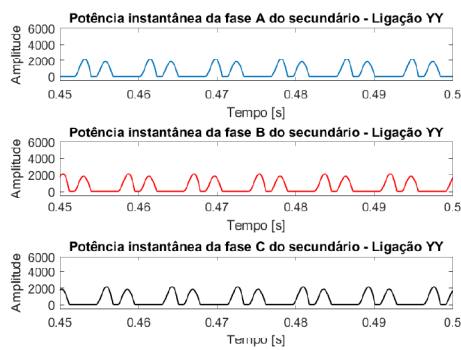


Fonte: Autor

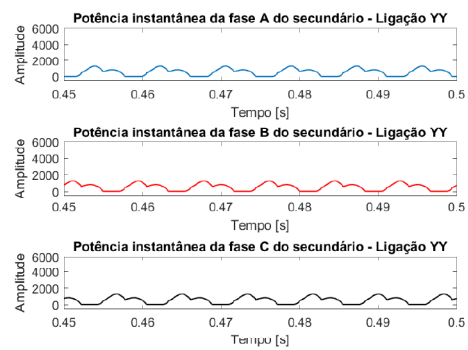
4.3.2.4.3 Potências

Figura 97 – Potências instantâneas

(a) Secundário com Z normal

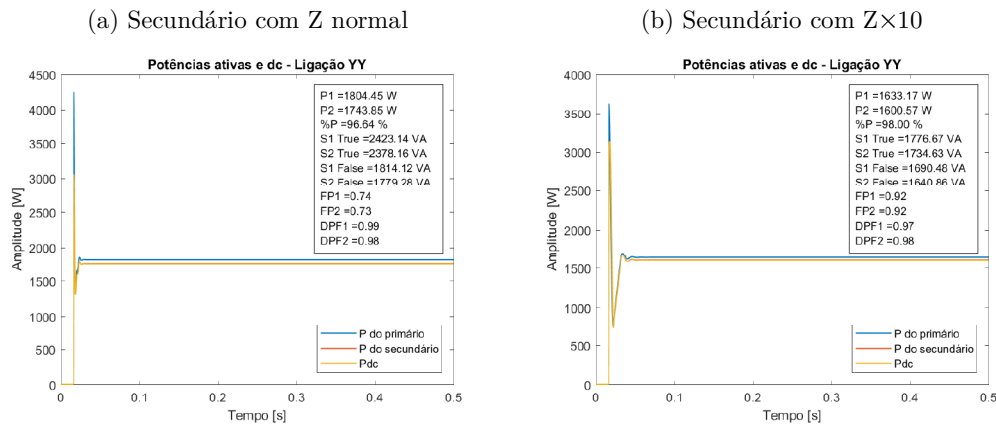


(b) Secundário com Z×10



Fonte: Autor

Figura 98 – Potências ativas



Fonte: Autor

4.3.2.5 Comparações

Tabela 6 – Comparações entre os valores medidos para carga VSI

Variáveis	Comparações							
	$\Delta\Delta$		ΔY		$Y\Delta$		YY	
	Z	Z x 10	Z	Z x 10	Z	Z x 10	Z	Z x 10
$S1_{3\phi}$ [VA]	2974,18	2049,19	2616,14	1849,66	2616,14	1849,66	2423,14	1776,67
$S1_{3\phi f_0}$ [VA]	1881,02	1772,73	1844,57	1724,88	1844,57	1724,88	1814,12	1690,48
$S2_{3\phi}$ [VA]	2955,43	2033,23	2583,37	1820,71	2583,37	1820,71	2378,16	1734,63
$S2_{3\phi f_0}$ [VA]	1868,79	1755	1820,7	1691,33	1820,7	1691,33	1779,28	1640,86
$P1_{3\phi}$ [W]	1880,76	1726,04	1839,52	1676,45	1839,52	1676,45	1804,45	1633,17
$P2_{3\phi}$ [W]	1850,31	1711,58	1792,41	1652,89	1792,41	1652,89	1743,85	1600,57
PF1	0,63	0,84	0,69	0,91	0,69	0,91	0,74	0,92
PF2	0,63	0,84	0,69	0,91	0,69	0,91	0,74	0,92
DPF1	1	0,98	1	0,98	1	0,98	0,99	0,98
DPF2	1	0,98	1	0,98	1	0,98	0,99	0,98
Carreg.	98,51%	67,77%	86,11%	60,69%	86,11%	60,69%	79,27%	57,82%
THD_{IL2}	122,48%	57,98%	100,58%	38,72%	100,58%	38,72%	88,55%	32,34%
$THD_{V_{FF2}}$	2,00%	6,69%	2,90%	8,81%	2,90%	8,81%	3,61%	10,84%
Fator K	6,8979	3,227978	5,3536	2,278939	5,3536	2,278939	4,7595	1,946177

Fonte: Autor

4.3.3 Conclusões sobre a seção

Nota-se que a impedância de curto-circuito tem um impacto muito grande no sistema. Observou-se uma melhora significativa nos valores de THD_i ao aumentar a impedância, principalmente nos modelos com carga VSI, que são mais agressivos. Além disso, as potências instantâneas apresentam um comportamento bem melhor nos modelos com impedância maior, ficando menos tempo em zero e com um pico instantâneo menor.

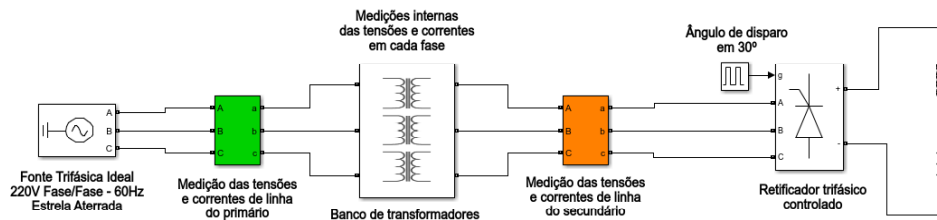
Entretanto, aumentando-se a impedância de curto circuito, aumentaram-se significativamente os valores de THD_v , ultrapassando os valores recomendados pela IEEE 519 (IEEE-519, 2014), fazendo com que os sistemas fossem inviáveis.

Porém, este é um bom indicador para projetos. A impedância de curto-circuito tem grande influência no sistema, e quando bem definida, pode trazer bons resultados.

4.4 Sistemas com carga CSI controlada

A seguir serão apresentados os resultados das simulações utilizando uma carga CSI controlada, composta por uma ponte de SCRs com ângulo de disparo de 30° . O banco de transformadores possui a mesma configuração dos casos anteriores, com a impedância de curto-circuito com seu valor normal. A Figura 99 mostra o sistema simulado, onde a carga RL do lado *dc* contém um resistor de 30Ω e um indutor de 500mH .

Figura 99 – Representação do sistema simulado com carga CSI controlada

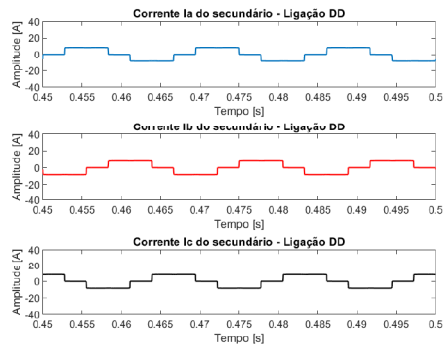


Fonte: Autor

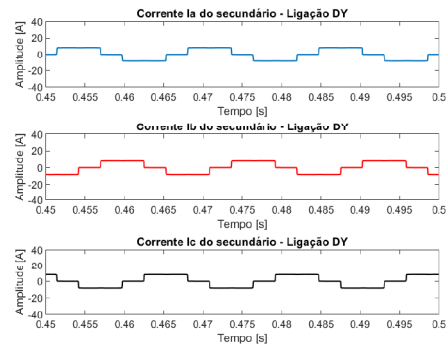
4.4.0.1 Correntes

Figura 100 – Ondas das correntes de linha no secundário

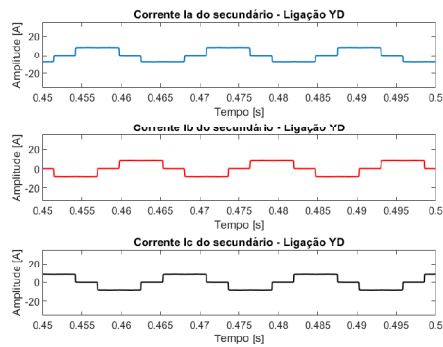
(a) Ligação Δ - Δ



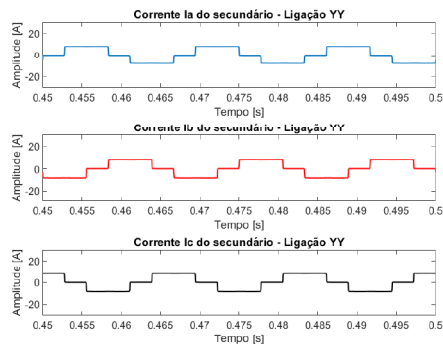
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



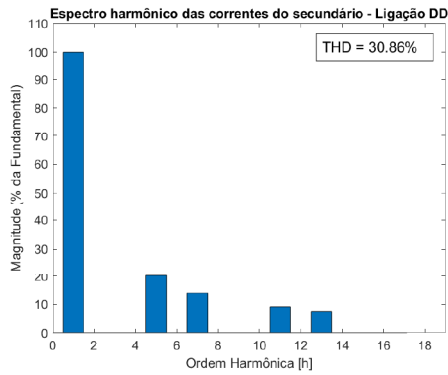
(d) Ligação Y-Y



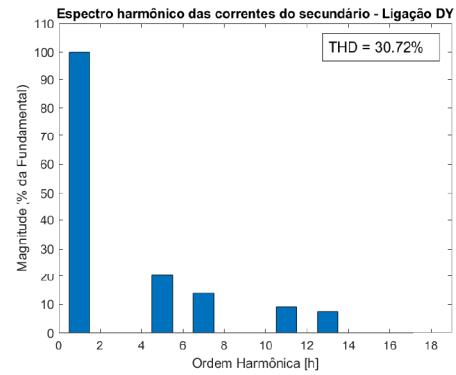
Fonte: Autor

Figura 101 – Espectro das correntes de linha no secundário

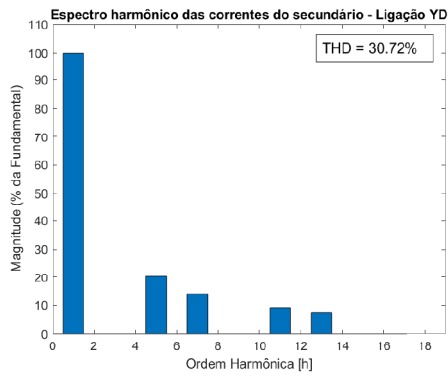
(a) Ligação Δ - Δ



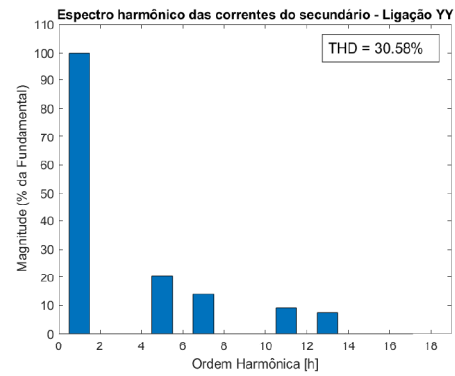
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



(d) Ligação Y-Y

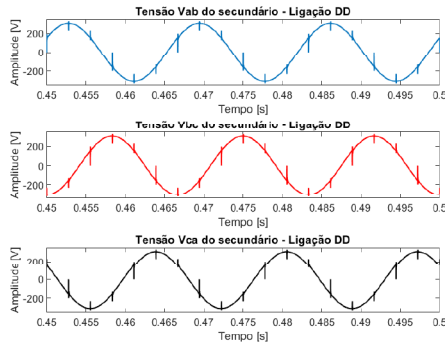


Fonte: Autor

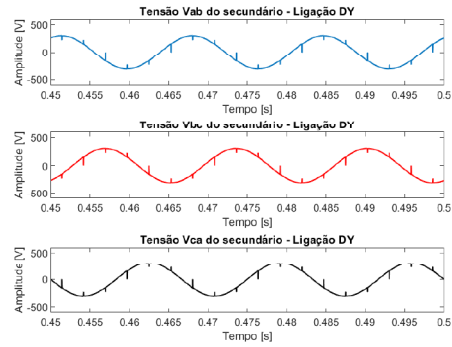
4.4.0.2 Tensões

Figura 102 – Ondas das tensões fase/fase do secundário

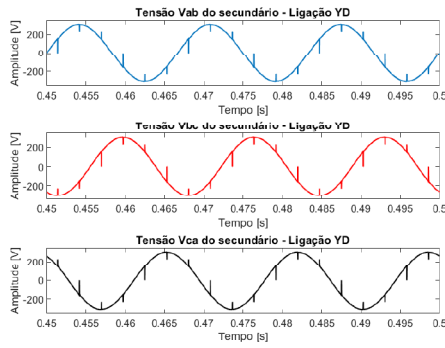
(a) Ligação Δ - Δ



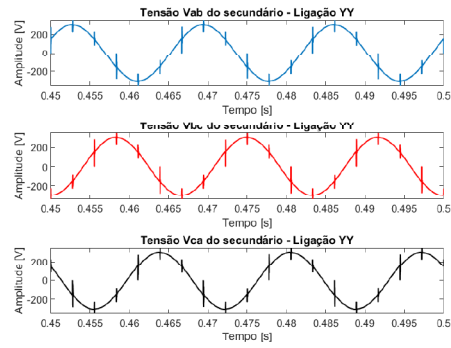
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



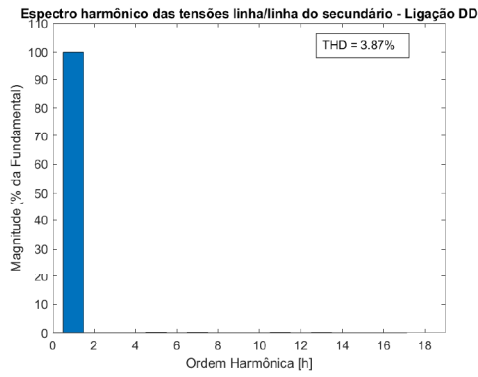
(d) Ligação Y-Y



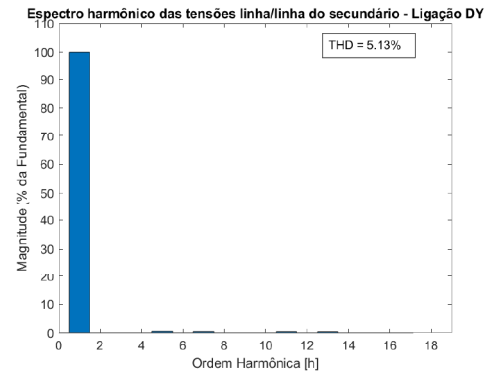
Fonte: Autor

Figura 103 – Espectro das tensões fase/fase do secundário

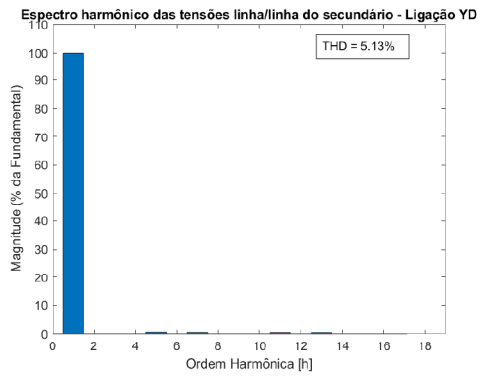
(a) Ligação Δ - Δ



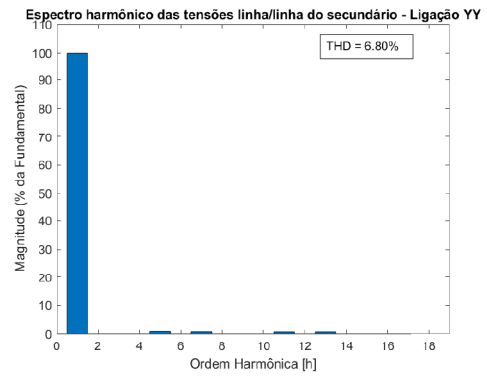
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



(d) Ligação Y-Y

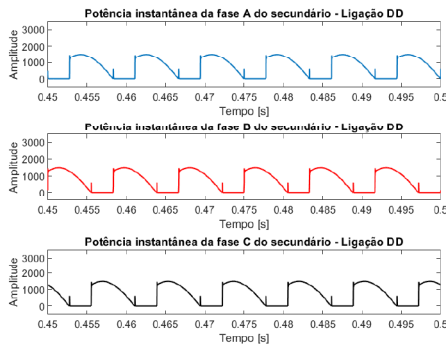


Fonte: Autor

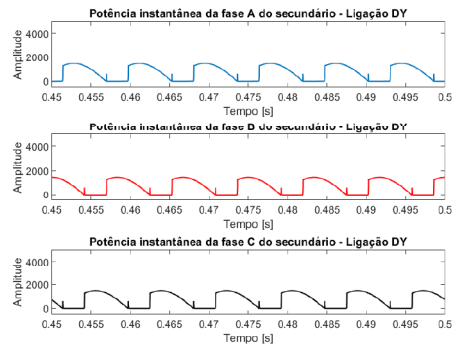
4.4.0.3 Potências

Figura 104 – Potências Instantâneas do secundário

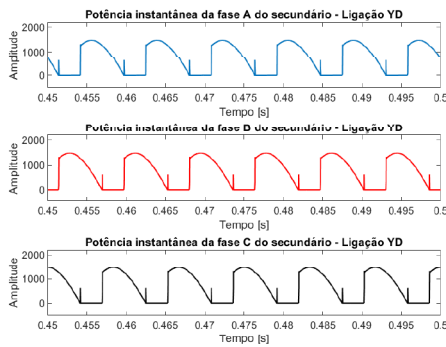
(a) Ligação Δ - Δ



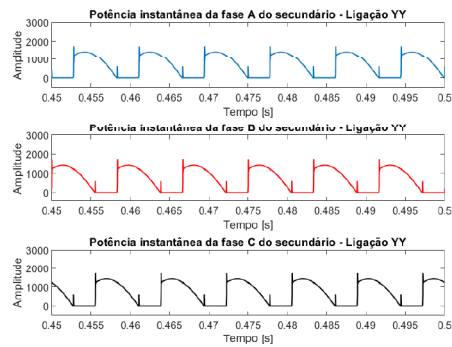
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

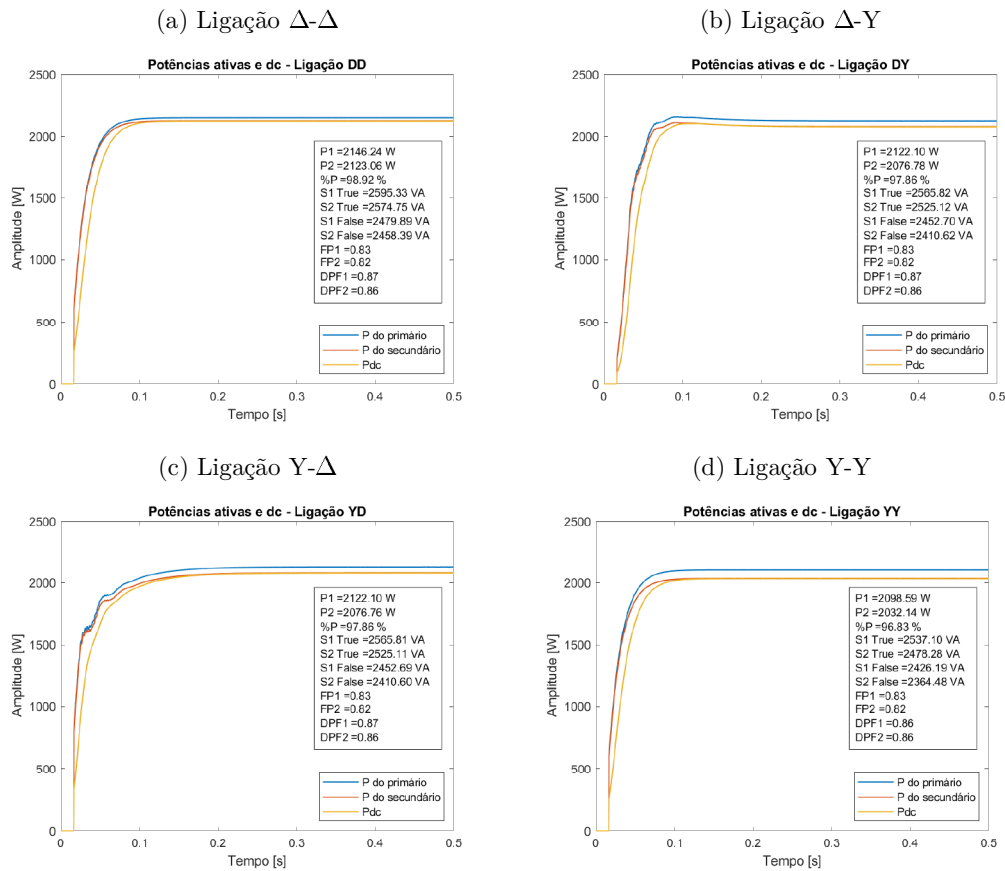


(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

Figura 105 – Potências Ativas



4.4.1 Conclusões sobre a seção

O modelo apresentado se aproxima mais das aplicações reais de cargas não lineares, em especial, cargas CSI.

Ao se observar o fator de potência de deslocamento calculado nessas simulações, conclui-se que, além dos harmônicos característicos desse modelo de carga, ainda existe potência reativa no sistema, que pode variar com o ângulo de disparo.

Além disso, analisando as ondas das potências instantâneas, nota-se um período maior em que o transformador fica *descarregado*, se comparado ao modelo CSI com diodos. Esse efeito é prejudicial aos transformadores, principalmente quando o carregamento do transformador é feito instantaneamente (se aproximando de um degrau), que é o caso observado nas simulações em questão.

4.5 Sistema híbrido contendo uma carga CSI controlada e uma carga VSI

Essa seção apresentará os resultados de simulações para sistemas híbridos, contendo uma carga CSI controlada e uma carga VSI.

Para essas simulações, os valores das cargas tiveram de ser alterados para estarem dentro da faixa de potência dos transformadores. Assim, as configurações utilizadas nas simulações são as seguintes:

Dados de cada transformador do banco:

- **Potência nominal:** 1kVA;
- **Frequência de operação:** 60Hz;
- **Impedância de curto-circuito equivalente:** $0,5 + j0,4 \times 10^{-3}$;
- **Tensão de linha nominal do primário:** 220V RMS;
- **Tensão de linha nominal do secundário:** 220V RMS;
- **Resistência de magnetização:** $1.0567 \times 10^{12} \Omega$;
- **Indutância de magnetização:** 19723 H;

Dados da carga CSI:

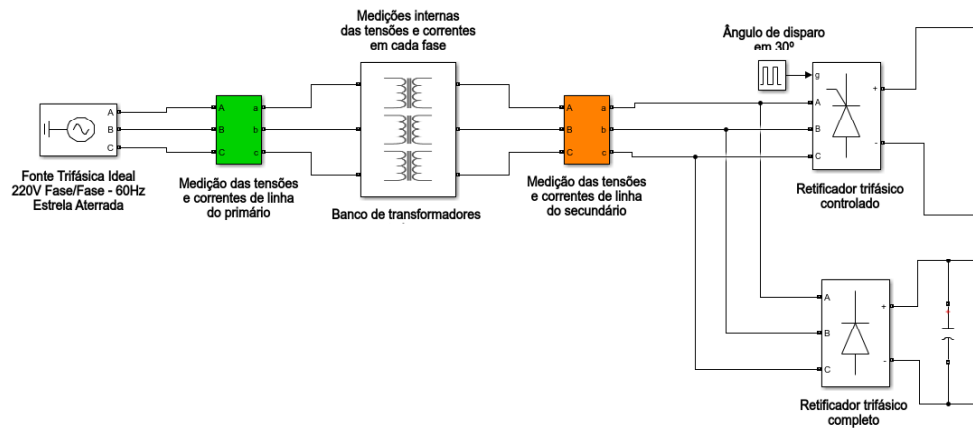
- Ponte retificadora controlada;
- **Resistência da carga:** 61 Ω ;
- **Indutância da carga:** 500 mH;

Dados da carga VSI:

- Ponte retificadora trifásica completa à diodos;
- **Resistência da carga:** 77,5 Ω ;
- **Capacitância da carga:** 500 μF ;

A Figura 106 mostra o sistema simulado.

Figura 106 – Representação do sistema simulado com carga mista

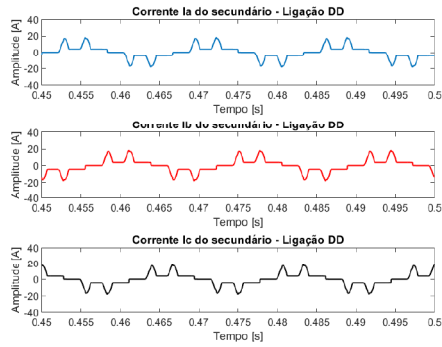


Fonte: Autor

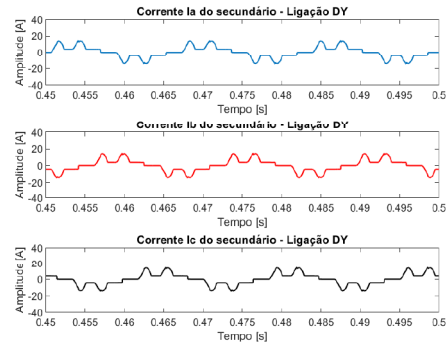
4.5.0.1 Correntes

Figura 107 – Ondas das correntes de linha no secundário

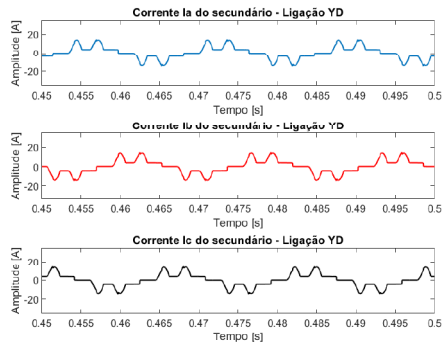
(a) Ligação Δ - Δ



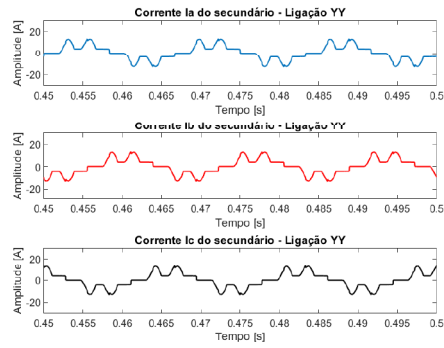
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



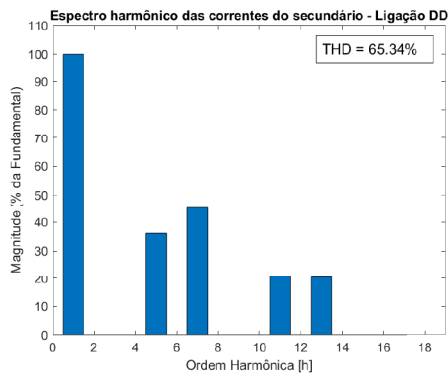
(d) Ligação Y-Y



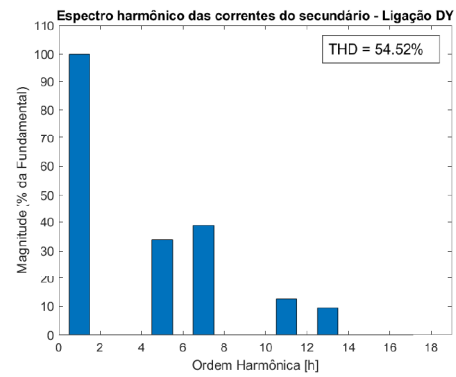
Fonte: Autor

Figura 108 – Espectro das correntes de linha no secundário

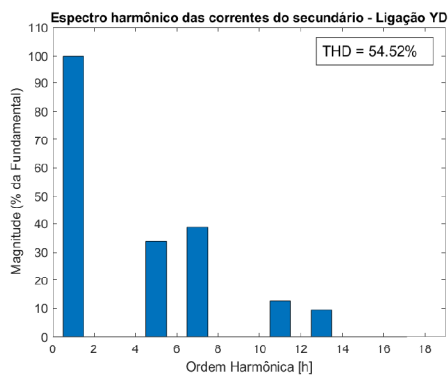
(a) Ligação Δ - Δ



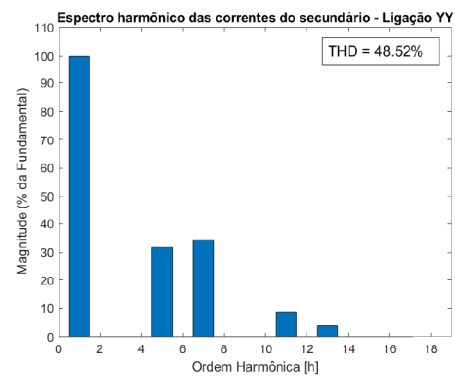
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



(d) Ligação Y-Y

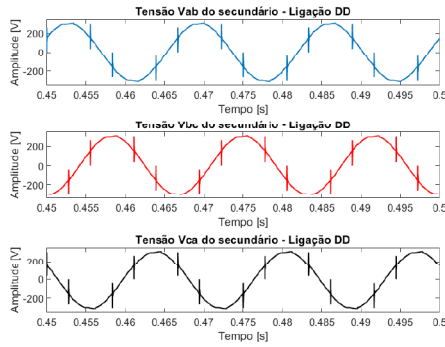


Fonte: Autor

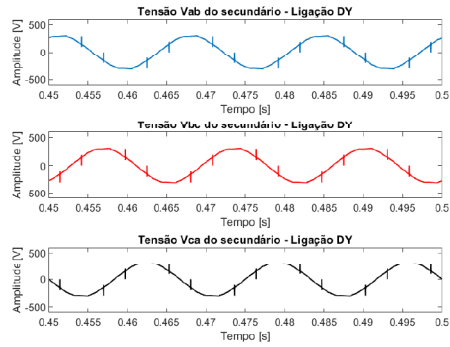
4.5.0.2 Tensões

Figura 109 – Ondas das tensões fase/fase do secundário

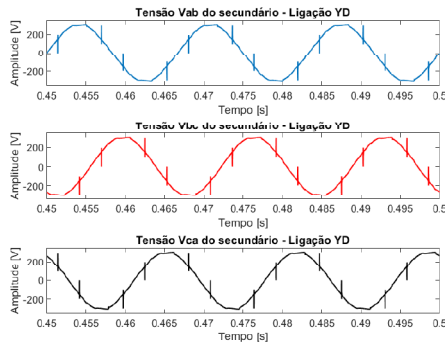
(a) Ligação Δ - Δ



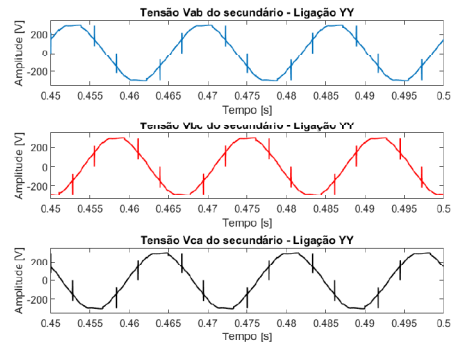
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



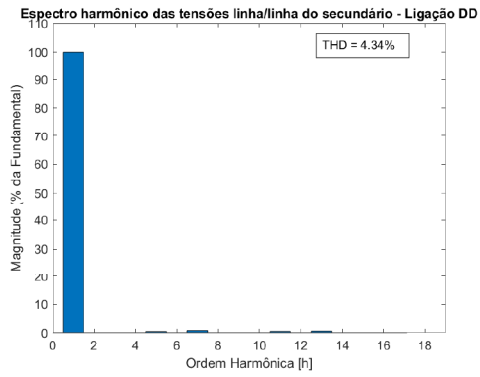
(d) Ligação Y-Y



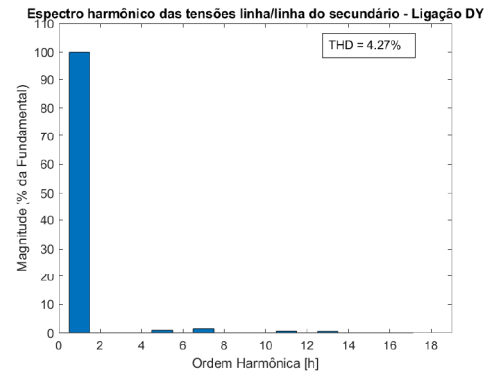
Fonte: Autor

Figura 110 – Espectro das tensões fase/fase do secundário

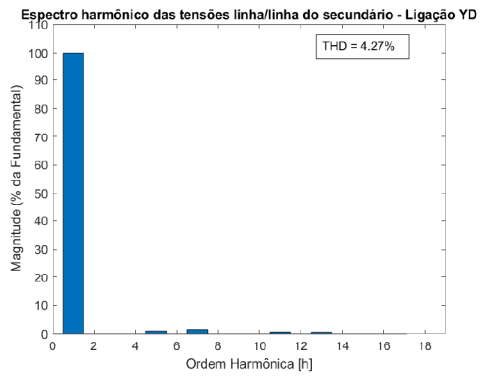
(a) Ligação Δ - Δ



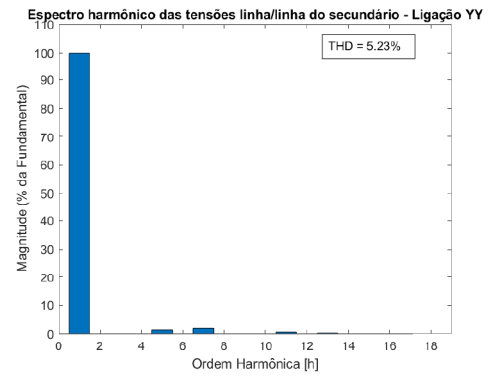
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



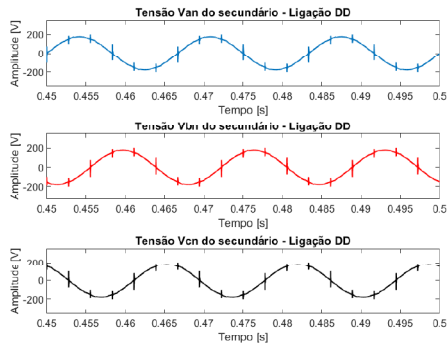
(d) Ligação Y-Y



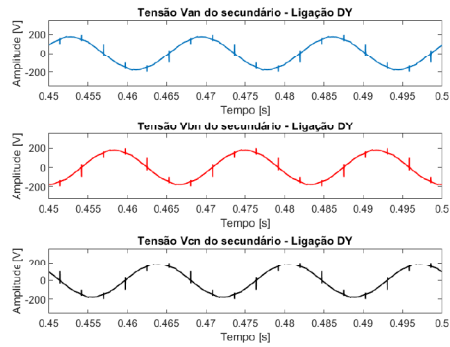
Fonte: Autor

Figura 111 – Ondas das tensões fase/neutro do secundário

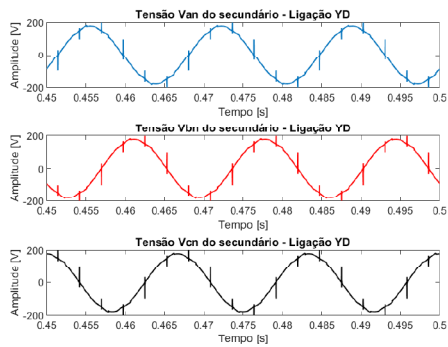
(a) Ligação Δ - Δ



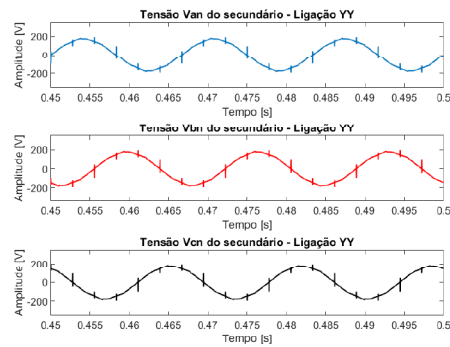
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



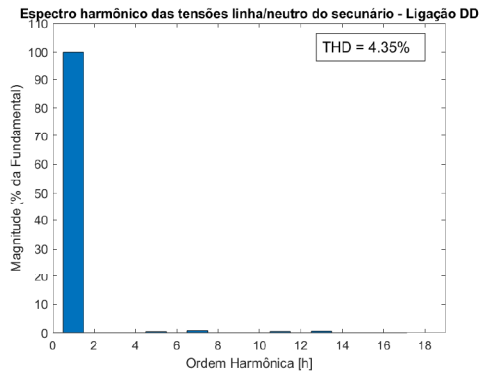
(d) Ligação Y-Y



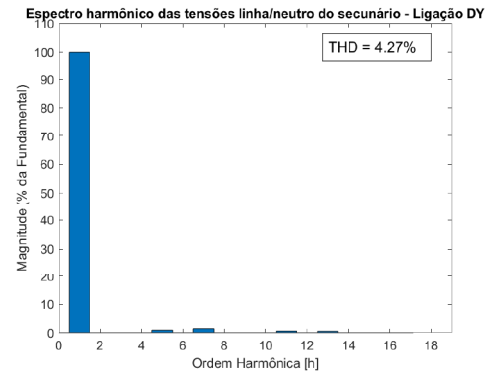
Fonte: Autor

Figura 112 – Espectro das tensões fase/neutro do secundário

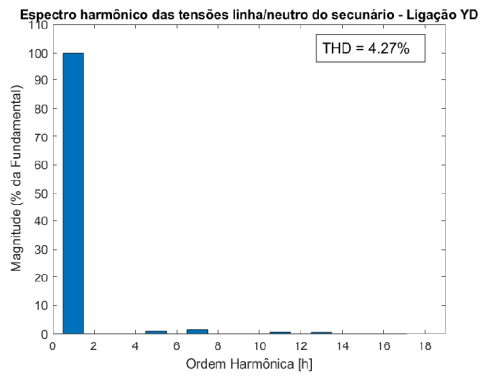
(a) Ligação Δ - Δ



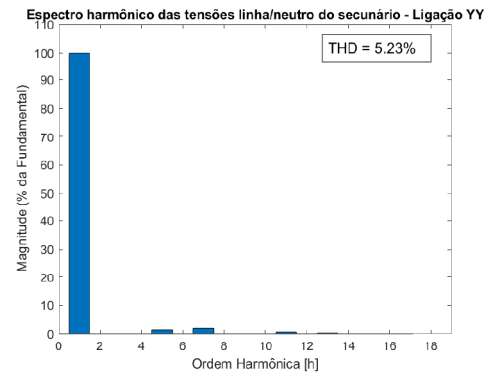
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ



(d) Ligação Y-Y

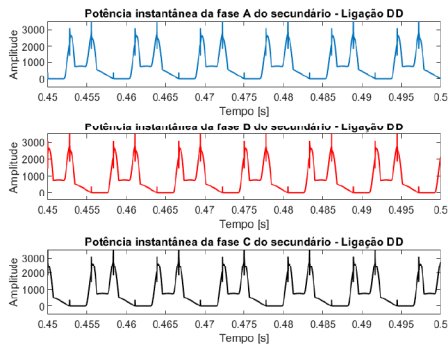


Fonte: Autor

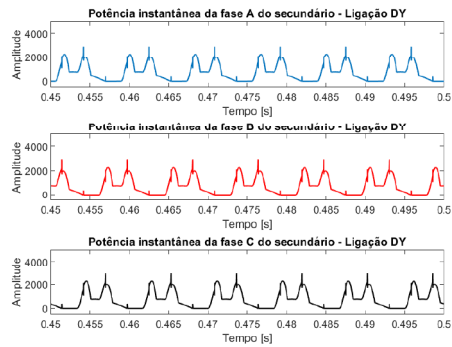
4.5.0.3 Potências

Figura 113 – Potências Instantâneas do secundário

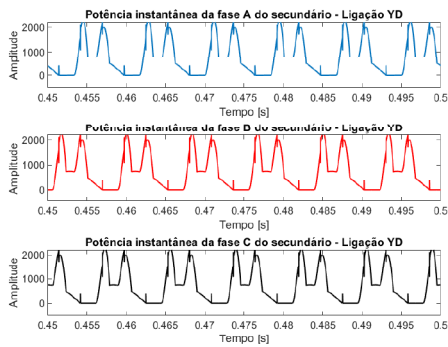
(a) Ligação Δ - Δ



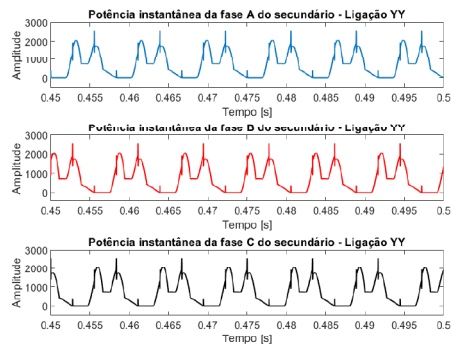
(b) Ligação Δ -Y



(c) Ligação Y- Δ

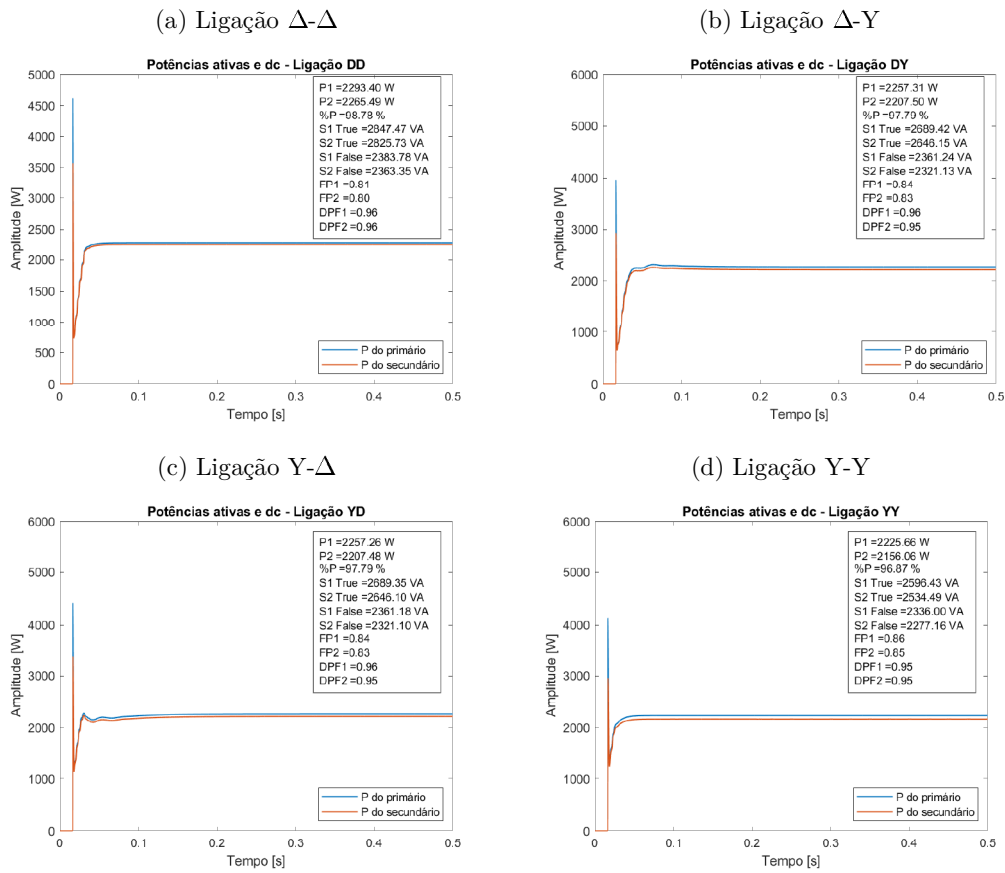


(d) Ligação Y-Y



Fonte: Autor

Figura 114 – Potências Ativas



Fonte: Autor

4.5.1 Conclusões sobre a seção

O modelo simulado apresenta uma situação um pouco mais fiel à realidade, onde os sistemas estão sujeitos à diferentes tipos de carga. Para este caso, nota-se um sistema com predominância de harmônicos de quinta e sétima ordens nas correntes, porém, diferente dos casos apresentados anteriormente, o harmônico de sétima ordem apresenta uma amplitude maior.

Além disso, observa-se o efeito característico das duas cargas analisadas neste trabalho. As correntes e potências instantâneas apresentam dois picos, característica da carga VSI, as tensões apresentam pequenos pontos de overlap e o fator de potência de deslocamento não é unitário, características da carga CSI.

O sistema apresenta uma distorção nas ondas de tensão mais elevada se comparado com os casos isolados vistos anteriormente. Dessa forma, para esse sistema, o aumento da impedância de curto circuito tornaria esse índice de distorção mais elevado, levando o sistema à um ponto impraticável.

5 Resumo das comparações realizadas nas simulações

As simulações apresentaram resultados interessantes para mudança dos fechamentos dos transformadores e modificação da impedância de curto-circuito.

A Tabela 7 apresenta algumas comparações dos resultados obtidos nas simulações que comparam os fechamentos dos transformadores.

Tabela 7 – Resumo dos resultados para simulações de comparação dos fechamentos dos transformadores

Carga CSI				
Variáveis	$\Delta - \Delta$	Δ -Y	Y- Δ	Y-Y
$THD_{I_{L2}}$	29,21%	28,24%	28,24%	27,76%
$THD_{V_{FF2}}$	1,28%	2,06%	2,06%	2,73%
I_{2L} [A]	7,82	7,71	7,71	7,61
$S_{2_{3\phi}}$ [VA]	2950,8	2880,8	2880,8	2815,07
$S_{2_{3\phi f_0}}$ [VA]	2832,23	2770,66	2770,66	2711,45
Fator K	2,9	2,72	2,72	2,56
PF 2	0,96	0,96	0,96	0,96
DPF 2	1	1	1	1
Carga VSI				
Variáveis	$\Delta - \Delta$	Δ -Y	Y- Δ	Y-Y
$THD_{I_{L2}}$	122,48%	100,58%	100,58%	88,55%
$THD_{V_{FF2}}$	2%	2,9%	2,9%	3,61%
I_{2L} [A]	7,8	6,87	6,87	6,36
$S_{2_{3\phi}}$ [VA]	2955,43	2583,37	2583,37	2378,16
$S_{2_{3\phi f_0}}$ [VA]	1868,79	1820,7	1820,7	1779,28
Fator K	6,89	5,35	5,35	4,76
PF 2	0,63	0,69	0,69	0,74
DPF 2	1	1	1	1

Fonte: Autor

Nota-se uma pequena variação entre os valores de THD_i para as simulações com carga CSI, e uma variação um pouco mais significativa para este mesmo indicador nas simulações com carga VSI. Também é possível notar variação nos valores rms da corrente de linha do secundário, nos valores de fator de potência total e na potência aparente trifásica. Interessante observar, principalmente nas simulações com carga VSI, a diferença entre potência aparente total e potência aparente para componente

fundamental. Isso mostra um sistema com grande índice de distorção, onde grande parte da potência fornecida pelo transformador é referente à harmônicos.

As comparações realizadas entre os diferentes tipos de núcleo apresentaram os mesmos resultados, indicando que para ambientes contendo apenas distorções, a mudança de núcleo não traz resultados significativos.

As simulações pra variação da impedância de curto circuito apresentaram valores muito interessantes. A Tabela 8 mostra os principais resultados para ligação Y- Δ , porém a dinâmica apresentada para essa ligação é semelhante às outras ligações.

Tabela 8 – Resumo dos resultados para simulações de comparação da modificação da impedância de curto-circuito

Carga CSI		
Variáveis	Y- Δ	
	Z	Zx10
$THD_{I_{L2}}$	28,4%	23,29%
$THD_{V_{FF2}}$	2,06%	10,04%
Carregamento	97,95%	93,99%
$S_{2\phi}$ [VA]	2880,8	2749,43
$S_{2\phi_{f_0}}$ [VA]	2770,66	2664,37
Fator K	2,72	1,66
PF 2	0,96	0,95
DPF 2	1	0,98
Carga VSI		
Variáveis	Y- Δ	
	Z	Zx10
$THD_{I_{L2}}$	100,58%	38,72%
$THD_{V_{FF2}}$	2,9%	8,81%
Carregamento	86,11%	60,69%
$S_{2\phi}$ [VA]	2583,37	1820,71
$S_{2\phi_{f_0}}$ [VA]	1820,7	1691,33
Fator K	5,35	2,28
PF 2	0,69	0,91
DPF 2	1	0,98

Fonte: Autor

Nota-se um comportamento bem interessante quando se aumentou a impedância de curto-circuito. Os valores de THD_i e de carregamento dos transformadores caíram drasticamente no modelo com carga VSI. Esse era um resultado esperado, pois a corrente harmônica da carga VSI sofre forte influência da impedância de curto circuito. Essa melhora do valor de THD_i foi mais discreto para as simulações com carga CSI, porém ainda sim houve melhora. Outros valores apresentaram redução,

com destaque para o Fator-K. Porém, em todos os casos, o aumento da impedância de curto-circuito distorceu mais as tensões, fazendo com que os valores ultrapassassem os limites recomendados pela IEEE-519 (IEEE-519, 2014).

6 Conclusão

Este trabalho trouxe algumas medidas que podem ser tomadas para tentar minimizar os efeitos dos harmônicos nos transformadores. O primeiro deles é definir uma ligação que seja mais eficiente. Como visto nas simulações, o modelo mais eficiente, levando em conta os valores de THD_i , potência instantânea e fator de potência global, é o Y-Y, porém, essa ligação apresenta muitos problemas em ambientes desequilibrados, sendo necessário aterrar solidamente cada um de seus enrolamentos para evitar danos relacionados à componentes de sequência zero (CHAPMAN, 2013)(UMANS, 2014). Assim, os modelos que apresentaram uma resposta melhor, não tão distante dos resultados da ligação Y-Y, foram o Y- Δ e o Δ -Y, onde, para aplicações contendo apenas cargas não lineares, a opção Y- Δ se torna mais conveniente, pois essas cargas não demandam um neutro. Esses modelos apresentaram uma resposta melhor que o Δ - Δ , principalmente nos valores de THD_i e nos valores de pico das potências instantâneas.

No entanto, apenas modificar as ligações dos transformadores não traz uma efeito significativo para o sistema. Os valores de THD ainda continuam bem elevados e os transformadores continuam sofrendo com os efeitos dos harmônicos, o que leva para uma segunda opção, que é a modificação dos núcleos.

As três opções principais para núcleos de transformadores trifásicos são o núcleo tipo *Core*, o tipo *Shell* e o banco de transformadores monofásicos. Cada um possui características construtivas diferentes e suas peculiaridades (CHAPMAN, 2013). Porém, as simulações realizadas neste trabalho mostraram que, para diferentes tipos de núcleo, com as mesmas características magnéticas, as respostas aos harmônicos provenientes das cargas permanecem as mesmas. Ou seja, para ambientes equilibrados contendo harmônicos, a mudança do núcleo não trará melhoras significativas.

Assim, a última opção destacada neste trabalho, é a modificação da impedância de curto-circuito dos transformadores.

A impedância de curto circuito é uma variável de extrema importância, que pode modificar consideravelmente a composição harmônica do sistema. Nos exemplos apresentados neste trabalho, aumentou-se a componente indutiva da impedância de curto-circuito em 10 vezes. O que se observou foi uma melhora significativa dos valores de THD_i , principalmente nas cargas VSI, além disso, as potências instantâneas apresentaram um valor de pico mais reduzido e um tempo maior de carregamento e os transformadores tiveram queda no percentual de ocupação (carregamento), tendo casos em que essa redução de ocupação do transformador girou em torno de 30%. Isso

é um fato interessante, pois a queda dos níveis de distorção das correntes influencia diretamente na vida útil dos transformadores e na capacidade de fornecimento de potência às cargas (CAMARGO, 2005)(FUCHS, 2002)(SILVA, 2015). No caso da impedância original, os valores de pico das potências instantâneas, principalmente nas situações com carga VSI, eram bem elevados, ultrapassando mais que o dobro do valor da potência nominal de cada fase dos transformadores. Além disso, o transformador permanecia *descarregado* por um tempo maior e era subitamente carregado, alcançando picos elevados de potência instantânea por um curto espaço de tempo, como dito.

Um problema observado no aumento da impedância de curto circuito está relacionado às distorções nas tensões. Ao contrário do que aconteceu nas correntes, as tensões ficaram com os valores de THD_v mais elevados, em certos casos até impraticáveis (IEEE-519, 2014).

De toda forma, pode-se concluir que a impedância de curto-circuito terá um impacto significativo no comportamento dos transformadores. Esta é uma variável importante a ser definida na etapa do projeto para minimizar os efeitos dos harmônicos nos transformadores.

Entretanto, nenhum dos métodos descritos anteriormente consegue resolver por completo os problemas relacionados aos harmônicos. Ainda é preciso utilizar alguns métodos visando a proteção e prolongamento da vida útil dos transformadores.

Dois métodos comuns que podem ser utilizados são a aplicação de transformadores com fator-k e o método de *derating* (SANTOS, 2012)(IEEE-C57.110, 2018).

Ao se utilizar o *derating*, opta-se por trabalhar com os transformadores com carregamento reduzido. Essa é uma opção muito utilizada, onde são usados transformadores com uma potência nominal mais elevada que a potência nominal demandada pela carga, dessa forma, seu carregamento fica reduzido quando a carga está operando em potência nominal (SANTOS, 2012).

Os transformadores com fator-k já são projetados para suportarem a carga harmônica que ele estará submetido e seus efeitos térmicos. Geralmente são transformadores maiores e mais caros com núcleo e enrolamentos modificados. No Brasil, esse modelo ainda não é muito utilizado, ao contrário dos Estados Unidos por exemplo, que já tem uma aplicação maior dessa técnica. Os principais problemas da aplicação dos transformadores com fator-k são custo e ocupação de espaço (SANTOS, 2012)(FUCHS, 2002)(IEEE-C57.110, 2018).

Como visto nos resultados deste trabalho, modificar as ligações dos transformadores e a impedância de curto-circuito tem impacto direto na composição harmônica

do sistema. Assim, uma boa opção para ambientes com distorções harmônicas é aliar algum dos métodos descritos anteriormente, seja fator-k ou derating, com uma impedância de curto circuito bem definida e um fechamento adequado. Ao se utilizar uma impedância de curto-circuito e um fechamento adequados, a tendência é se ter uma composição harmônica menor. Dessa forma, se for utilizado um transformador com fator-k, o valor desse fator-k será menor, fazendo com que o custo seja menor.

O mesmo acontecerá pra situações onde o método de derating for utilizado. Uma impedância de curto-circuito e um fechamento adequados trará a possibilidade de se usar um transformador com potência nominal menor, reduzindo os custos da aplicação.

Porém, em todas as opções descritas anteriormente, os harmônicos e seus efeitos continuam presentes no sistema. O que se faz é projetar os transformadores para suportarem esses efeitos, seja utilizando o fator-k ou derating.

Um artifício que pode ser usado para mitigar os efeitos harmônicos nos transformadores é a utilização de filtros, visando diminuir a carga harmônica presente nos sistemas. Zerar a composição harmônica se tornaria um processo muito caro e certamente inviável.

Pelos resultados obtidos neste trabalho, é possível observar em todos os casos a predominância de componentes de quinta e sétima ordem nos espectros harmônicos.

Uma boa opção seria desenvolver um filtro que *eliminasse* essas componentes, reduzindo significativamente os valores de THD_i . Com isso, algum método adicional, como o derating ou fator-k, poderia ser aplicado aos transformadores, porém, com valores reduzidos.

Um ponto importante a ser observado na utilização de filtros é a questão do fator de potência da instalação. A utilização de filtros passivos, que são mais baratos e mais fáceis de implementar, afetam o fator de potência de deslocamento do sistema. Pôde-se observar que cargas CSI controladas também modificam o fator potência de deslocamento da instalação. Ao se projetar os filtros, esses detalhes devem ser observados, além, claro, da impedância de curto circuito que será definida para os transformadores (PENG, 1998)(TAHER; KAMEL; ALI, 2016).

Uma opção seria utilizar filtros ativos. Esses modelos não interferem significativamente no fator de potência de deslocamento dos sistemas e em alguns casos são mais eficientes que os modelos passivos. Porém seu custo é mais elevado (PENG, 1998).

Referências

- CAMARGO, J. M. *Análise do desempenho térmico e vida útil de transformadores alimentando cargas não-lineares*. Dissertação (Mestrado) — UFU. Universidade Federal de Uberlândia, 2005. 16, 127
- CARVALHO, G. *Máquinas Elétricas*. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2014. v. 1. 1-20 p. 21, 22
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013. v. 1. 1-20 p. 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 70, 71, 126
- FIGUEIREDO, A. *Análise de Modelos para Cargas Não Lineares no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica*. Dissertação (Mestrado) — Unesp. Universidade Estadual Paulista, 2006. 35, 36
- FUCHS, E. Are harmonic recommendations according to ieee-519 and cei/iec-555 too restrictive? p. IV1–IV18, 01 2002. 15, 49, 50, 127
- IEEE-1459. Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, p. 1–50, 2010. 44, 45
- IEEE-519. Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, p. 1–29, 2014. 67, 106, 125, 127, 131, 132
- IEEE-C57.105. Ieee guide for application of transformer connections in three-phase electrical systems. *IEEE Std C57.105-2019 (Revision of IEEE Std C57.105-1978)*, p. 1–46, 2020. 18, 19, 20, 32
- IEEE-C57.110. Ieee recommended practice for establishing liquid-immersed and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents. *IEEE Std C57.110™-2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008)*, p. 1–68, 2018. 15, 16, 17, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 127
- JORDÃO, R. G. *Transformadores: teoria e ensaios*. 5. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2002. v. 1. 80 p. 18
- KAGAN, N.; ROBBIA, E.; SCHMIDT, H. P. *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. 6. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2009. v. 1. 1-20 p. 39
- KNESCHKE, T. A. Distortion and power factor of nonlinear loads. In: *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*. [S.l.]: IEEE, 1999. v. 1, p. 457–462. 36
- KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. 4. ed. Porto Alegre: Editora GLOBO, 1982. v. 1. 1-20 p. 25, 70

- KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKI, L. M. *Máquinas Eléctricas I*. Moscou: Editorial MIR, 1975. 18, 20, 22, 27, 28, 29, 30, 32
- LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. *Harmônicos em sistemas elétricos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. v. 1. 1-20 p. 43, 44, 45, 46, 47, 48
- PENG, F. Z. Application issues of active power filters. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 4, n. 5, p. 21–30, 1998. 37, 38, 39, 54, 70, 71, 128
- SANTOS, C. R. *Efeitos de cargas não-lineares no dimensionamento de transformadores trifásicos de distribuição*. Dissertação (Mestrado) — UFG. Universidade Federal de Goiás, 2012. 15, 16, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 127
- SILVA, D. C. L. *Contribuições para o estudo térmico em transformador a seco na presença de sub e inter-harmônicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2015. 16, 17, 127
- TAHER, M. A.; KAMEL, S.; ALI, Z. M. K-factor and transformer losses calculations under harmonics. In: *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 753–758. 16, 17, 128
- UMANS, S. D. *Máquina Eléctricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2014. 1-20 p. 18, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 70, 126

A IEEE-519: Prática recomendada e requisitos para controle de harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência

A recomendação IEEE-519 descreve os principais fenômenos responsáveis pelos harmônicos nos sistemas elétricos de potência, além de definir alguns métodos de medição desse harmônicos e seus limites, tanto para corrente quanto para tensão. Os valores referenciados nessa recomendação são relacionados aos Pontos de Acoplamento Comum (PCC) dos sistemas (IEEE-519, 2014).

Os limites definidos pela IEEE-519 se aplicam ao ponto de acoplamento comum (PCC) do sistema e são definidos de acordo com os níveis de tensão e de corrente de curto-circuito.

Tabela 9 – Limites de distorção das tensões

Tensão V no barramento PCC	Harmônico individual %	THD %
$V \leq 1\text{kV}$	5.0	8.0
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$V > 161\text{kV}$	1.0	1.5

Fonte: IEEE-519 (2014)

Os sistemas de alta tensão podem ter até 2,0% de THD em que a causa é um terminal HVDC cujos efeitos serão atenuados em pontos da rede onde futuros usuários podem ser conectados (IEEE-519, 2014).

Nas tabelas a seguir:

- I_{sc} é a corrente máxima de curto-circuito no PCC;
- I_L é a corrente de carga de demanda máxima (componente em frequência fundamental) no PCC em condições normais de operação.

Tabela 10 – Limites de distorção das correntes para sistemas com tensões entre 120 V e 69 kV

Corrente harmônica máxima em % da corrente de carga I_L						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD(%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: IEEE-519 (2014)

Os harmônicos pares são limitados a 25% dos limites de harmônicos ímpares citados na Tabela 10. Além disso, distorções de corrente que resultam em um deslocamento CC não são permitidas (IEEE-519, 2014).

Tabela 11 – Limites de distorção das correntes para sistemas com tensões entre 69 kV e 161kV

Corrente harmônica máxima em % da corrente de carga I_L						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD(%)
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Fonte: IEEE-519 (2014)

Tabela 12 – Limites de distorção das correntes para sistemas com tensões ≥ 161 kV

Corrente harmônica máxima em % da corrente de carga I_L						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD(%)
<25	1	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25 < 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: IEEE-519 (2014)