

Christel Enock Ghislain Ogoulola

**Estudo e Implementação de um Sistema
Multiconversor de 48 Pulsos (Conversor
CA/CC) empregando Transformadores
Especiais Trifásicos de Três Enrolamentos para
Mitigação de Harmônicos**

Brasil

Julho de 2017

Christel Enock Ghislain Ogoulola

**Estudo e Implementação de um Sistema Multiconversor
de 48 Pulsos (Conversor CA/CC) empregando
Transformadores Especiais Trifásicos de Três
Enrolamentos para Mitigação de Harmônicos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIFEI (área de concentração : Automação e Sistemas Elétricos Industriais), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Itajubá – Unifei

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Ângelo José Junqueira Rezek

Coorientador: Luiz Eduardo Borges da Silva

Brasil

Julho de 2017



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

**FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Título da Dissertação: **“Estudo e implementação de um sistema multiconversor de 48 pulsos (conversor CA/CC) empregando transformadores especiais trifásicos de três enrolamentos para mitigação de harmônicos”**

Autor: **Christel Enock Ghislain Ogoulola**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito A = Aprovado - R = Reprovado	Rubrica
1ª	A	<i>Adriana Ap. dos Santos Izidoro</i>
2º	A	<i>José Carlos Grillo Rodrigues</i>
3º	A	<i>Luiz Eduardo Borges da Silva</i>
4º	A	<i>Ângelo José Junqueira Rezek</i>

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, Aprovado

Observações: Acatar as sugestões da banca.

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
 - (2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.**

Itajubá, 20 de julho de 2017.

Adriana Ap. dos Santos Izidoro
Prof.ª Dr.ª Adriana Ap. dos Santos Izidoro
1º Examinador – INATEL

José Carlos Grillo Rodrigues
Prof. Dr. José Carlos Grillo Rodrigues
2º Examinador – UNIFEI

Luiz Eduardo Borges da Silva
Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva
3º Examinador (Coorientador) – UNIFEI

Ângelo José Junqueira Rezek
Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI



Termo de Autorização para Publicação de Teses e Dissertações
Eletrônicas no Repositório Institucional da UNIFEI (RIUNIFEI)

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação, autorizo o IBICT* e a Biblioteca Mauá a disponibilizar através do site repositorio.unifei.edu.br, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o texto integral da obra abaixo citada, conforme permissões assinaladas, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir da data abaixo.

1. Identificação do material bibliográfico: Tese Dissertação

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Programa de pós-graduação: Engenharia Elétrica

Área de Concentração (Tabela CNPq): Automação e Sistemas elétricos industriais

Título: Estudo e implementação de um sistema multiconversor de 48 pulsos

(conversor CA/CC) empregando transformadores especiais trifásicos de três enrolamentos para mitigação de harmônicos

Autor: Christel Enock Ghislain Ogoulola

E-mail: enock1989ogoulola@gmail.com CPF: 70000449695

Orientador: Angelo José Junqueira Rezek

E-mail: rezek@unifei.edu.br CPF: 41283929600

Co-orientador: Luit Eduardo Borges da Silva

E-mail: leborges@unifei.edu.br CPF: 31062083687

Número de páginas: 78

Data da Defesa: 20/07/2017

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para publicação: Total Parcial

Em caso de publicação parcial, assinale as permissões:

Sumário Capítulos. Especifique: _____

Bibliografia Outras restrições: _____

Assinatura do Autor

24/07/2017

Data

NADA CONSTA - BIBLIOTECA:

Jacques Roberto Balducci 24/07/17

A restrição (parcial ou total) poderá ser mantida por até um ano a partir da data de autorização da publicação. A extensão deste prazo suscita justificativa junto ao IBICT. Todo o resumo e os metadados ficarão sempre disponibilizados.
É imprescindível o envio do(s) arquivo(s) completo e/ou parcial em formato digital PDF da tese ou dissertação.

* IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

*Aos meus pais Evariste S. Ogoulola e Huguette M. Aitchedji,
por sempre estarem comigo espiritualmente em todos os momentos, por terem investido
na minha educação e por me terem incentivado a conquistar mais um objetivo.*

Agradecimentos

Agradeço a **Deus**.

Agradeço aos meus pais, **Evariste S. Ogoulola** e **Huguette M. Aitchedji**, por terem investido na minha educação e por me terem incentivado a conquistar mais um objetivo.

Agradeço ao meu orientador, **Ângelo José Junqueira Rezek**, por todos os conselhos, pela paciência e ajuda e pela filosofia dele de trabalhar durante esses últimos dois anos.

Agradeço aos meus professores **Luiz Eduardo Borges da Silva**, **Robson Bauwelz Gonzatti** e **Rondineli Rodrigues Pereira** pelos conhecimentos dados através das aulas presenciais.

Aos meus irmãos **Flore**, **Carolle**, **Prisca**, **Hermine**, **Oscar**, **Claudia**, **Gildas**, **Rosine** e **Rosette**, **Carine**, a quem privei de bons momentos de convívio por causa da distância.

À meu cunhado, irmão e grande amigo **Zacharie Assedé** por ter contribuído através dos conhecimentos dados durante meu curso de graduação em Engenharia Elétrica.

Aos meus amigos do Brasil e do Benin.

À minha bem amada **Wanessa Cristina Dias Ribeiro**, pela compreensão, ajuda e apoio nos momentos mais difíceis.

À minha sogra **Ângela Maria Dias** por todas as ajudas incondicionais durante esses últimos dois anos.

À **CAPES** pelo apoio financeiro durante o curso de Mestrado para realização deste trabalho de pesquisa.

E finalmente agradeço aos mestres, aos amigos e a todas as pessoas que ajudaram e colaboraram para a conclusão deste trabalho, fosse por um conselho ou mesmo por uma conversa.

*“Ser intelectual e fazer parte dos intelectuais,
são duas coisas que simultaneamente,
se identificam e opõem.”
(Edgar Morin)*

Resumo

Este trabalho propõe uma novidade para implementação de sistema multi-conversor de 48 pulsos (conversor CA/CC), para aplicação na indústria de alumínio, para extração deste, em processos que exigem correntes da ordem de centenas de quilo-ampères [kA]. Uma mitigação harmônica, é portanto bastante necessária, para que a rede enxergue uma corrente praticamente senoidal, evitando-se, desta forma, poluição harmônica para os demais consumidores do sistema. Transformadores especiais, unidades idênticas, de três enrolamentos, com conexão primária especial delta estendido e conexões convencionais, secundária estrela e terciária delta, respectivamente, são apresentados e descritos, para viabilização de aplicação deste novo sistema com favorecimento acentuado no aspecto de facilidade de manutenção, menor custo e espaço físico necessário. Um autotransformador especial também foi apresentado para propiciar a implementação do multi-converter de 48 pulsos. O protótipo versão laboratório deste sistema foi apresentado, implementado e simulado em Matlab/Simulink[®] 2014 cujas diferentes curvas tais que a tensão e corrente da fonte e da carga foram analisadas.

Palavras-chave: sistema multi-conversor, mitigação harmônica, extração de alumínio.

Abstract

This work is the proposal of a novelty for implementing of 48 pulse multiconverter system (AC/DC converter) for application in the aluminum industry, for extraction of this, in processes that require very high currents on the order of hundreds of [kA]. A harmonic mitigation is therefore quite necessary for the purpose of propitiating to the network, to that it sees a substantially sinusoidal current, avoiding, in this way, harmonic pollution to the electrical system, with the result of subsequent problems for other system users. Identical units of three-winding special transformers, with special extended delta primary connection and conventional connections, secondary star and tertiary delta, respectively, will be presented and described, for feasibility of application of this new system to be described at work, in the aluminum industry, with sharp favoritism with respect to ease of maintenance and lower cost and physical space required. A special autotransformer is also presented in order to propitiate the implementation of the 48 pulse multiconverter. The prototype laboratory version of this system was presented, implemented and simulated in Matlab / Simulink[®] 2014 whose different curves such that the voltage and current of the source and the load were analyzed for several decision making.

Keywords: multiconverter, harmonic mitigation, aluminum extraction.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Protótipo de transformadores de três enrolamentos do sistema conversor de 24 pulsos.	22
Figura 2 – Forma de onda e o espectro harmônico da corrente de linha de um sistema conversor de 24 pulsos.	23
Figura 3 – Sistema multi-conversor de 48 pulsos com configuração em série.	23
Figura 4 – Sistema multi-conversor de 48 com configuração em paralelo.	24
Figura 5 – Arranjo experimental proposto empregando transformadores especiais de três enrolamentos com configuração em serie.	25
Figura 6 – Arranjo experimental proposto empregando transformadores especiais de três enrolamentos com configuração em paralelo.	25
Figura 7 – Bancada de sistema multi-conversor para transformadores especiais de dois enrolamentos.	26
Figura 8 – Aplicações recentes dos transformadores especiais em acionamentos de grande potência.	27
Figura 9 – Configuração em ponte Graetz.	30
Figura 10 – Formas de onda ponte Graetz	30
Figura 11 – Associação em paralelo de retificadores não controlados.	32
Figura 12 – Implementação do conversor de 12 pulsos em Matlab/Simulink	33
Figura 13 – Forma de onda da tensão da fonte do conversor de 12 pulsos	35
Figura 14 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 12 pulsos	35
Figura 15 – Forma de onda da tensão do lado da carga do conversor de 12 pulsos	36
Figura 16 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 12 pulsos	36
Figura 17 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 12 pulsos	36
Figura 18 – Transformador estrela/zigue-zague.	40
Figura 19 – Diagrama fasorial do transformador estrela/zigue-zague ($YZ : 30^\circ$)	40
Figura 20 – Diagrama fasorial do transformador estrela/zigue-zague	41
Figura 21 – Transformador estrela/delta estendido.	42
Figura 22 – Diagrama fasorial do transformador estrela/delta estendido.	43
Figura 23 – Aspecto qualitativo forma de ondas de tensão e da corrente	45
Figura 24 – Diagrama fasorial para obtenção dos tapes do autotransformador ADZ	46
Figura 25 – Autotransformador ADZ	47
Figura 26 – Sistema conversor de 24 pulsos	50
Figura 27 – Tensão instantânea em uma das pontes retificadoras e valor médio da tensão na carga.	51
Figura 28 – Enrolamentos do transformador.	54
Figura 29 – referencia magnética.	55

Figura 30 – Transformador especial trifásico.	55
Figura 31 – Autotransformador trifásico.	56
Figura 32 – Transformador de interfase.	56
Figura 33 – Blocos elaborados e personalizados dos transformadores.	56
Figura 34 – Configuração do "Solver configuration".	57
Figura 35 – Esquema do sistema de 24 pulsos implementado em Simulink.	57
Figura 36 – Forma de onda da tensão da fonte do conversor de 24 pulsos	59
Figura 37 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 24 pulsos	59
Figura 38 – Forma de onda da tensão na carga do conversor de 24 pulsos	59
Figura 39 – Forma de onda da corrente na carga do conversor de 24 pulsos	60
Figura 40 – Forma de ondas das tensões nos retificadores.	60
Figura 41 – Espectro de harmônico do sistema de 24 pulsos	60
Figura 42 – Tensão instantânea em uma das pontes retificadoras e valor médio da tensão na carga	65
Figura 43 – Esquema do sistema de 48 pulsos implementado em Simulink.	66
Figura 44 – Forma de onda da tensão da fonte do conversor de 48 pulsos	67
Figura 45 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 48 pulsos	67
Figura 46 – Forma de onda da tensão na saída do autotransformador	68
Figura 47 – Forma de onda da tensão na carga do conversor de 48 pulsos	68
Figura 48 – Forma de onda da corrente na carga do conversor de 48 pulsos	68
Figura 49 – Forma de ondas das tensões de saída nos dois grupos de 24 de retificadores.	69
Figura 50 – Espectro de harmônico do sistema de 48 pulsos	69
Figura 51 – Transformador trifásico com três enrolamentos.	77
Figura 52 – Autotransformador trifásico ADZ	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do retificador	34
Tabela 2 – Valores dos parâmetros do transformador	34
Tabela 3 – Tapes N_2 e N_3 para o transformador estrela/zigue-zague	41
Tabela 4 – Tapes necessários para obtenção de conversor de 48 pulsos com transformadores estrela/delta-estendido	44
Tabela 5 – Cálculo de N_2 e N_3 em função de N_1 para o transformador estrela/zigue-zague (Y/Z)	44
Tabela 6 – Cálculo de N_2 e N_3 em função de N_1 para o transformador estrela/delta-estendido	45
Tabela 7 – Valores dos parâmetros do retificador	58
Tabela 8 – Valores dos parâmetros do transformador especial	58
Tabela 9 – Valores dos parâmetros do transformado de interfase	58
Tabela 10 – Valores dos parâmetros do autotransformador	66
Tabela 11 – Tabela de comparação de THD	70

Lista de abreviaturas e siglas

CSI	Current source inverter
COBEP	Congresso Brasileira de Eletrônica de Potencia
ICHQP	International Conference of Harmonics in Power Systems
THD	Taxa de distorção harmônica
HVDC	High voltage direct current
ADZ	Autotransformador defasador

Lista de símbolos

$cn = N_2, X_{1c} = N_3$	Número de espiras do primário
N_1	Número de espiras do secundário
N_4	Número de espiras do terciário
DZ	Transformadores delta zigue-zague
YD	Transformadores estrela delta estendido
YY	Transformadores estrela estrela
L	Indutância de interfase
V_0	Tensão eficaz de fase
V_{linha}	Tensão eficaz de linha
V_{med}	Tensão média na carga
N	Número de pontes conversores
n	Número de pulsos
A	Angulo de defasagem entre as pontes
H	Ordem harmônica característica da corrente de alimentação
h	Ordem harmônica
I_h	Valor rms da componente corrente harmônica h
I_1	Valor de corrente fundamental
FP_v	Fator de potência verdadeiro
DFP	Fator de potência de deslocamento
K_a, K_b, K_c	Valores dos taps do secundário do autotransformador
V_{carga}	Tensão na carga
$V_m = V_{pico}$	Tensão pico para o conversor de 24 e 48 pulsos
V'_{pico}	Tensão pico em cada retificador

V_{Ti}	Tensão do transformador de interfase
Δi_{Ti}	Variação da corrente no transformador de interfase
L_{Ti}	Indutância do transformador de interfase
P_{carga}	Potência ativa da carga
Z	Impedância da carga
R, L	Resistência e indutância da carga

Sumário

	Introdução geral	17
1	DESCRIÇÃO E ELABORAÇÃO DA PROPOSTA DO TRABALHO	20
1.1	Objetivo do trabalho	20
1.2	Metodologia a ser adotada	21
1.3	Implementação a ser efetuada	24
1.4	Perspectivas de aplicação prática do trabalho a ser desenvolvido	26
2	SISTEMA CONVERTOR DE 12 PULSOS UTILIZANDO TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS	29
2.1	Associação de retificadores de 6 pulsos	29
2.2	Convertor de 12 pulsos	32
2.3	Implementação do sistema de 12 pulsos em Matlab/Simulink®	33
2.4	Análise das formas de onda de tensão e de corrente CC na saída do retificador	33
2.5	Análise das formas de onda de tensão e de corrente CC na saída do retificador	34
3	METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA O SISTEMA DE 48 PULSOS	39
3.1	Transformadores conectados em zigue-zague	39
3.2	Transformadores conectados em delta estendido	42
3.3	Comparação entre as conexões zigue-zague e delta estendido	44
3.4	Tapes de enrolamento do autotransformador ADZ 7,5°	45
4	IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DO CONVERTOR DE 24 PULSOS EM MATLAB/SIMULINK®	49
4.1	Apresentação do sistema de 24 pulsos	49
4.2	Dimensionamento dos componentes do sistema	50
4.2.1	Dimensionamento do transformador de interfase para o conversor de 24 pulsos	50
4.2.2	Dimensionamento da carga	53
4.3	Elaboração dos blocos em Matlab/simulink®	54
4.4	Simulação do sistema e resultados obtidos	57
5	IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE 48 PULSOS EM MATLAB/SIMULINK®	63
5.1	Apresentação do sistema de 48 pulsos	63
5.2	Dimensionamento dos componentes	63

5.2.1	Dimensionamento do transformador de interfase para o conversor de 48 pulsos	63
5.3	Simulação do sistema e apresentação dos resultados obtidos	66
5.4	Consideração final	70
	Conclusão geral	71
	Referências	72
	 APÊNDICES	 75
	APÊNDICE A – PREVISÃO DE EQUIPAMENTOS	76
A.1	Especificações dos equipamentos necessários	76
A.1.1	Transformadores de três enrolamentos especial	76
A.1.2	Autotransformador defasador especial trifásico, tipo ADZ	76
A.1.3	Transformador especial estrela delta estendido	76
	 APÊNDICE B – TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS ESPECIAIS E AUTOTRANSFORMADOR CONSTRUÍDOS	 77

Introdução geral

Transformadores com conexões convencionais estrela-delta não propiciam defasamentos necessários para sistemas multi-conversores acima de 12 pulsos, por exemplo, sistemas multi-conversores de 24 e 48 pulsos. Nestes casos, defasagens não convencionais diferentes de 30° quais sejam respectivamente 15° e $7,5^\circ$ são necessárias nas tensões de alimentação das pontes conversores em ligação graetz, podendo estas ser do tipo não controladas a diodos ou controladas a tiristores.

Entretanto, sistemas convencionais de 24 pulsos e 48 pulsos utilizam respectivamente quatro ou oito transformadores especiais com conexões não convencionais diferentes, portanto das conexões estrela-delta, devendo estas serem do tipo zigue-zague e /ou delta estendido. Estas defasagens não convencionais são obtidas por intermédio de alterações adequadas dos números de espiras dos enrolamentos das conexões, isto é, variando-se convenientemente o número de espiras das conexões secundárias relativamente ao número de espiras da conexão primária. Pretende-se utilizar transformadores de três enrolamentos, em vez de transformadores de dois enrolamentos, minimizando-se, desta forma, o número de transformadores utilizados no projeto, com benefícios diretamente relacionados a custo, espaço e manutenção. Assim, para 24 pulsos, em vez de quatro transformadores especiais, será proposta a utilização de dois transformadores especiais de três enrolamentos, com conexões delta estendido ou zigue-zague, no primário $7,5^\circ$ e estrela 0° , delta 30° nos enrolamentos secundário e terciário, respectivamente. Esta configuração existe no sistema VSD da Petrobrás em algumas plataformas, para conversores retificadores tiristorizados utilizados no sistema de acionamento do motor síncrono, do tipo CSI (current source inverter), comutadorless DC motor, ou seja, inversor tipo fonte de corrente, acionamento por motor síncrono, sem comutador .

A novidade deste trabalho está na implementação de um sistema conversor de 48 pulsos, ou seja, constituído por dois conversores de 24 pulsos, utilizando os transformadores descritos acima mas incluindo na configuração um autotransformador especial ADZ [1, 2]. Este autotransformador especial ADZ propicia a defasagem necessária de $7,5^\circ$ para a obtenção do sistema multi-conversor de 48 pulsos. Ainda na literatura, não foi apresentada esta topologia. Um artigo apresentado e publicado no Congresso Brasileira de Eletrônica de Potência (COBEP 2001), realizado na cidade de Florianópolis em 2001, foi utilizado como fonte de consulta principal para a apresentação da metodologia de cálculos necessária ao projeto. Este artigo é intitulado "Comparative Analysis between phase-shifters transformers for application in multi-converters systems"[3]. Outro artigo intitulado "Modelling and Implementation of a 48 pulse multi-converter", publicado em ICHQPS VI (International Conference of Harmonics in Power Systems) [2], realizada na cidade de Bologna, Itália, em

setembro de 1994, páginas de 50 a 54, foi também utilizado para auxílio na metodologia de cálculos.

Esta dissertação tem o objetivo de implementar um novo protótipo de um sistema multi-conversor de 48 pulsos em Matlab/Simulink[®] 2014 utilizando transformadores especiais trifásicos para redução de harmônicos. O trabalho foi estruturado em cinco capítulos.

- **Capítulo 1: Descrição e elaboração da proposta do trabalho** – foi descrita neste capítulo, a proposição da novidade que requer este projeto e o sistema a ser implementado (comparando com os outros existentes) foi mostrado e explicado;
- **Capítulo 2: Sistema conversor de 12 pulsos utilizando transformadores de três enrolamentos** – Foi descrito nesta parte, o conversor de 12 pulsos, os resultados e as características foram mostrados;
- **Capítulo 3: Metodologia de cálculos para o sistema de 48 pulsos** – o objetivo deste capítulo, é apresentar a metodologia de cálculos para obtenção das defasagens e tensões necessárias dos transformadores especiais;
- **Capítulo 4: Implementação e simulação do sistema multi-conversor de 24 pulsos em Matlab/Simulink[®]** – foi realizada e mostrada após o estudo detalhado, uma simulação deste sistema em Matlab/Simulink[®] e os resultados provenientes da simulação têm sido mostrados e analisados;
- **Capítulo 5: Implementação e simulação do sistema multi-conversor de 48 pulsos em Matlab/Simulink[®]** – Baseando sobre a metodologia empregada para simulação do sistema de 24 pulsos, foi simulado também o sistema multi-conversor de 48 pulsos e os resultados obtidos foram apresentados;

Capítulo 1

1 Descrição e elaboração da proposta do trabalho

Consideração inicial

O projeto desenvolvido nessa dissertação foi precisamente intuitivo pois os sistemas de 6, 12, 24 e mesmo até 48 pulsos com configuração tanto em série quanto em paralelo já existem na literatura, porém o de nosso trabalho foi realizado de uma forma diferente em relação à configuração, aplicando os mesmos conceitos básicos encontrados nos artigos e livros. Este capítulo trata-se realmente da configuração do protótipo e articula-se em cinco etapas:

- O objetivo do trabalho;
- A metodologia;
- A implementação a ser efetuada em Matlab/Simulink[®];
- As perspectivas de aplicação prática do trabalho a ser desenvolvido.

1.1 Objetivo do trabalho

Pretende-se implementar um sistema multi-conversor até 48 pulsos de 8 [kVA], para verificação da mitigação harmônica na corrente de alimentação de rede deste sistema. A novidade da proposta consiste na implementação de uma nova topologia cujas vantagens são entre outras: custo, facilidade de manutenção e menor espaço físico, em relação aos sistemas usuais existentes. Para tal serão projetados e empregados transformadores especiais de três enrolamentos associados a um autotransformador especial de defasamento.

A mitigação harmônica é interessante, pois os conversores estáticos injetam correntes harmônicas no sistema elétrico e os harmônicos causam, como é conhecido, muitos problemas indesejáveis ao sistema de distribuição de energia elétrica, podendo-se citar perdas adicionais em máquinas elétricas e transformadores, com diminuição da eficiência elétrica do sistema, sobretensões em sistemas de comunicação, dentre outros. Assim, uma mitigação harmônica é bastante desejável nos sistemas elétricos de potência, com melhoria da eficiência do sistema, devido a redução de perdas na distribuição de energia elétrica, motivo pelo qual se propõe este trabalho de pesquisa como dissertação de mestrado.

1.2 Metodologia a ser adotada

Propõe-se para este trabalho uma proposta de mitigação harmônica, com a simulação de protótipo de sistema conversor estático de 24 e 48 pulsos em Matlab/Simulink[®] [2, 4–7]. Sabe-se que duas soluções são adotadas para eliminação de harmônicos gerados por conversores estáticos, os quais causam uma série de problemas ao sistema elétrico, quais sejam: instalação de filtros passivos e mais recentemente ativos e/ou aumento do número de pulsos do sistema conversor. Como revisão da literatura, ressalta-se que a novidade na proposta para a pesquisa está na implementação de um sistema conversor até 48 pulsos de menor custo, com excelente mitigação harmônica, pois a forma de onda da corrente vista pelo sistema elétrico é praticamente senoidal. Para tal, será proposto um protótipo de transformador de três enrolamentos, portanto mais simples e barato, com primário em delta estendido ou zigue-zague, 7, 5° e secundário e terciário com conexões convencionais estrela (secundário) e delta (terciário).

Para obtenção do sistema conversor de 24 pulsos, o mesmo protótipo será utilizado, bastando, apenas, que seja feita a inversão da sequência de fases no primário de uma das duas unidades do sistema multi-conversor de 24 pulsos. Portanto, apenas dois transformadores especiais de três enrolamentos são necessários para se conseguir o sistema de 24 pulsos, em vez de quatro transformadores de dois enrolamentos como usualmente é conhecido na literatura. Resulta, portanto, em um sistema bem mais simples e de custo menor que os usualmente conhecidos e utilizados, além, evidentemente de facilidade de manutenção, uma vez que as quatro unidades dos transformadores de três enrolamentos são idênticas e também menor espaço necessário.

Para a obtenção do sistema de 48 pulsos, mais duas unidades serão utilizados, para formar um segundo sistema de 24 pulsos, este alimentado no primário por um autotransformador defasador, ADZ 7, 5° graus. A utilização deste autotransformador para a obtenção do sistema conversor de 48 pulsos é também novidade para justificar a excelente conveniência desta presente proposição de implementação do trabalho de pesquisa, com custo reduzido e resultados esperados excelentes para mitigação harmônica. Este fato e consiste, portanto, na contribuição mais significativa deste trabalho de pesquisa, para possibilitar uma melhor eficiência energética do sistema, uma vez que o protótipo a ser desenvolvido poderá ser utilizado com excelentes resultados de mitigação harmônica na indústria, conseguindo-se conversores de até 48 pulsos [1, 8–11] e utilizando-se para tal equipamentos mais baratos e igualmente confiáveis consistindo este fato num aspecto bastante favorável de revisão da literatura, pois a proposta apresentada para implementação deste sistema multi-conversor de 48 pulsos é novidade.

A figura 1 ilustra o transformador de três enrolamentos, protótipo da pesquisa, descrito na referência [12], utilizado para obtenção do sistema conversor de 24 pulsos, no qual dois transformadores de três enrolamentos deverão ser empregados.

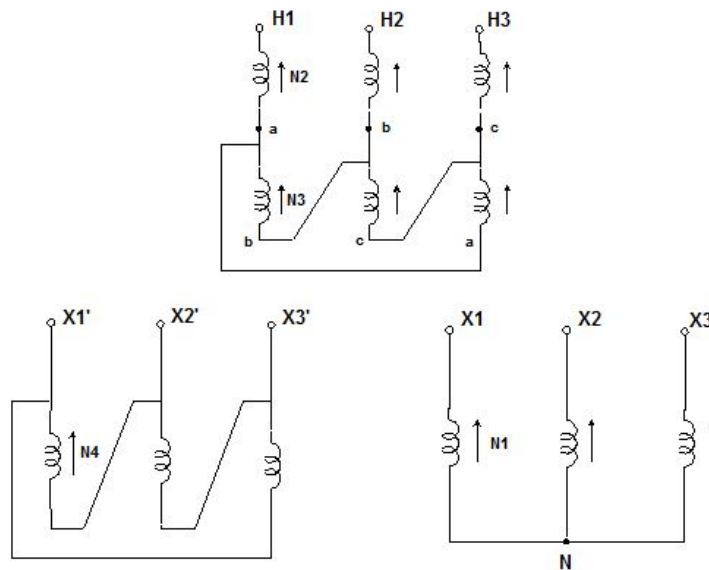


Figura 1 – Protótipo de transformadores de três enrolamentos do sistema conversor de 24 pulsos.

Variando-se convenientemente os números de espiras N_1 e N_4 , em função de N_2 e N_3 , consegue-se variar convenientemente a defasagem necessária e obtenção da relação de transformação necessária. Trabalhos publicados de nosso grupo de pesquisa apresentam os arranjos de sistemas multi-conversores [11, 13–15]. Pretende-se então implementar dois protótipos de 24 pulsos de potência 4 [kVA], para que se consiga um protótipo de 48 pulsos de potência 8 [kVA] e para tal já se contataram fabricantes de transformadores especiais.

A figura 2 apresenta a forma da onda e o espectro harmônico da corrente de linha de um sistema conversor de 24 pulsos.

Observa-se, analisando a figura 2, que a forma de onda da corrente é aproximadamente senoidal e o primeiro harmônico característico existente é o de ordem 23, com amplitude bem reduzida. Para um sistema de 48 pulsos, que pretende-se implementar, a mitigação harmônica será ainda maior, com a corrente de linha vista pela rede praticamente senoidal.

As figuras 3 e 4 ilustram um sistema multi-conversor de 48 pulsos utilizando oito transformadores especiais de dois enrolamentos e um autotransformador defasador especial. A figura 6 ilustra o arranjo experimental da proposta de multi-conversor de 48 pulsos empregando transformadores de três enrolamentos e autotransformador defasador [1, 2]. Esta é de fato a grande contribuição do trabalho proposto, ou seja obtenção de um sistema multi-conversor simples e econômico, e de manutenção facilitada, e utilizando menor espaço físico, com a utilização de autotransformador defasador também de baixo custo [1, 2] ou



Figura 2 – Forma de onda e o espectro harmônico da corrente de linha de um sistema conversor de 24 pulsos.

como opção para pesquisa, justifica-se também, a comparação de resultados utilizando-se transformador defasador de dois enrolamentos [16], ao invés de autotransformador.

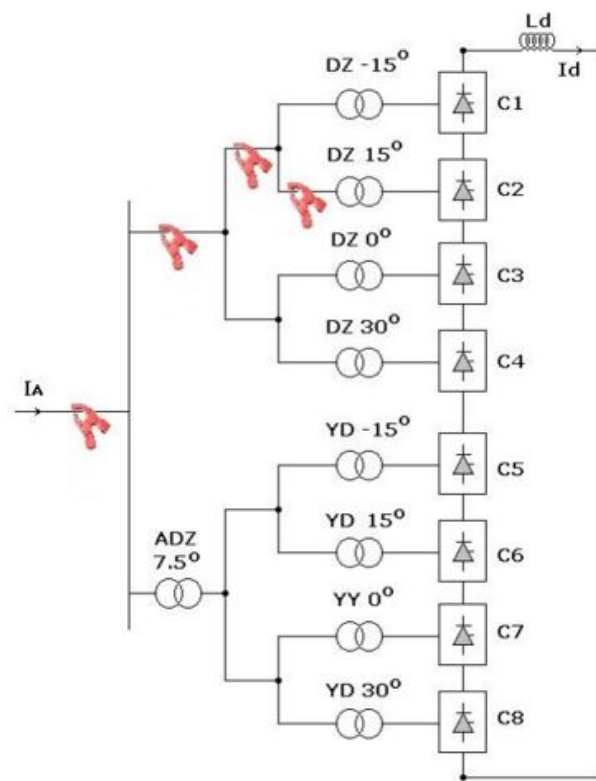


Figura 3 – Sistema multi-conversor de 48 pulsos com configuração em série.

Nas figuras 3 e 4 mostram-se em vermelho as pinças hall de corrente, para captação

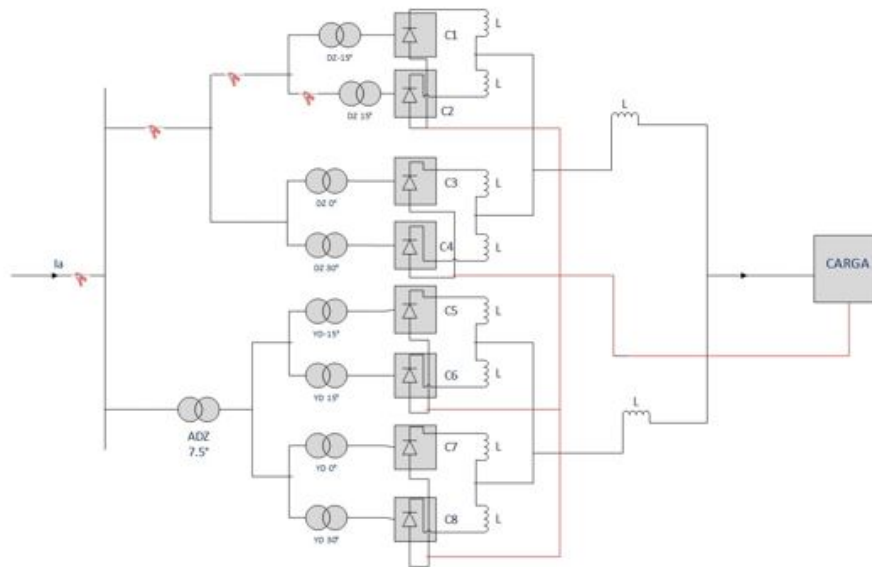


Figura 4 – Sistema multi-conversor de 48 com configuração em paralelo.

de corrente em diversos pontos do sistema multi-conversor. Nas figuras 3 e 4, tem-se:

- $DZ\ 15^\circ$; $DZ\ -15^\circ$ transformadores de lâmina zig-zag
- $YD\ 15^\circ$; $YD\ -15^\circ$ transformadores estrela delta estendido
- $YY\ 0^\circ$ transformador estrela estrela
- $YD\ 30^\circ$, transformador estrela delta convencional

Sendo L : Indutância do reator de interfase ou do transformador de interfase [17–19].

Para aplicação na indústria do alumínio na qual o processo de extração é realizado, exigindo-se para tais correntes da ordem de centenas de kA , o arranjo paralelo deverá ser preferencialmente utilizado, por possibilitar correntes mais elevadas.

1.3 Implementação a ser efetuada

Será construída uma bancada para abrigar os instrumentos e equipamentos necessários ao projeto, como transformadores, pontes e medidores, com quatro frontal sinótico do sistema e bornes para ligações convenientes. Esta bancada será construída de metalon e madeira, ficando o sistema de testes desta forma mais adequado, versátil e eficiente, evitando-se, assim, curtos circuitos e maus contatos inconvenientes, na fase de testes e

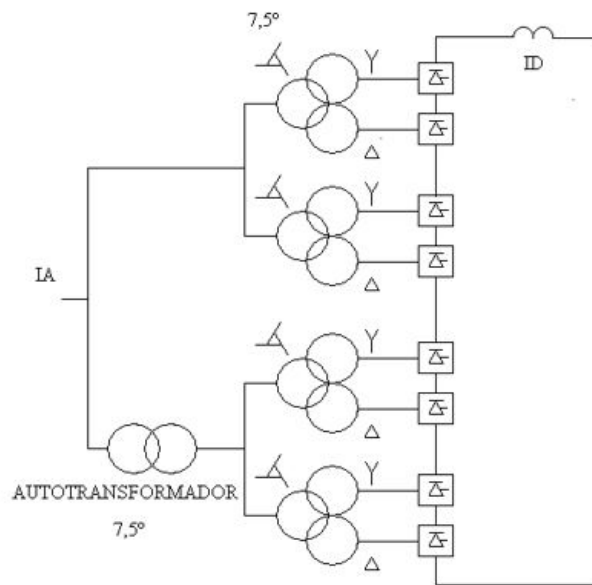


Figura 5 – Arranjo experimental proposto empregando transformadores especiais de três enrolamentos com configuração em serie.

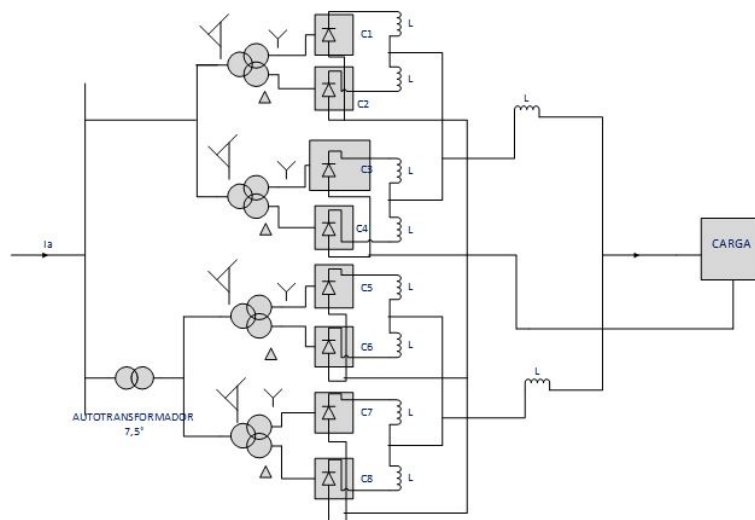


Figura 6 – Arranjo experimental proposto empregando transformadores especiais de três enrolamentos com configuração em paralelo.

obtenção de resultados. Ressalta-se, que existem disponíveis no laboratório recursos para construção da mesma. A bancada será útil e eficiente para demonstrações práticas do protótipo a ser desenvolvido, favorecendo desta forma, aulas práticas pertinentes desta e de futuras pesquisas afins.

A figura, ilustra uma bancada anteriormente implementada, utilizando transfor-

madores especiais, mas de dois enrolamentos (fig. 3) ao invés dos de três enrolamentos propostos neste trabalho, estes mais econômicos e compactos e com aspectos amplamente favoráveis relativamente à manutenção e espaço físico necessário, pois estão previstas quatro unidades idênticas. Na figura 3 as pontes representadas são do tipo controladas a tiristores, mas na implementação proposta serão inicialmente consideradas pontes não controladas a diodos.

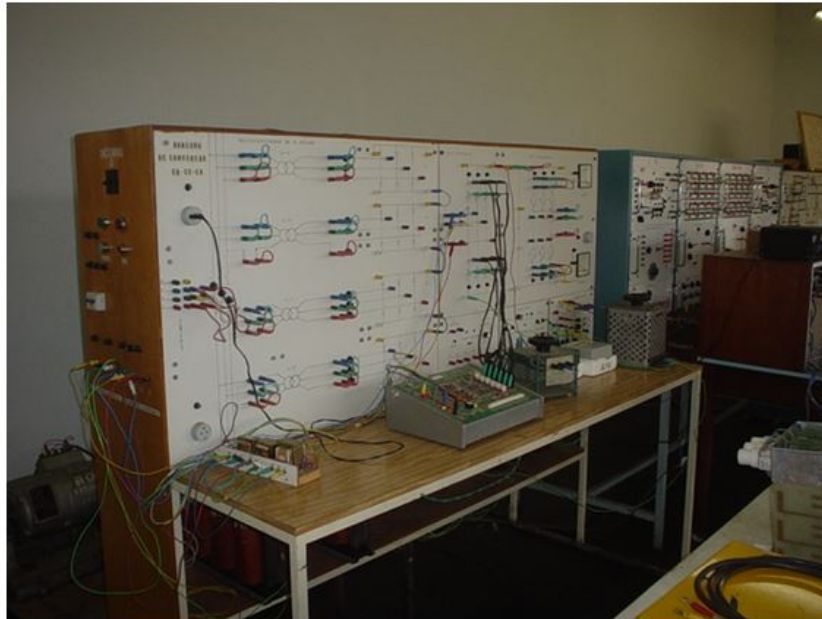


Figura 7 – Bancada de sistema multi-conversor para transformadores especiais de dois enrolamentos.

Uma bancada similar a da figura 7, tipo protótipo, será portanto implementada para maior facilitação e eficiência didática do trabalho de pesquisa apresentado nesta dissertação.

1.4 Perspectivas de aplicação prática do trabalho a ser desenvolvido

O protótipo de sistema multi-conversor é interessante para aplicação na indústria de mineração em processos de altas correntes exigidas, da ordem de $[kA]$, como extração e refino de metais, por exemplo, na utilização em indústria de extração de alumínio, que pode empregar o arranjo da figura 4, mas com as pontes conversoras conectadas em paralelo em vez da conexão série, devido à alta corrente do processo. Serão previstas no projeto oito pontes conversoras de 6 pulsos em configuração GRAETZ, do tipo não controladas a diodos, conforme mostrado anteriormente na figura 4. Também será disponibilizada, para a

indústria e serviços auxiliares de subestações, retificadores industriais de alta performance, quanto ao aspecto de excelente mitigação harmônica. Na indústria de extração de alumínio, em que são necessárias altas correntes da ordem de centenas de $[kA]$, a utilização de sistemas conversores multi-pulsos, com as pontes conversoras conectadas em paralelo é indicada, para a não ocorrência de perturbações harmônicas no sistema, devido a esta alta corrente necessária, para viabilização do processo. Também menciona-se a aplicação da bancada para fins de aulas práticas em disciplinas de graduação e pós-graduação e outras pesquisas. A figura 8 ilustra também recentes e modernas aplicações dos transformadores especiais do tipo da proposta de pesquisa descrita neste trabalho, em acionamentos elétricos de grande potência e alta confiabilidade para aplicações na indústria de petróleo, para acionamento de bombas ventiladores e compressores de elevada potência, em plataformas marítimas [16, 20]. Esta aplicação está mencionada, apenas a título de realce de mais, importantes e recentes aplicações de transformadores especiais de defasamento em sistemas industriais de última geração.

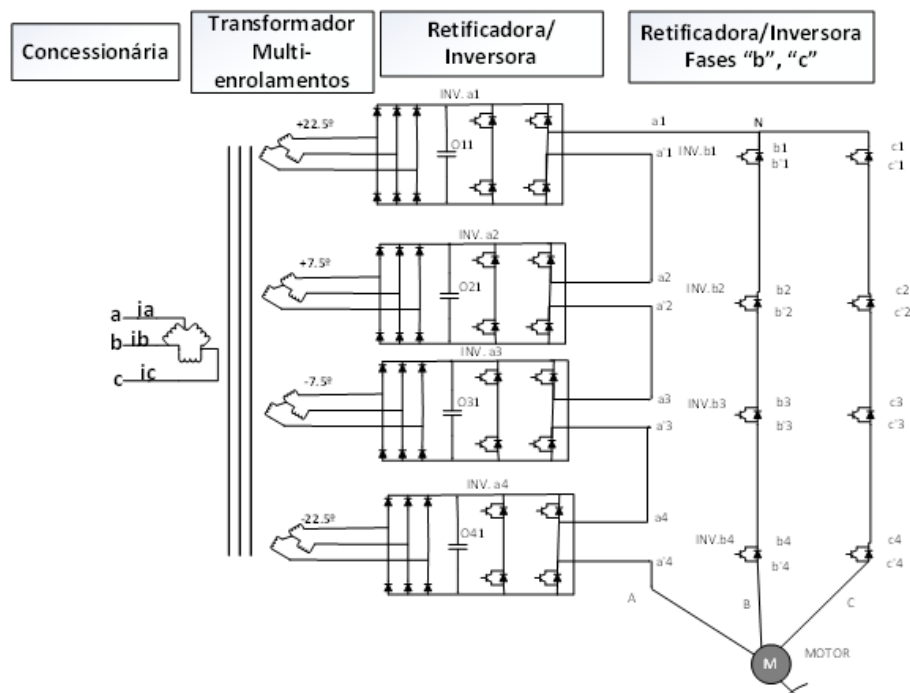


Figura 8 – Aplicações recentes dos transformadores especiais em acionamentos de grande potência.

Consideração final

A proposta do sistema multi-conversor de 48 pulsos apresentado neste capítulo apresenta vantagens no aspecto de facilidades de manutenção e de menor custo por utilizar quatro unidades idênticas de transformadores de três enrolamentos (fig 1), portanto mais baratos, com facilidade de substituição, e menor ocupação de espaço físico.

Capítulo 2

2 Sistema conversor de 12 pulsos utilizando transformadores de três enrolamentos

Consideração inicial

O fornecimento de energia elétrica é feito, essencialmente, a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada, devido, principalmente, à facilidade de adaptação do nível de tensão por meio de transformadores. Em muitas aplicações, no entanto, a carga alimentada exige uma tensão contínua. A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados retificadores [21].

Os retificadores podem ser classificados segundo a sua capacidade de ajustar o valor de tensão de saída (controlados e não-controlados); de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, hexafásico, etc.); em função do tipo de conexão dos elementos retificadores (meia ponte e ponte completa). Os retificadores não-controlados são aqueles que utilizam diodos como elementos de retificação, enquanto os controlados utilizam tiristores ou transistores [21].

Transformadores com três ou mais enrolamentos, conhecidos como transformadores de múltiplos enrolamentos, são usados frequentemente para interconectar três ou mais circuitos que podem ter tensões diferentes. Para esses propósitos, um transformador de múltiplos enrolamentos custa menos e é mais eficiente do que um número equivalente de transformadores de dois enrolamentos [21]. Foi analisado e simulado neste capítulo, o conversor de 12 pulsos utilizando transformador trifásico de três enrolamentos e também foi estruturado da seguinte forma:

- Associação de retificadores de 6 pulsos;
- Conversor de 12 pulsos;
- Implementação e simulação do sistema de 12 pulsos em Matlab/Simulink[®];
- Análise das formas de onda de tensão e de corrente CC na saída do retificador;

2.1 Associação de retificadores de 6 pulsos

O conversor retificador não controlado de seis pulsos trifásico, também conhecido como ponte GRAETZ, é uma das estruturas mais empregadas industrialmente. Sua configuração típica encontra-se na figura 9 e as formas de ondas correspondentes a esta configuração, operando em condições equilibradas, encontra-se na figura 10. As formas

de onda permitem chegar a tensão média no lado CC através da integral 2.1, e uma boa aproximação numérica para resolução da integral em função da tensão de fase-neutro eficaz em 2.2 que serão de interesse para o estudo do conversor [22].

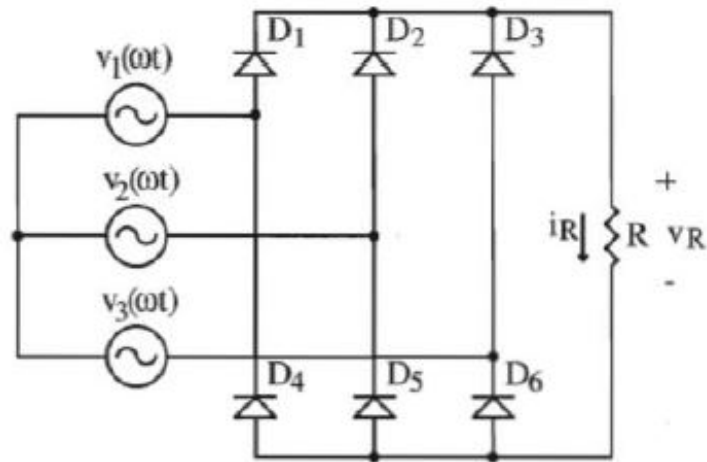


Figura 9 – Configuração em ponte Graetz.

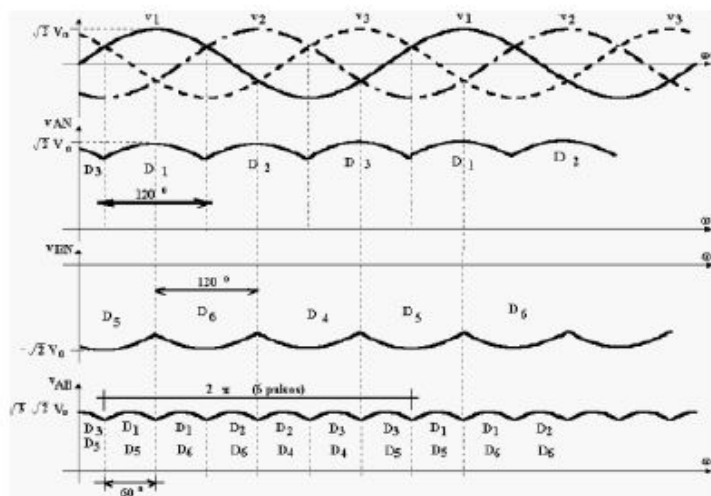


Figura 10 – Formas de onda ponte Graetz

$$V_{cmed} = \frac{3}{\pi} \times \int_{\frac{\pi}{6}}^{-\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_0 \times \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (2.1)$$

$$V_{cmed} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_0 \approx 2.34 \times V_0 \quad (2.2)$$

V_0 – Tensão eficaz de fase

V_{cmed} – Tensão média na carga (CC)

O aumento no número de pulsos do sistema conversor é obtido através da associação série ou paralelo de conversores de seis pulsos, denominados multi-conversores (12 pulsos neste caso). Estes sistemas apresentam uma excelente redução de harmônicos de menor ordem e fator de potência mais elevado conforme o aumento do número de pulsos [11].

A conexão dos conversores em série ou paralelo dependem da aplicação, sendo que a configuração das pontes em série apresenta uma maior tensão na saída CC, devido a soma das tensões CC fornecidas por cada ponte, enquanto a associação em paralelo apresenta maior corrente relacionado a soma das correntes, distinguindo a aplicação destas duas configurações [22].

O número de pulsos de um sistema conversor está originalmente relacionado ao número de pulsações da tensão contínua de saída do conversor, dentro de um intervalo de tempo correspondente a um período da frequência fundamental. Temos então uma metodologia geral para a formação de sistemas multi-conversores em (2.3), (2.4), (2.5) [23].

$$N = \frac{n}{6} \quad (2.3)$$

$$A = \frac{360}{n} \quad (2.4)$$

$$H = k.n \pm 1 (k = 1, 2, 3...) \quad (2.5)$$

N – número de pontes conversores;

n – número de pulsos;

A – Ângulo de defasagem entre as pontes;

H – Ordem harmônica característica da corrente de alimentação.

Através da expressão que mostra a ordem de harmônicos característicos, pode-se observar que o aumento no número de pulsos traz uma redução de harmônicos de ordem mais baixa, os quais apresentam maior intensidade, e conseqüentemente reduzindo o DHT apresentado no sistema. Esta é uma grande vantagem destes sistemas, e um dos principais motivos para sua utilização [22]. O DHT_i percentual está em 2.6

$$DHT_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.6)$$

h – número inteiro (ordem harmônica);

I_h – valor rms da componente corrente harmônica h ;

I_1 – valor rms de corrente fundamental.

Com a presença de distorções harmônicas, o fator de potência verdadeiro (FPv) do sistema é prejudicado. O DFP é o fator de potência de deslocamento, considerado como o

coseno do ângulo entre a tensão e a componente fundamental da corrente, e este valor pode ser utilizado para obtermos o FP_v conforme a equação 2.7 [22].

$$FP_v = \frac{DFP}{\sqrt{1 + DHT_i^2}} \quad (2.7)$$

Em determinadas situações pode ser conveniente fazer-se uma associação de circuitos retificadores, como por exemplo, quando se deseja reduzir o conteúdo harmônico da corrente drenada da rede. Isto se aplica a retificadores controlados ou não e a figura 11 mostra a associação em paralelo. [21].

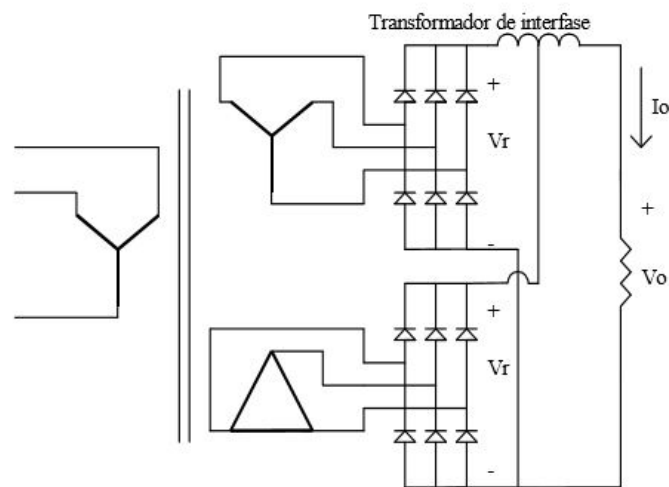


Figura 11 – Associação em paralelo de retificadores não controlados.

A análise feita na figura 11, embora tome como exemplo retificadores a diodo, pode ser estendida também para circuitos com tiristores e mistos.

2.2 Conversor de 12 pulsos

Um conversor 12 pulsos pode ser obtido à partir da ponte retificadora trifásica clássica com associação em série das pontes retificadoras, porem esta não é a única forma, podendo ser em paralelo. É obtido um defasamento de 30° entre as tensões das pontes por efeito de transformador com primário em Δ (delta) e secundários em Δ e Y (estrela) [21].

O Conversor de 12 Pulsos apresenta como uma das vantagens a eliminação de harmônicos de menor ordem, por exemplo, o 5° e o 7°. O mesmo é utilizado em sistemas industriais e em sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua, citando-se, por exemplo, o sistema de transmissão de energia elétrica em corrente contínua de Itaipu [21].

2.3 Implementação do sistema de 12 pulsos em Matlab/Simulink[®]

Para o funcionamento do conversor de 12 pulsos, foi utilizado a tensão fase-neutro de 227 [V], que passando pelo transformador passa a ser 256 [V] fase-neutro, e obtendo uma diferença angular entre o secundário e o terciário de 30° devido a sua implementação (estrela-estrela-delta). Implementação essa que influenciará nas formas de ondas das pontes retificadoras.

Os enrolamentos do terciário (delta) terão uma defasagem convencional e natural de 30° em relação ao do secundário (estrela), dispensado assim a necessidade de outros equipamentos para influenciar essa defasagem angular entre o secundário e o terciário do transformador. Foi adotado nesta implementação a configuração paralelo do conversor de 12 pulsos e mostrada na figura 12.

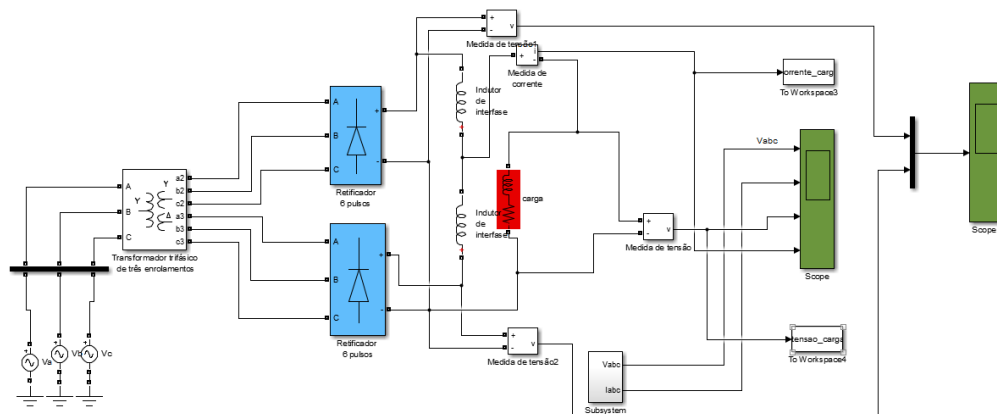


Figura 12 – Implementação do conversor de 12 pulsos em Matlab/Simulink

Na figura 12, foi utilizado o indutor de interfase que tem o papel de absorver a diferença de potencial entre as pontes retificadoras, que pode ocorrer tanto por desequilíbrios operacionais, quanto devido à diferença fasorial necessária para que ocorra o cancelamento harmônico.

2.4 Análise das formas de onda de tensão e de corrente CC na saída do retificador

Para a simulação deste conversor de 12 pulsos, foi configurado (os parâmetros dos componentes) e os resultados foram apresentados.

As tabelas 1 e 2 mostram os valores dos parâmetros do retificador e do transformador.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do retificador

Parâmetros do retificador	Valor
Resistência R_s (Ohms)	500
Capacitor C_s (nF)	250
Resistência R_{on} ($m\Omega$)	1
Indutância L_{on} (H)	0
Tensão V_f (V)	0,8

Tabela 2 – Valores dos parâmetros do transformador

Parâmetros do transformador	Valor
Potência nominal P_n (kVA)	10
Frequência nominal f_n (Hz)	60
Tensão fase-fase V_1 rms (V)	227
Resistência de enrolamento primário R_1 (pu)	0,002
Indutância de enrolamento primário L_1	0,08
Tensão fase-fase V_2 rms (V)	257
Resistência de enrolamento secundário R_2 (pu)	0,002
Indutância de enrolamento primário L_1	0,08
Tensão fase-fase V_3 rms (V)	257
Resistência de enrolamento terciário R_3 (pu)	0,002
Indutância de enrolamento primário L_1	0,08
Resistência de magnetização R_m (pu)	500
Indutância de magnetização L_m (pu)	500

2.5 Análise das formas de onda de tensão e de corrente CC na saída do retificador

Após a simulação, foram obtidas as formas de ondas da tensão e da corrente do lado da fonte. A figura 13 mostra as tensões da fonte todas defasadas de 120° . A figura 14 apresenta uma característica senoidal com alguns harmônicos proveniente da não linearidade dos equipamentos (retificador, indutor) usados para a implementação do conversor de 12 pulsos.

Note-se no período de $5ms$, houve um regime transitório devido também a não linearidade da carga (indutância + resistência). Foi tomado como tempo de simulação $20ms$.

As figuras 15 e 16 mostram o comportamento das formas de ondas da tensão do lado da carga e da corrente da mesma. Observe-se também no período de $5ms$, houve um regime transitório e depois deste intervalo, a forma de onda da tensão apresenta quase os doze (12) pulsos e a corrente fica praticamente senoidal o que inicialmente foi projetado nos estudos teóricos. Foi utilizada indutância de interfase na implementação para que não haja muito distorção nas formas de ondas. Estas indutâncias de interfase foram ajustadas

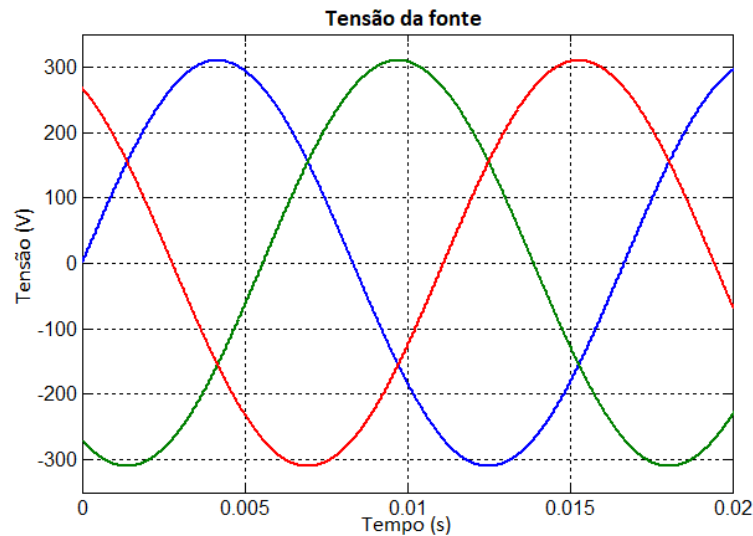


Figura 13 – Forma de onda da tensão da fonte do conversor de 12 pulsos

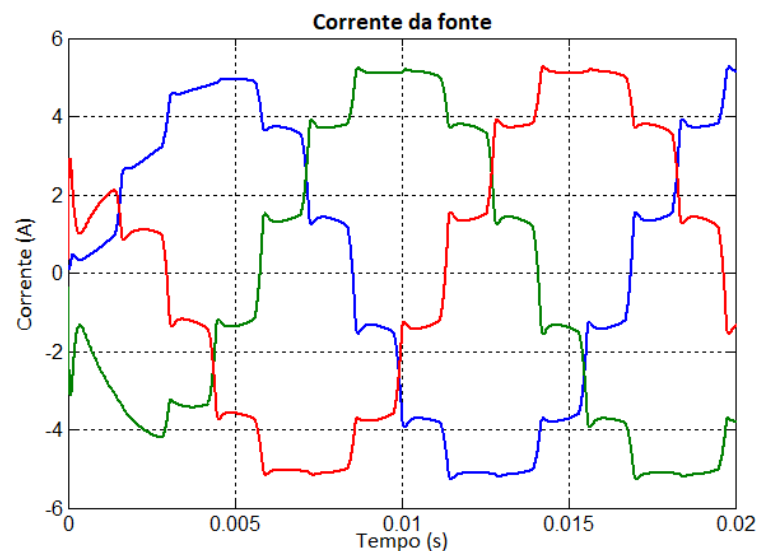


Figura 14 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 12 pulsos

para que a tensão e a corrente saíssem da forma desejada.

A figura 17 apresenta o espectro harmônico da corrente da fonte. Observe-se que os harmônicos 11º e 13º são característicos do espectro obedecendo a fórmula $h = 12k \pm 1$, o primeiro harmônico característico existente é o de ordem 11, com amplitude bem reduzida aproximadamente 1/20 em relação ao fundamental.

O *THD* da corrente do lado da fonte obtido após a simulação apresenta resultados satisfatórios e bastante menor que o do conversor de 6 pulsos.

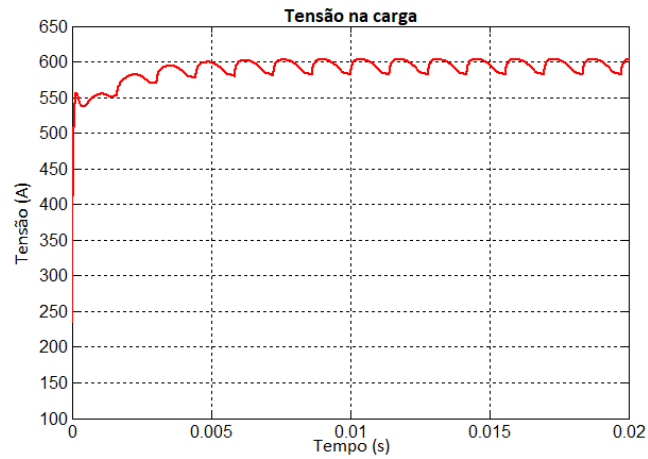


Figura 15 – Forma de onda da tensão do lado da carga do conversor de 12 pulsos

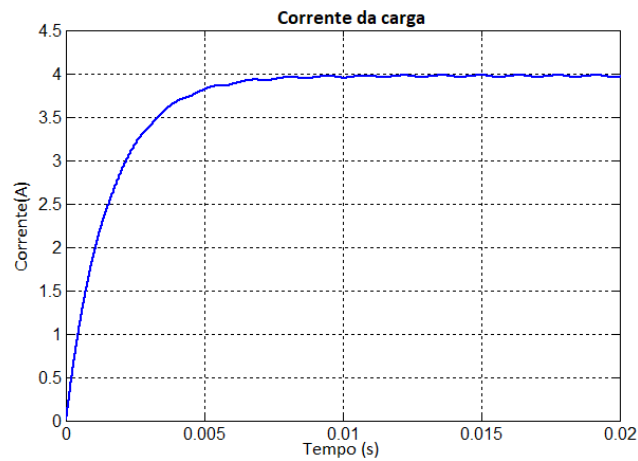


Figura 16 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 12 pulsos

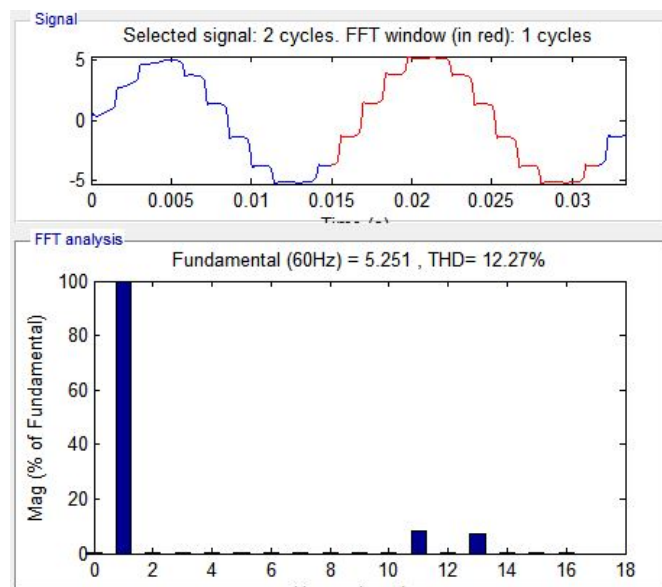


Figura 17 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 12 pulsos

Consideração final

Os resultados obtidos após a implementação e a simulação são bastante satisfatórios. A corrente da fonte apresenta uma característica aproximadamente senoidal. A tensão da carga apresenta os 12 pulsos para um período.

Este conversor de 12 pulsos apresenta como vantagens a eliminação de harmônicos característicos de menor ordem, por exemplo os harmônicos da ordem 5^o e 7^o. O mesmo sistema com um eventual controle poderia ser utilizado por exemplo em sistemas de transmissão HVDC.

Capítulo 3

3 Metodologia de cálculo para o sistema de 48 pulsos

Consideração inicial

Para os conversores de 12 pulsos, o defasamento angular necessário da tensão de alimentação das seis pontes retificadoras é de trinta graus (30°), portanto podem ser utilizadas ligações convencionais em estrela e delta. Para a obtenção de conversores de 24 e 48 pulsos, devem ser utilizadas conexões especiais em zig-zag ou delta estendido, para obter os deslocamentos angulares adequados, quinze (15°) e sete e meia ($7,5^\circ$) graus, respectivamente [24].

Isto é, uma metodologia de cálculo é necessária e foi proposta neste capítulo para obtenção adequada do defasamento e do número de pulsos conveniente. Este capítulo foi estruturado em quatro etapas:

- Transformadores conectados em zigue-zague;
- Transformadores conectados em delta estendido;
- Comparação entre as conexões zigue-zague e delta estendido;
- O dimensionamento de número de espiras do autotransformador ADZ $7,5^\circ$.

3.1 Transformadores conectados em zigue-zague

A figura 18 mostra a topologia do transformador estrela/zigue-zague cujo primário conectado em estrela e o secundário em zigue-zague e o número de espiras foi calculado para obtenção de deslocamento angular de 0° , $7,5^\circ$, 15° , $22,5^\circ$, 30° , $37,5^\circ$, 45° e $52,5^\circ$. O número de espiras N_2 e N_3 foi determinado através da equação 3.1.

A figura 19 mostra o diagrama do mesmo transformador estrela/zigue-zague ($YZ : 30^\circ$). Neste caso, o valor dos tapes N_2 e N_3 é igual a 100%.

A figura 20 mostra o diagrama fasorial, para obtenção do defasamento angular de $7,5^\circ$, mantendo constante a tensão de saída.

Baseando no triângulo ncX_1 , tem-se:

$$\frac{cn}{\text{sen}(7,5^\circ)} = \frac{X_1c}{\text{sen}(52,5^\circ)} = \frac{nX_1}{\text{sen}(120^\circ)} \quad (3.1)$$

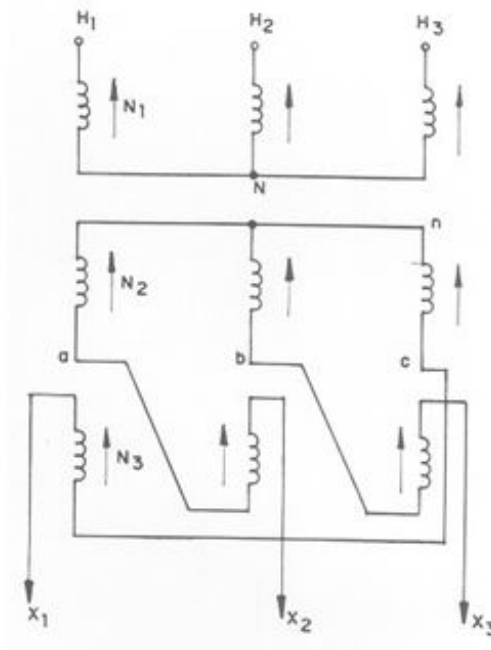


Figura 18 – Transformador estrela/zigue-zague.

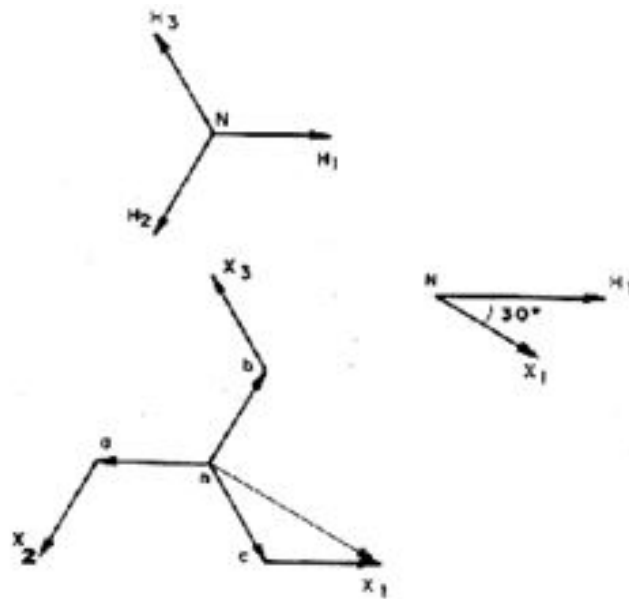


Figura 19 – Diagrama fasorial do transformador estrela/zigue-zague ($YZ : 30^\circ$)

$$cn = \frac{nX_1}{\text{sen}(120^\circ)} \text{sen}(7,5^\circ) = (nX_1) \times 0,1507 \quad (3.2)$$

$$X_{1c} = \frac{nX_1}{\text{sen}(120^\circ)} \text{sen}(52,5^\circ) \rightarrow X_{1c} = (0,9161) \times nX_1 \quad (3.3)$$

Tomando 100% como o valor do tap do transformador estrela/zigue-zague ($YZ :$

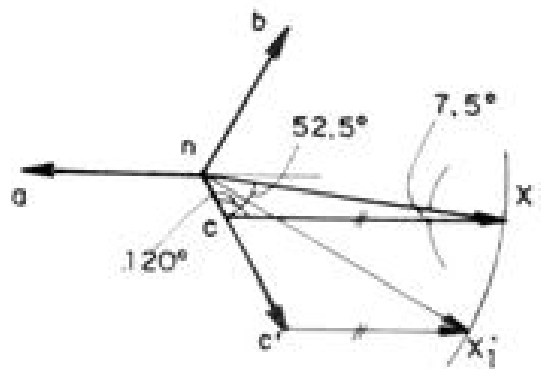


Figura 20 – Diagrama fasorial do transformador estrela/zigue-zague

30°), tem-se:

$$nX_1 = \sqrt{3} \times c'n \quad (3.4)$$

$$nX_1 = \sqrt{3} \times X'_1c' \quad (3.5)$$

Os tapes foram calculados e os resultados obtidos foram apresentados:

tape N_2

$$cn = N_2 = 0,1507 \times \sqrt{3} = 26,10\% \quad (3.6)$$

tape N_3

$$X_1c = N_3 = 0,9161 \times \sqrt{3} = 158,6\% \quad (3.7)$$

Para outros deslocamentos, o procedimento é análogo. A tabela 3 mostra os tapes necessários para obter os deslocamentos angulares 0°, 7,5°, 15°, 22,5°, 30°, 37,5°, 45° e 52,5°.

Tabela 3 – Tapes N_2 e N_3 para o transformador estrela/zigue-zague

Deslocamento	tape N_2	tape N_3
7,5°	26,10%	158,67%
15°	51,76%	141,42%
22,5°	76,54%	121,74%
30°	100%	100%
37,5°	121,74%	76,54%
45°	141,42%	51,76%
52,5°	158,67%	26,10%

Para obter a relação de transformação de tensão, o tap 100% corresponde foi calculado:

$$N_2 = N_3 = 0,5773N_1 \quad (3.8)$$

A figura 21 mostra a configuração do transformador com o deslocamento angular (0°).

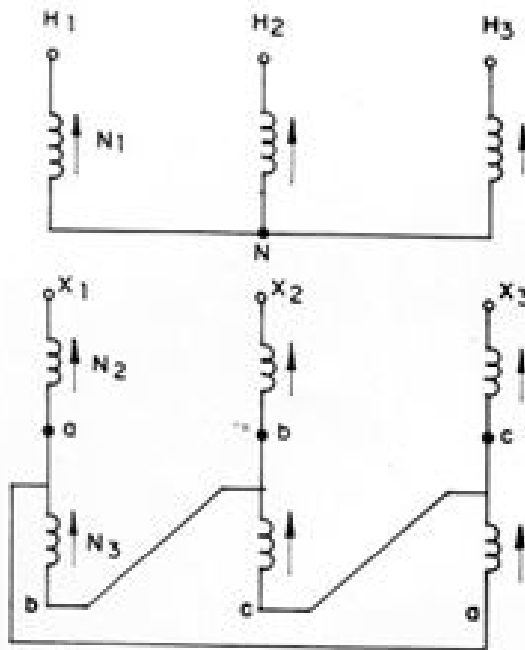


Figura 21 – Transformador estrela/delta estendido.

3.2 Transformadores conectados em delta estendido

A ideia é a de obter um deslocamento de 7.5° entre as tensões $U_{X_1X_3}$ e $U_{H_1H_3}$ e, portanto, determinar as quantidades de espiras N_2 e N_3 , mostrados na figura 21.

A figura 22 mostra o diagrama para obtenção do deslocamento angular de 7.5° , onde o triangulo abc representa a configuração delta e X_1, X_2, X_3 a extensão das fases a e c respectivamente.

O ângulo entre cX_3 e H_1H_3 equivale a 30° (ângulo entre a fase c e o vetor H_1H_3 mostrado na figura 22) e como o valor do ângulo entre X_1X_3 e H_1H_3 é igual a 7.5° o que é projetado, então deduz-se o valor do ângulo entre cX_3 e X_1X_3 .

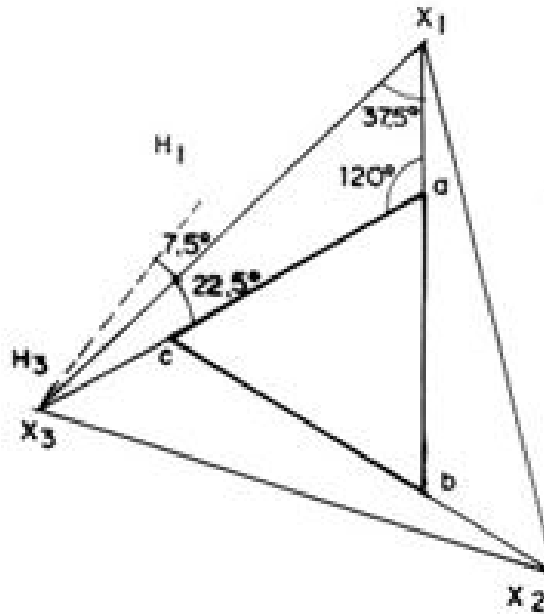


Figura 22 – Diagrama fasorial do transformador estrela/delta extendido.

Baseando no triângulo X_1X_2a e aplicando a lei de senos, tem-se:

$$\frac{aX_1}{\text{sen}(22,5^\circ)} = \frac{X_1X_3}{\text{sen}(120^\circ)} = \frac{aX_3}{\text{sen}(37,5^\circ)} \quad (3.9)$$

$$aX_1 = X_1X_3 \times \text{sen} \frac{22,5^\circ}{120^\circ} = 0,4419 \times X_1X_3 \quad (3.10)$$

$$aX_3 = X_1X_3 \times \text{sen} \frac{37,5^\circ}{120^\circ} = 0,7029 \times X_1X_3 \quad (3.11)$$

Considerando:

$$X_1X_3 = 100\% \quad (3.12)$$

obtém-se:

$$aX_1 = 44,9\% \quad (3.13)$$

$$ac = aX_3 - cX_3 = aX_3 - aX_1 \quad (3.14)$$

$$ac = 0,7029 - 0,4419 = 0,2610 \quad (3.15)$$

$$N_2 = 44,19\% \quad (3.16)$$

$$N_3 = 26,10\% \quad (3.17)$$

Os outros tapes podem ser calculados e a tabela 4 mostra os valores.

Tabela 4 – Tapes necessários para obtenção de conversor de 48 pulsos com transformadores estrela/delta-estendido

Deslocamento	tape N_2	tape N_3	Sequência de fase primária
-22,5°	15,07%	76,53%	Inverso
-15°	29,88%	51,76%	Inverso
-7,5°	44,19%	26,10%	Inverso
+7,5°	44,19%	26,10%	Direto
+15°	29,88%	51,76%	Direto
+22,5°	15,07%	76,53%	Direto
30°	0%	100%	Direto

Para obter a relação de transformação de tensão, o tape 100% corresponde a $N_3 = (1,7320) \times N_1$, N_2 foi obtido em função de N_3 . Então, para o tape $N_2 = 15,07\%$, $N_2 = 1,7320 \times 0,1507 \times N_1 = 0,26 \times N_1$. O deslocamento 0° foi calculado usando o transformador estrela/estrela (Y/Y).

3.3 Comparação entre as conexões zigue-zague e delta estendido

A tabela 5 mostra N_2 e N_3 em função de N_1 para o transformador estrela/zigue-zague.

Tabela 5 – Cálculo de N_2 e N_3 em função de N_1 para o transformador estrela/zigue-zague (Y/Z)

Deslocamento	tape N_2	tape N_3
0°(Y-Y)	1,0000	0,0000
7,5°	0,1506	0,9160
15°	0,2988	0,8164
22,5°	0,4419	0,7028
30°	0,5773	0,5773
37,5°	0,7028	0,4419
45°	0,8164	0,2988
52,5°	0,9160	0,1506

A tabela mostra N_2 e N_3 em função de N_1 para o transformador estrela/delta estendido.

Tabela 6 – Cálculo de N_2 e N_3 em função de N_1 para o transformador estrela/delta estendido

Deslocamento	tape N_2	tape N_3
0° (Y-Y)	1,0000	0,0000
$-22,5^\circ$	0,2610	1,3255
-15°	0,5175	0,8965
$-7,5^\circ$	0,7653	0,4520
$7,5^\circ$	0,7653	0,4520
15°	0,5175	0,8965
$22,5^\circ$	0,2610	1,3255
30°	0,0000	0,7320

A figura 23 mostra o aspecto qualitativo da corrente do lado AC e a tensão DC de saída do sistema multi-conversor de 48 pulsos, empregando transformadores de dois enrolamentos.

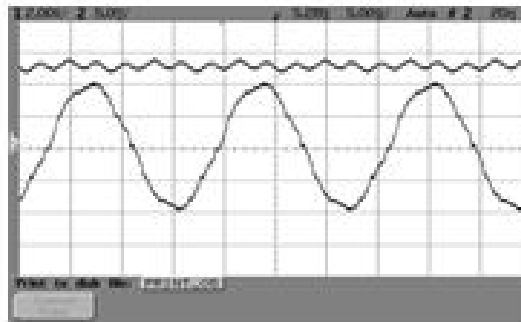


Figura 23 – Aspecto qualitativo forma de ondas de tensão e da corrente

Os deslocamentos dos transformadores trifásicos fornecendo para as pontes retificadoras são respectivamente $+22,5^\circ$, $+7,5^\circ$, $-7,5^\circ$, $-22,5^\circ$.

3.4 Tapes de enrolamento do autotransformador ADZ $7,5^\circ$

A figura 24 mostra o diagrama fasorial para obtenção do valor de K_b e K_c , que representam os valores de tapes do autotransformador. Este autotransformador possibilita a variação de ângulo entre as tensões de entrada U_{OA} e a de saída $U_{OA'}$ mantendo suas amplitudes constante e igual a 1.

A figura 25 mostra a topologia do autotransformador tipo ADZ [24]. Este autotransformador tem por fase, uma bobina principal e duas bobinas auxiliares. O ponto O na figura 25 representa o neutro.

A ideia é a de obter um deslocamento de $7,5^\circ$ entre a tensão de entrada U_{OA} e a de saída $U_{OA'}$. Sendo que as tensões de entrada U_{OA} e a de saída $U_{OA'}$ são constantes

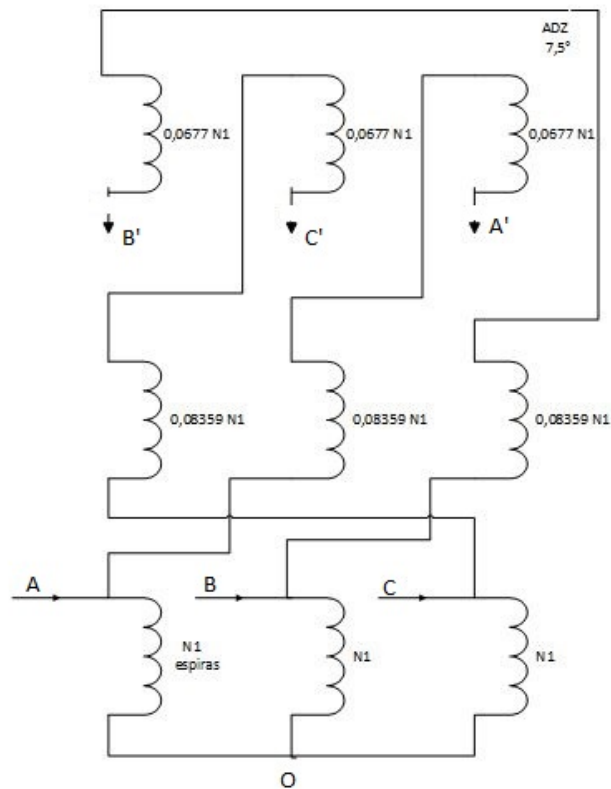


Figura 25 – Autotransformador ADZ

Consideração final

O aumento de número de pulsos do conversor, usando os transformadores zig-zague ou delta estendido adequados, foi apresentado neste capítulo. Um procedimento detalhado para a obtenção dos tapes dos transformadores zig-zague e delta estendido foi apresentado também neste capítulo, usando diagramas fasoriais e aplicando também a lei senoidal. No sistema de multi-conversor de 48 pulsos, o harmônico característico do conversor que fornece a corrente, do lado AC, segue a relação $48k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Assim o primeiro harmônico característico é de ordem 47, com valor rms muito reduzido, resultando assim na obtenção de uma excelente mitigação harmônica (ver figura 23). Este valor é aproximadamente o valor rms da corrente fundamental dividido por 47. O protótipo proposto propiciará uma excelente mitigação harmônica da corrente de suprimento de multi-conversor, levando em conta menor custo, espaço físico requerido, facilidade de manutenção em uma futura implementação em Matlab/Simulink[®].

Capítulo 4

4 Implementação e simulação do conversor de 24 pulsos em Matlab/Simulink[®]

Consideração inicial

A Energia Elétrica na forma de corrente contínua se faz necessária em alguns processos industriais, como na fundição de alumínio e na produção de cloro. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, transformadores associados a retificadores têm sido amplamente utilizados para níveis de corrente de quilo-amperes [25].

Geralmente, quando a corrente solicitada pela carga se torna extremamente elevada, é conveniente empregar mais de uma ponte retificadora no objetivo de dividir a corrente solicitada entre elas, o que resulta no emprego, em paralelo, dessas unidades retificadoras.

Para que essa associação de conversores seja realizada, deve-se utilizar transformadores de interfase que é o responsável por absorver, a qualquer instante, a diferença dos valores instantâneos de tensão entre essas estruturas [25]. Este capítulo está essencialmente baseado na topologia e simulação do conversor de 24 pulsos e estruturado em três seções:

- Apresentação do sistema de 24 pulsos;
- Dimensionamento dos componentes do sistema;
- Simulação e resultados obtidos.

4.1 Apresentação do sistema de 24 pulsos

Há várias configurações e topologias do sistema multi-pulsos na literatura no intuito de mitigar os harmônicos na rede elétrica. Foi adotado neste trabalho uma nova topologia e configuração que apresenta um grande avanço em termo de custo, manutenção e espaço físico. A figura 26 mostra a topologia do sistema conversor de 24 pulsos.

Transformadores trifásicos de três enrolamentos com primário em delta estendido, o secundário em estrela e o terciário em delta com o defasamento de $7,5^\circ$. Para evitar menos distorção nas formas de ondas da tensão e corrente do lado da carga, foram utilizados e dimensionados transformadores de interfase.

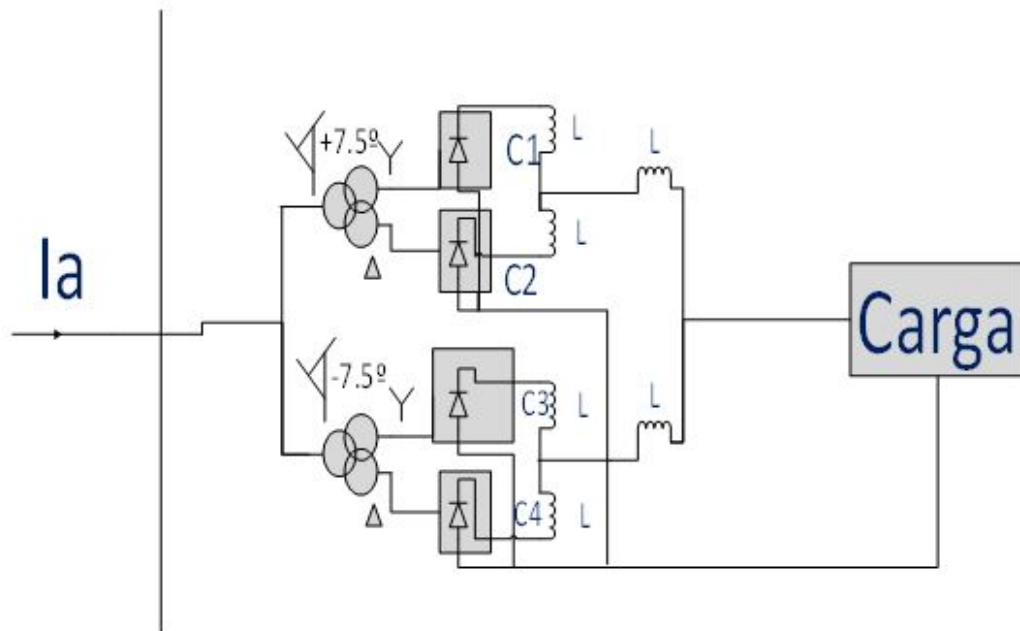


Figura 26 – Sistema conversor de 24 pulsos

4.2 Dimensionamento dos componentes do sistema

4.2.1 Dimensionamento do transformador de interfase para o conversor de 24 pulsos

A presença da indutância de interfase proporciona um caminho para circulação de corrente entre os conversores, sendo assim, a corrente em cada uma das pontes retificadoras pode ser considerada contínua. Cada retificador possui em sua saída uma tensão com 6 pulsos com formato característico desta configuração de retificador.

Para o dimensionamento do transformador, deve-se conhecer o valor da tensão na carga. Geralmente, nota-se que quatro pulsos (cada um proveniente de uma das pontes retificadoras de 12 pulsos) se somam durante um intervalo de 15° [25]. A equação 4.1 descreve o valor médio da tensão na carga para um intervalo de 15° .

$$V_{carga} = \frac{1}{2} \cdot \frac{12}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{12}} V_m \cdot \cos(t) dt + \int_0^{\frac{\pi}{12}} V_m \cdot \cos\left(t - \frac{\pi}{12}\right) dt \right] = \frac{3}{2\pi} \cdot V_m (\sqrt{6} - \sqrt{2}) \quad (4.1)$$

Conhecida a relação entre o valor da tensão na carga e o valor de pico da tensão em cada uma das pontes retificadoras, deseja-se verificar quando estes valores serão iguais,

a fim de quantificar a tensão a ser absorvida pelo transformador de interfase [25].

A partir da equação 4.1, obtém-se:

$$V_m \cdot \cos(\omega t) = \frac{3}{\pi} \cdot V_m \cdot (\sqrt{6} - \sqrt{2}) \quad (4.2)$$

$$\cos(\omega t) = \frac{3}{\pi} (\sqrt{6} - \sqrt{2})$$

Então as duas tensões serão iguais em $\omega t = 8,65^\circ$ (ou seja $\omega t \pm 0,151$ rad). A figura 27 ilustra o equacionamento desenvolvido neste capítulo.

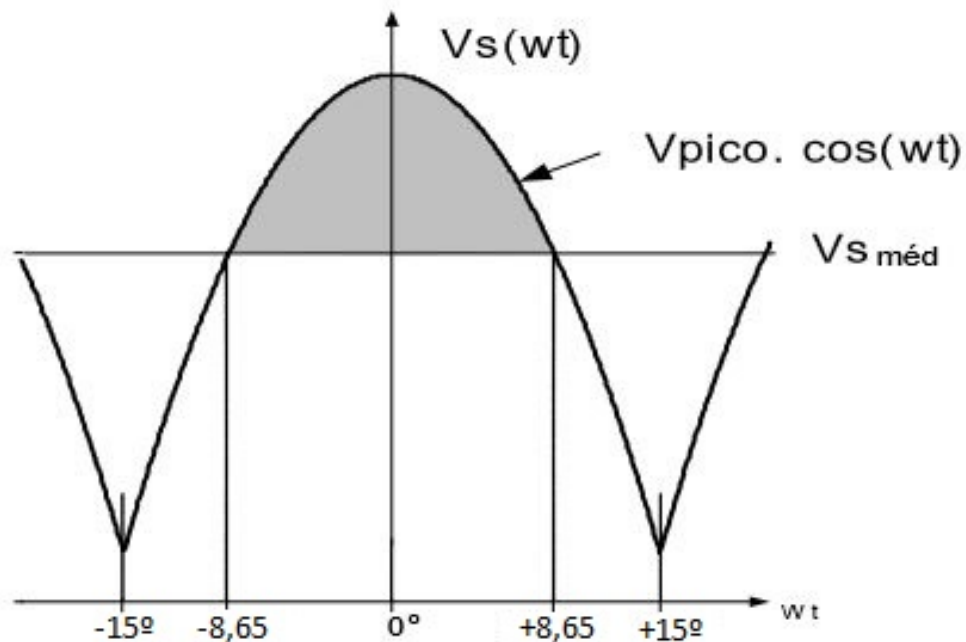


Figura 27 – Tensão instantânea em uma das pontes retificadoras e valor médio da tensão na carga.

A variação da corrente através de um indutor é proporcional à integral da tensão sobre ele aplicada [25], então tem-se que a tensão no transformador de interfase (V_{Ti}) será dada por:

$$V_{Ti} = L \cdot \frac{di}{dt} \rightarrow \int V_{Ti} \cdot dt = L \cdot \Delta i_{Ti} \quad (4.3)$$

ou,

$$L \cdot \Delta i_{Ti} = \frac{1}{\omega} \int V_{Ti} \cdot d\omega t \quad (4.4)$$

Uma vez que a tensão absorvida pelo transformador de interfase é a diferença entre o valor instantâneo na ponte retificadora e o valor da tensão na carga, quantifica-se essa diferença para o conversor de 24 pulsos como sendo:

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot d\omega t = 2 \cdot \int_0^{0,151} (V_m \cdot \cos\omega t - \frac{3}{\pi} V_m \cdot (\sqrt{6} - \sqrt{2})) d\omega t \quad (4.5)$$

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot d\omega t = 2 \cdot (V_{spico} \cdot [\text{sen}\theta]_0^{0,151} - \frac{3}{\pi} V_{spico} \cdot (\sqrt{6} - \sqrt{2}) \cdot 0,151) \quad (4.6)$$

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot d\omega t = 229,165 \cdot 10^{-5} \cdot V_{pico} \quad (4.7)$$

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot dt = \frac{1}{\omega} \cdot 229,165 \cdot 10^{-5} \cdot V_{pico} \quad (4.8)$$

$$\int V_{Ti} dt = 6,0787 \cdot 10^{-6} \cdot V_{pico} \quad (4.9)$$

Note-se que a tensão média na carga para um conversor de 24 pulsos é praticamente igual a do conversor 6 pulsos, isto é, para determinar o valor pico da tensão na equação 4.9, procedemos da seguinte forma:

$$\frac{3}{\pi} (\sqrt{6} - \sqrt{2}) V_{pico} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V'_{pico} \quad (4.10)$$

Onde:

V_{pico} : tensão pico do conversor 24 pulsos;

V'_{pico} : tensão pico do conversor 6 pulsos. Então o valor do pico V_{pico} se expressa através da equação 4.11.

$$V_{pico} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{6} - \sqrt{2}} V'_{pico} \quad (4.11)$$

Assim a tensão no transformador de interfase é dada através da equação 4.12.

$$\int V_{Ti} dt = 6,0787 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{6} - \sqrt{2}} V'_{pico} \quad (4.12)$$

$$\int V_{Ti} dt = 25,888 \cdot 10^{-4} \quad (4.13)$$

Como o valor da indutância do transformador de interfase deve respeitar a seguinte equação :

$$L_{Ti} \geq \frac{1}{\Delta I_{Ti}} \cdot \int V_{Ti} dt \quad (4.14)$$

Onde ΔI_{Ti} é a variação da corrente admitida no mesmo, então para uma variação de corrente não superior a 10%, temos:

$$L_{Ti} \geq 10 \times 25,888.10^{-4} = 25,888.10^{-3}H \quad (4.15)$$

Especifica-se então:

$$L_{Ti} = 30mH$$

Tendo sua utilização recomendada para casos onde há diferença entre valores instantâneos de tensão, como geralmente ocorre em associação em paralelo de pontes retificadoras nos conversores multi-pulsos, o transformador de interfase tem significativa influência nos parâmetros de projeto do conversor, bem como nas características das etapas de operação do mesmo, conforme será discutido posteriormente [25].

4.2.2 Dimensionamento da carga

Foi tomada para o teste deste protótipo, uma carga RL cujo dimensionamento tem sido feito baseando na formula da potencia em uma carga. Esta potencia se expressa através da equação 4.16

$$P_{carga} = \frac{V^2}{Z} \rightarrow Z = \frac{V^2}{P_{carga}} \quad (4.16)$$

Então a partir desta expressão, o valor da impedância da carga se deduz através da equação 4.17 utilizando o máximo de potencia na carga

$$Z = \frac{(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V'_{pico})^2}{P_{carga}} \quad (4.17)$$

$$Z = \frac{(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times 180\sqrt{2})^2}{8000} = 22,1589\Omega \quad (4.18)$$

Uma vez que a impedância da carga é conhecida, o dimensionamento da indutância L pode ser feito através da equação 4.19

$$Z^2 = R^2 + (L\omega)^2 \quad (4.19)$$

Onde R é a resistência da carga. Então a indutância se expressa através da equação 4.20

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (4.20)$$

Onde f é a frequência da rede. Tomando 10Ω como valor da resistência da carga, temos:

$$L = \frac{1}{120\pi} \sqrt{(22,1589)^2 - 10^2} = 52,4525mH \quad (4.21)$$

Foi usado, na simulação feita, uma indutância cujo valor é um pouco menor do que o do dimensionamento.

4.3 Elaboração dos blocos em Matlab/simulink®

A elaboração do transformador especial trifásico, do autotransformador e do transformador de interfase foi uma das dificuldades encontradas na implementação do sistema em Matlab/Simulink® pois o próprio software não disponibiliza ferramentas eletrônicas necessárias que possibilitam a implementação do sistema.

As configurações dos transformadores fazem em que criamos e personalizamos blocos com todos os parâmetros incluídos a fim de poder usa-los. Também esta maneira de fazer e de construir blocos em simulink no intuito de implementar o sistema de 24 e logo depois de 48 pulsos, ainda não foi encontrada em nenhum documento na literatura.

Portanto, utilizamos e configuramos componentes do simulink (SimPowerSystems do Simscape) na elaboração deste tipo de blocos. Baseando na figura 1 e usando os componentes «**Primary winding**» (enrolamentos do primário) e «**Secondary winding**» (enrolamentos do secundário e do terciário) do SimPowerSystems que representam enrolamentos do transformador e também «**magnetic references**» (referencia magnética) como mostradas nas figuras 28 e 29, conseguimos construir os blocos do transformador especial, do autotransformador e do transformador de interfase.

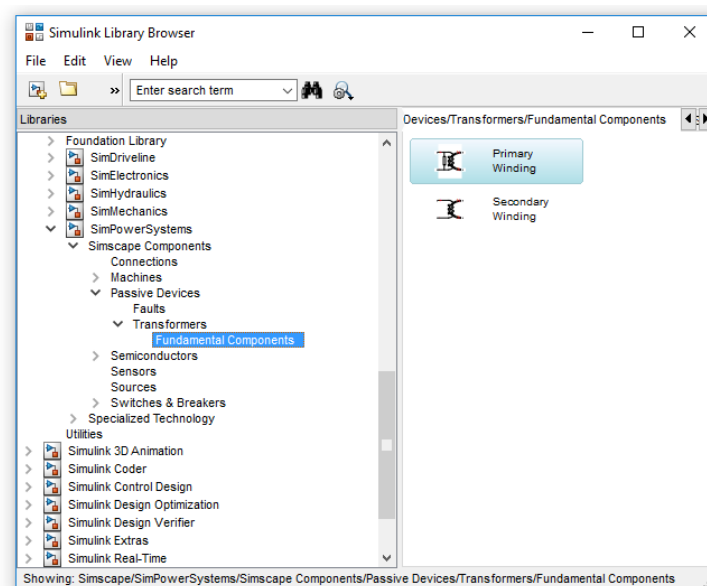


Figura 28 – Enrolamentos do transformador.

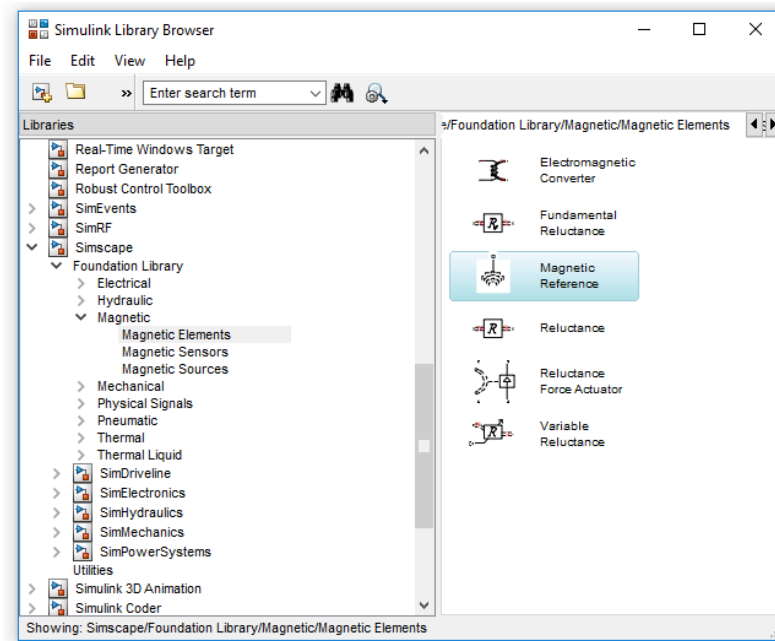


Figura 29 – referencia magnética.

As figuras 30, 31 e 32 mostram a elaboração dos transformadores que vão ser usados na implementação do sistema de 24 e de 48 pulsos.

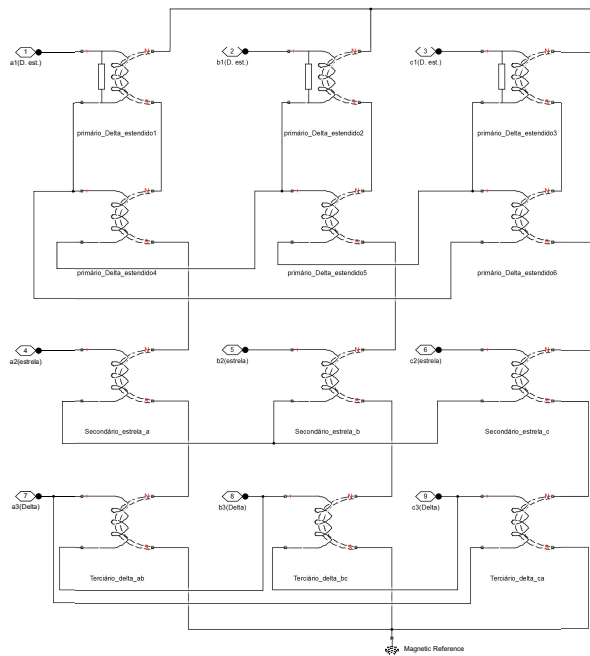


Figura 30 – Transformador especial trifásico.

Foi construído após a elaboração dos transformadores, subsistemas de cada um deles no intuito de usa-los como blocos na mesma implementação. A figura 33 mostra os blocos elaborados e personalizados dos transformadores.

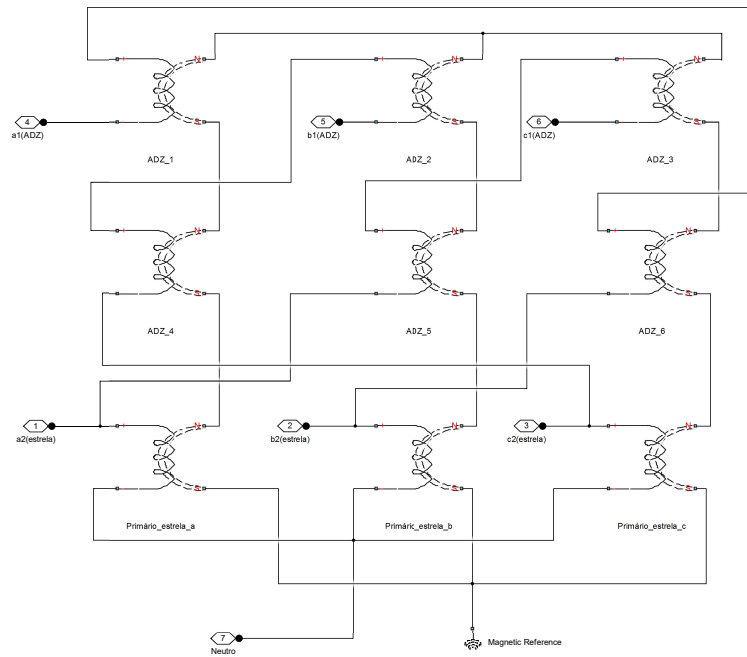


Figura 31 – Autotransformador trifásico.

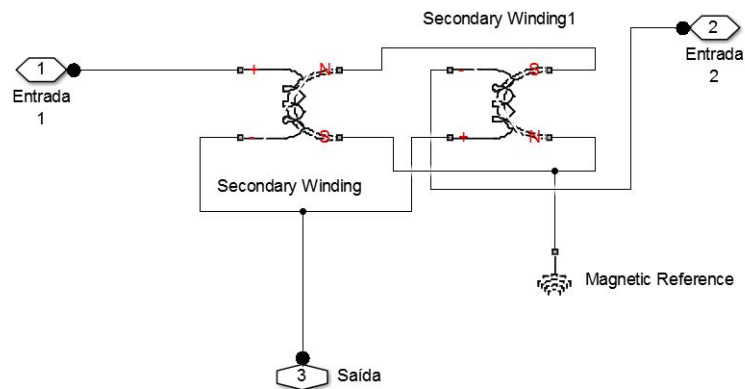


Figura 32 – Transformador de interfase.

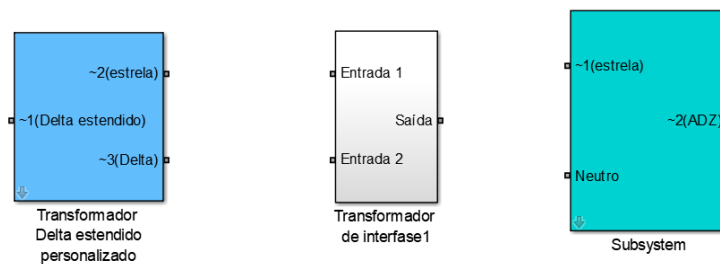


Figura 33 – Blocos elaborados e personalizados dos transformadores.

4.4 Simulação do sistema e resultados obtidos

Após a elaboração dos blocos dos transformadores, foram usados na implementação do sistema de 24 pulsos os blocos como mostrado na figura 35 que representa o esquema do mesmo. Nesta figura, foram usados bloco de retificador de 6 pulsos do próprio simulink, os sensores de tensão e de corrente para medições de tensão e de corrente da fonte e também do lado da carga. Enfim, o bloco «Solver configuration» (Configuração do Solucionador) foi usado para escolher o tipo da resolução que vai ser adotado por Simulink na simulação. A figura 34 mostra a configuração feita durante a implementação.

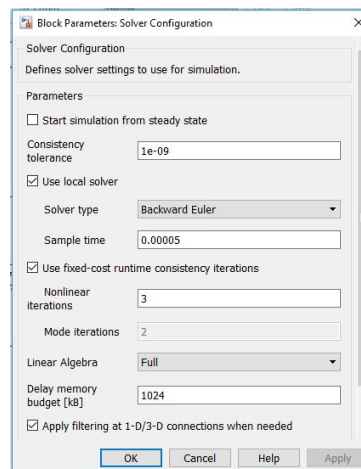


Figura 34 – Configuração do "Solver configuration".

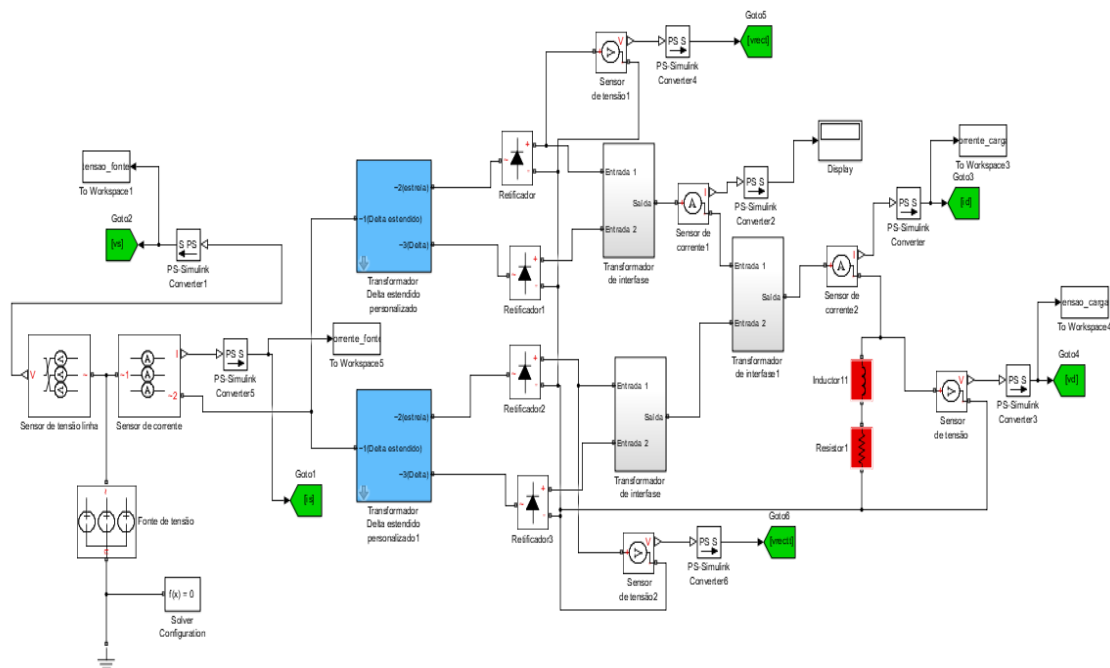


Figura 35 – Esquema do sistema de 24 pulsos implementado em Simulink.

Os valores dos parâmetros de diversos blocos do sistema, foram dimensionados e configurados. Foram usados medidores e sensores no sistema para medição de tensão e corrente da fonte e na carga.

As tabelas 7, 8 e 9 mostram a configuração dos retificadores, dos transformadores especiais trifásicos, dos transformadores de interfase.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros do retificador

Parâmetros do retificador	Valor
Tensão direita V_{di} (V)	0,8
Resistência R_{on} ($m\Omega$)	0.0008
Condutância G_{off} ($1/\Omega$)	10^{-5}

Tabela 8 – Valores dos parâmetros do transformador especial

Parâmetros do transformador	Valor
Potência nominal P_n (kVA)	8
Resistencia de dispersão R_{dis}	10^{-3}
Indutancia de dispersão (H)	10^{-3}
Resistência de perda no núcleo R_{pn} (pu)	10^4
Número de espiras de enrolamentos N_e	10000
Defasamento ϕ	$7,5^\circ$

Tabela 9 – Valores dos parâmetros do transformado de interfase

Parâmetros do transformador	Valor
Número de espiras de enrolamentos N_e (graus)	100
Resistencia de dispersão R_{dis}	10^{-3}
Indutancia de dispersão (H)	$30 \cdot 10^{-3}$

Logo depois da configuração dos blocos, foi simulado o sistema em um período de 0.1s. Foram obtidas e apresentadas nas figuras 36 e 37 após a simulação as formas de ondas da tensão e corrente da fonte. Observe-se que a figura 37 apresenta uma característica praticamente senoidal com poucos harmônicos devido a não linearidade dos componentes eletrônicos e da carga.

Note-se que durante o período de 0.03s, houve um regime permanente e os resultados esperados são satisfatórios. A partir de uma análise cuidadosa, observe-se que as correntes são todas defasadas de 15° .

As figuras 38 e 39 mostram o comportamento das formas de ondas da tensão e corrente na carga. Note-se também um período de regime transitório e depois deste, a tensão na carga ficou praticamente constante o que esperados teoricamente através dos estudos.

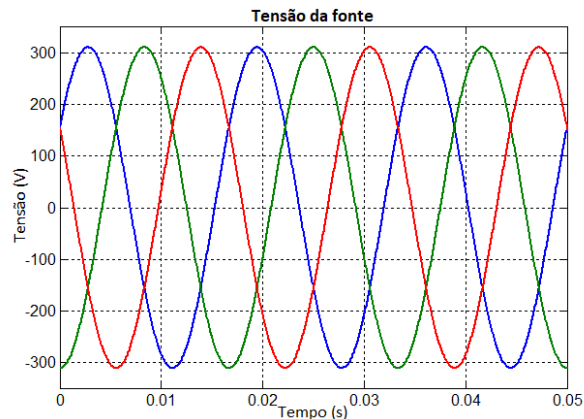


Figura 36 – Forma de onda da tensão da fonte do conversor de 24 pulsos

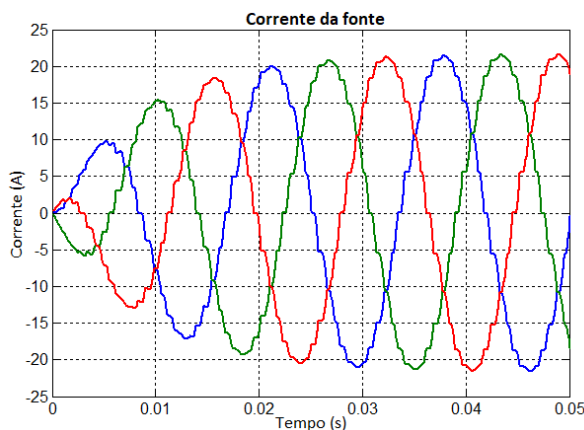


Figura 37 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 24 pulsos

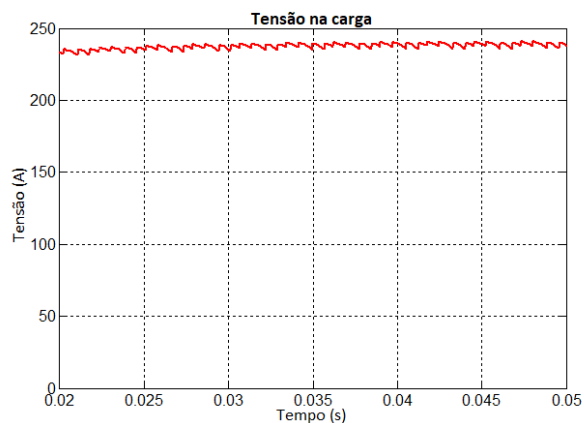


Figura 38 – Forma de onda da tensão na carga do conversor de 24 pulsos

A figura 40 mostra as formas de ondas de tensão com uma certa distorção nos dois retificadores de 12 pulsos em paralelo. Note-se o defasamento de 15° entre as tensões o que é esperado e desejável.

Foram observados os harmônicos da ordem 23° e 24° mas também o espectro de harmônicos apresenta os harmônicos da ordem 5° e 7° , 11° e 13° com baixa amplitude

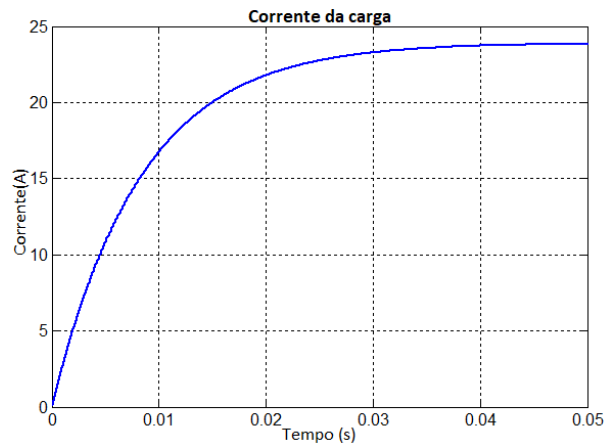


Figura 39 – Forma de onda da corrente na carga do conversor de 24 pulsos

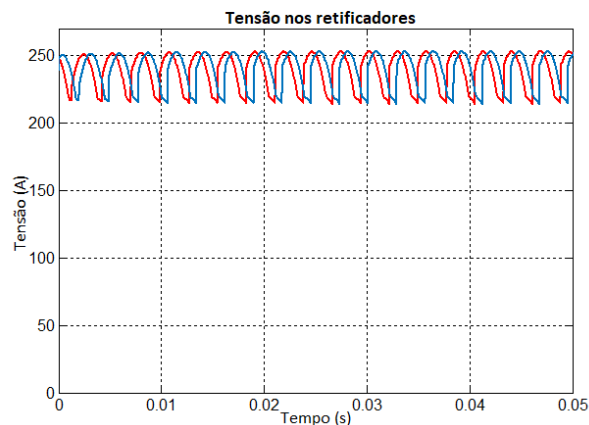


Figura 40 – Forma de ondas das tensões nos retificadores.

em relação ao fundamental. Essas harmônicas não características poderiam ser devidas às imperfeições já presentes na rede elétrica, tais como desequilíbrio de tensões, distorções harmônicas pré-existent além das não-idealidades dos transformadores ou também o regime transitório da corrente da fonte de alimentação.

A figura 41 mostra o espectro de harmônico do sistema multi-conversor de 24 pulsos. O THD obtido após a simulação foi satisfatório ($< 5\%$) e é de cerca de 3,94%.

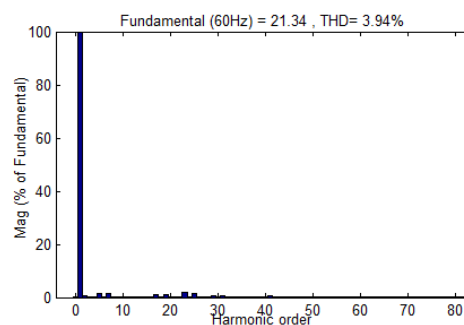


Figura 41 – Espectro de harmônico do sistema de 24 pulsos

Consideração final

O sistema multi-conversor de 24 pulsos apresentado nesta seção é de natureza satisfatória pois mostra resultados esperados. O estudo efetuado do mesmo sistema é viável de ponta de vista custo, manutenção e espaço físico.

A principal razão desta viabilidade é que na implementação, foi utilizado dois transformadores especiais trifásicos de três enrolamentos ao invés de usar quatro de dois enrolamentos.

Capítulo 5

5 Implementação e simulação do sistema de 48 pulsos em Matlab/Simulink[®]

Consideração inicial

No intuito de melhorar as formas de ondas da corrente do lado da fonte e da tensão na carga, e portanto a taxa de distorção de harmônicos (DHT), foi desenvolvido o sistema multi-conversor de 48 pulsos associando o de 24 pulsos desenvolvido no capítulo anterior.

Para obtenção do defasamento de $7,5^\circ$, foi utilizado autotransformador descrito no capítulo 3 cujo cálculo de número dos enrolamentos foi abordado minuciosamente. Uma das desvantagens de uso do autotransformador, é que este gera um desequilíbrio principalmente quando o número dos enrolamentos for maior, na forma da corrente da fonte. Foi projetado ou seja dimensionado todos os componentes entrando na implementação do mesmo sistema e uma metodologia análoga a implementação do sistema de 24 pulsos tem sido seguida para implementação do 48 pulsos. Este capítulo será estruturado também em três seções:

- Apresentação do sistema de 48 pulsos;
- Dimensionamento dos componentes;
- Simulação e apresentação dos resultados obtidos.

5.1 Apresentação do sistema de 48 pulsos

A topologia desenvolvida nesta seção é a mesma que a descrita na seção anterior. Isto significa que em relação a manutenção, custo e espaço físico, este sistema favorece uma grande vantagem sendo que transformadores que foram usados são do tipo delta estendido no primário, estrela em secundário e delta em terciário. A figura 8 descrita no capítulo 1 mostra a topologia deste sistema multi-conversor de 48 pulsos.

5.2 Dimensionamento dos componentes

5.2.1 Dimensionamento do transformador de interfase para o conversor de 48 pulsos

O dimensionamento do transformador de interfase é tão relevante tanto para o conversor de 24 pulsos quanto para o do 48 pulsos. No entanto, um procedimento

análogo ao capítulo anterior tem sido empregado para obtenção do valor da indutância do transformador de interfase.

$$\int_{-7,5}^{+7,5} V_{pico} \times \cos(\omega t) = V_{carga} \times \frac{\pi}{12} \quad (5.1)$$

$$V_{pico} \cdot [\text{sen}\theta]_{-7,5}^{+7,5} = V_{carga} \times \frac{\pi}{12} \quad (5.2)$$

Então, o valor médio da tensão na carga é determinado através da equação 5.3

$$V_{carga} = \frac{V_{pico} \times \text{sen}(7,5^\circ)}{\frac{\pi}{12}} \quad (5.3)$$

$$V_{carga} = 0,9972 \times V_{pico} \quad (5.4)$$

Para determinação do valor da indutância do transformador, é preciso deduzir onde a tensão na carga e seu valor médio se encontram. Isto é, a partir da equação 5.5, obtém-se:

$$V_{pico} \times \cos(\omega t) = 0,9972 \times V_{pico} \quad (5.5)$$

$$\cos(\omega t) = 0,9972$$

Então as tensões se encontram em $\omega t = 4,2732^\circ$ (ou seja $\omega t = 0,07458\text{rad}$). A figura 42 mostra o equacionamento desenvolvido nesta parte.

Para finalizar o dimensionamento da indutância do transformador de interfase, foram exploradas as equações usadas no capítulo anterior modificando os ângulos e tomando em conta algumas considerações.

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot d\omega t = 2 \cdot \int_0^{0,07458} (V_{pico} \cdot \cos\omega t - 0,9972 \times V_{pico}) d\omega t \quad (5.6)$$

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot d\omega t = 2 \cdot (V_{spico} \cdot [\text{sen}\theta]_0^{0,07458} - 0,9972 \times V_{pico} \cdot 0,07458) \quad (5.7)$$

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot d\omega t = 27,643 \cdot 10^{-5} \cdot V_{pico} \quad (5.8)$$

$$\int_{-\psi}^{\psi} V_{Ti} \cdot dt = \frac{1}{\omega} \cdot 27,643 \cdot 10^{-5} \cdot V_{pico} \quad (5.9)$$

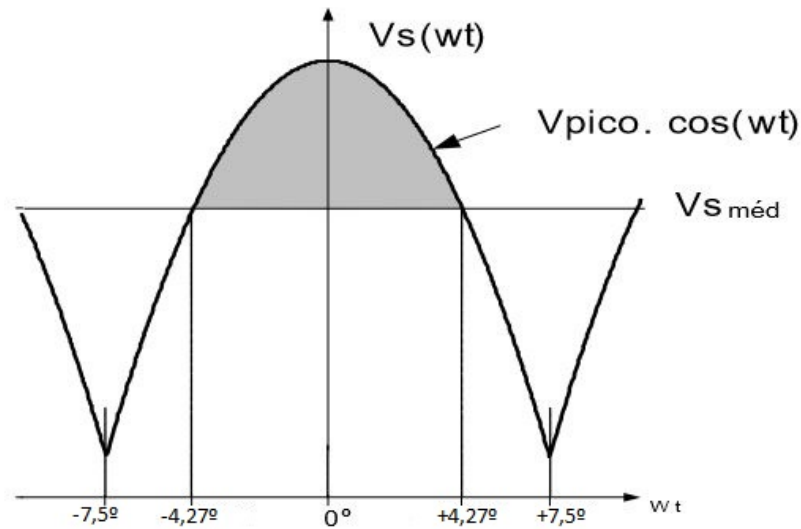


Figura 42 – Tensão instantânea em uma das pontes retificadoras e valor médio da tensão na carga

$$\int V_{Ti} dt = 72,364 \cdot 10^{-7} \cdot V_{pico} \quad (5.10)$$

Note-se que a tensão média na carga para um conversor de 48 pulsos é também aproximadamente igual a do conversor 6 pulsos então, para determinar o valor de pico da tensão, basta equacionar através da equação 5.11

$$\frac{V_{pico} \times \text{sen}(7,5^\circ)}{\frac{\pi}{12}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V'_{pico} \quad (5.11)$$

Onde:

V_{pico} : tensão pico do conversor 48 pulsos;

V'_{pico} : tensão pico do conversor 6 pulsos. Então o valor do pico V_{pico} se expressa através da equação 5.12.

$$V_{pico} = \frac{\sqrt{3}}{4 \times \text{sen}(7,5^\circ)} V'_{pico} \quad (5.12)$$

Assim a tensão no transformador de interfase se expressa através da equação 5.13

$$\int V_{Ti} dt = 30,553 \cdot 10^{-4} \quad (5.13)$$

Baseando na condição que deve obedecer a indutância do transformador de interfase, entre valores obtidos tomando uma variação de corrente não superior a 10%, foi escolhido como valor da indutância $L_{Ti} = 35mH$.

Como a tensão média na carga para o conversor de 48 pulsos é a mesma em uma ponte retificadora, então o dimensionamento da carga feito no capítulo anterior é também considerado para o conversor de 48 pulsos.

Então os valores da indutância L e da resistência R tomados são respectivamente: $L = 70mH$ e $R = 22\Omega$

5.3 Simulação do sistema e apresentação dos resultados obtidos

Utilizando blocos do transformador especial trifásico, do autotransformador e do transformador de interfase elaborados no capítulo anterior, foi implementado o sistema de 48 pulsos e a figura 43 mostra o esquema da topologia do mesmo.

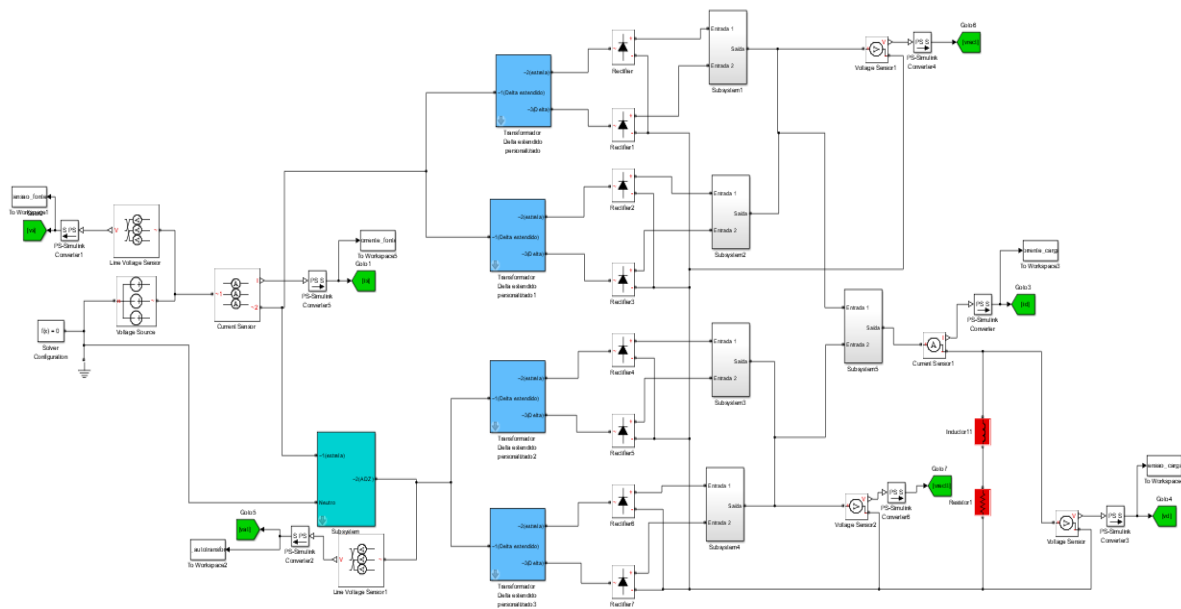


Figura 43 – Esquema do sistema de 48 pulsos implementado em Simulink.

Os valores dos parâmetros do retificador, do transformador especial trifásico, do transformador de interfase especificados no capítulo anterior foram mantidos para o sistema de 48 pulsos. A tabela 10 mostra os do autotransformador defasado de $7,5^\circ$.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros do autotransformador

Parâmetros do autotransformador	Valor
Resistência de dispersão R_{di} (Ω)	10^{-3}
Indutância de dispersão L_{dis} (H)	10^{-3}
Número de enrolamentos de espiras N_e	10^5
Defasamento ϕ	$7,5^\circ$

Para a simulação, foi tomado um tempo igual a $0,2s$ e segundo a robustez do sistema e das características do notebook, a rapidez da simulação levou alguns tempos

relevantes antes a obtenção os resultados. Mas isto é principalmente ligado a velocidade do processador do notebook utilizado para a simulação.

As figuras 44 e 45 mostram o comportamento das formas de ondas da tensão e corrente da fonte. Os sinais das correntes obtidos são praticamente senoidais e que reflete exatamente o que é esperado nos estudos teóricos porém requer alguns ruídos devidos ao desequilíbrio com a presença do autotransformador e das cargas não-lineares.

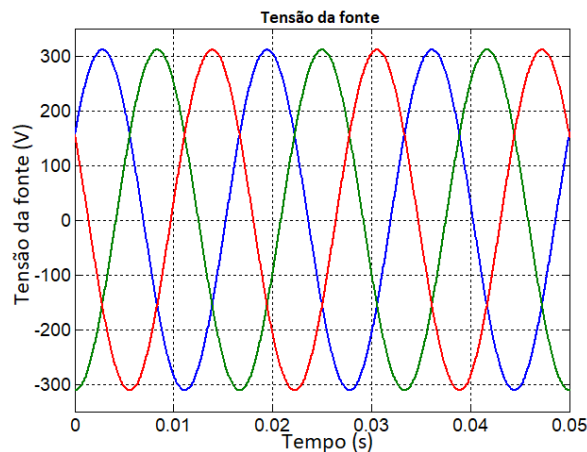


Figura 44 – Forma de onda da tensão da fonte do conversor de 48 pulsos

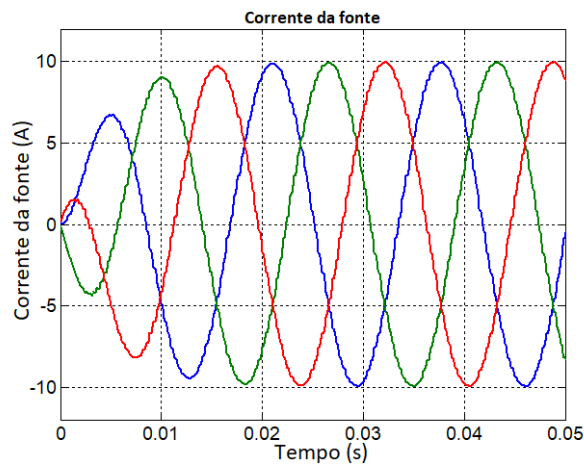


Figura 45 – Forma de onda da corrente da fonte do conversor de 48 pulsos

A figura 46 mostra o comportamento das tensões na saída do autotransformador. Saliente-se com uma análise cuidadosa que foi observado e medido um defasamento aproximadamente de $7,5^\circ$ entre sinais o que já é esperado neste trabalho.

Estes sinais possuem também alguns ruídos mas em proporção menor em relação aos da fonte. A razão principal é que a presença da impedância do próprio autotransformador faz em que os sinais se distorcem.

As figuras 47 e 48 mostram as formas de ondas da tensão e corrente do lado da carga. Observe-se que o sinal da tensão obtido é praticamente constante e note-se que

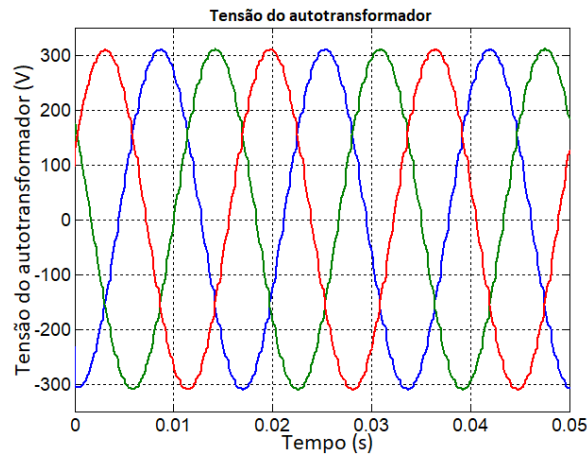


Figura 46 – Forma de onda da tensão na saída do autotransformador

houve um período transitório (devidas às cargas não-lineares) de $20ms$ onde os sinais levam um determinado tempo antes de atingir o regime permanente.

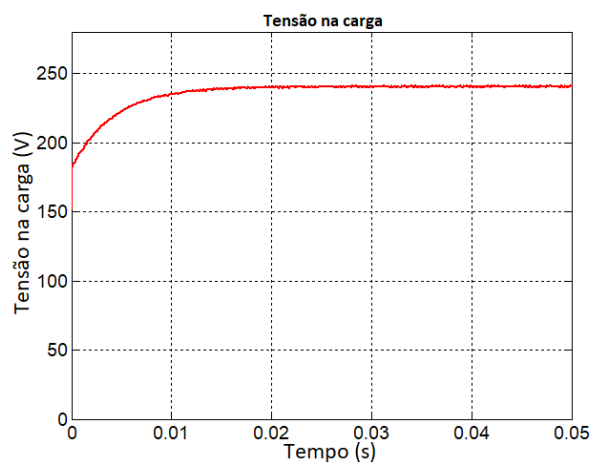


Figura 47 – Forma de onda da tensão na carga do conversor de 48 pulsos

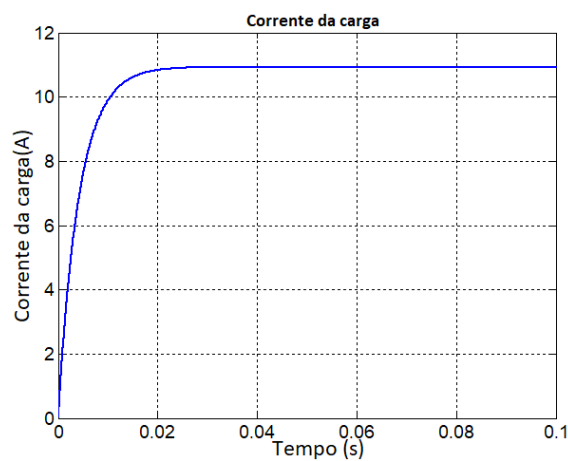


Figura 48 – Forma de onda da corrente na carga do conversor de 48 pulsos

A figura 49 mostra as formas de ondas das tensões de saída de dois grupos de 24 dos retificadores. Observe-se um defasamento de $7,5^\circ$ através da análise da mesma figura.

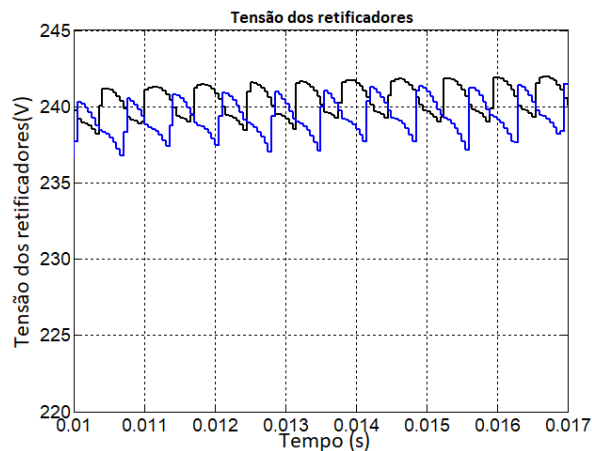


Figura 49 – Forma de ondas das tensões de saída nos dois grupos de 24 de retificadores.

No intuito de analisar o THD da corrente da fonte, foi utilizado em simulink bloco chamado «powergui» que possibilitou a medição de amplitudes da fundamental e dos harmônicos em determinadas frequências.

A figura 50 mostra o espectro harmônico da corrente do lado da fonte.

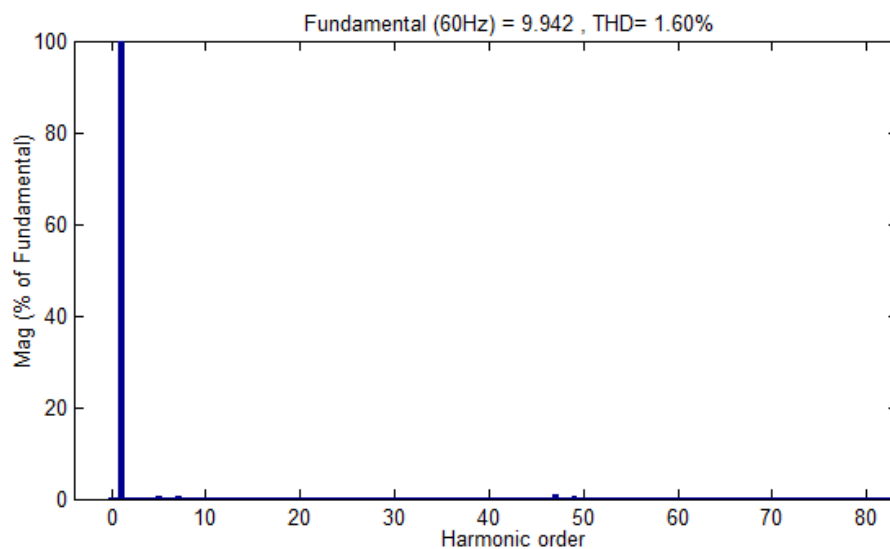


Figura 50 – Espectro de harmônico do sistema de 48 pulsos

Observe-se no espectro harmônico, os harmônicos de ordem 47^a (cujo amplitude equivale a $\frac{1}{47}$) e 49^a com baixa amplitude. Também, notem-se os harmônicos de ordem 5° e 7° devido ao desequilíbrio ocorrido no sistema durante a simulação.

Este sistema multi-conversor de 48 pulsos apresenta um THD igual a 1,6% e atinge menos de 5% de distorção harmônica total, atendendo aos limites da IEEE 519 [26].

A tabela 11 abaixo mostra a comparação entres os conversores de 12, 24 e de 48 pulsos. Note-se que quanto maior é o número de pulsos em um sistema multi-pulsos, menor é o THD.

Tabela 11 – Tabela de comparação de THD

Conversores	THD
12 pulsos	12,27%
24 pulsos	3,94%
48 pulsos	1,60%

5.4 Consideração final

Os resultados obtidos após a implementação do sistema multi-conversor de 48 pulsos em Matlab/Simulink[®] são bastante satisfatórios. A corrente da fonte tem tido um comportamento praticamente senoidal e a tensão na carga é aproximadamente constante. Isto significa que o sistema proposto é eficaz de ponto de vista viabilidade de estudo de implementação.

O THD proveniente da simulação do mesmo sistema é extremamente aceitável apresenta a viabilidade técnica do mesmo e requer sua utilização na industria do alumínio pois este sistema possibilitou perfeitamente a mitigação de harmônicos.

Conclusão geral

A proposta do sistema multi-conversor de 48 pulsos apresentado nesta dissertação apresenta vantagens no aspecto de facilidades de manutenção e de menor custo por utilizar quatro unidades idênticas de transformadores de três enrolamentos, portanto mais barato, com facilidade de substituição, e menor ocupação de espaço físico, além de que o aumento do número de pulsos do sistema conversor propiciados pela utilização destes transformadores especiais favorece sobremaneira o aspecto de mitigação harmônica, pois a rede enxerga uma corrente de alimentação do conversor praticamente senoidal, com o harmônico de ordem 47^a praticamente de valor eficaz atenuado.

Lembre-se que foram utilizados transformadores de interfase pois numa associação em paralelo, é importante que as tensões médias e ambas as pontes retificadoras sejam as mesmas. Mesmo nesta situação, faz-se uso de um indutor (ou deste transformador), sobre o qual se tem a diferença instantânea das tensões de cada um dos retificadores, a tensão média aplicada à carga será a média das duas tensões retificadoras e a corrente será dividida na razão inversa das reatâncias caso elas sejam iguais cada ponte fornecerá metade da corrente total.

Também o autotransformador trifásico ADZ necessário é de custo reduzido. Portanto, o sistema proposto é de fato bastante atrativo para ser utilizado em processos de extração de alumínio, os quais exigem corrente da ordem de centenas de kA , sendo necessário então tal mitigação harmônica, para que os demais consumidores do sistema industrial não sejam afetados prejudicialmente pelos efeitos adversos de harmônicos, citando-se, por exemplo, quedas de tensões, ressonâncias, que provocam sobretensões no sistema elétrico, perdas adicionais em máquinas elétricas e transformadores e interferências em sistema de telecomunicações, aspectos estes todos inconvenientes e que devem ser mitigados, mitigação esta contemplada de maneira atrativa neste trabalho.

Após o estudo do mesmo sistema, vejamos que ele apresenta uma perfeita redução de harmônicos pois o THD obtido é extremamente baixo, igual a 1,60% e a tensão na carga é praticamente constante.

Referências

- [1] JPG Abreu, AJJ Rezek, VF Silva, LEB Silva, and MS Miskulin. Harmonics elimination in multiconverter systems by using a special autotransformer (adz). *Proceedings AMSE Modelling, Simulation & Control*, pages 45–53. Citado 3 vezes nas páginas 17, 21 e 22.
- [2] JPG Abreu, AJJ Rezek, and A Candido. Modelling and implementation of 48-pulse multiconverter. *Proceedings IEEE-ICHPS*, pages 50–54, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 17, 21 e 22.
- [3] AJJ Rezek, JPG Abreu, VF Silva, JA Cortez, CR Borges, and AAS Izidoro. A comparative analysis between phase-shift transformers for application in multi-level converters. In *2001 Brazilian Power Electronics Congress, COBEP*, 2001. Citado na página 17.
- [4] Angelo Jose Junqueira Rezek et al. Modelagem e implementação de sistemas multi-conversores. (*Publicação FEE*), 1991. Citado na página 21.
- [5] AJJ Rezek. *Análise em regime permanente e transitório de um sistema de conversão de energia elétrica AC/DC*. PhD thesis, Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, EFEI, Itajubá, 1986. Nenhuma citação no texto.
- [6] Lenart Carlsson. Extended-delta converter transformer for 12-pulse operation in hvdc projects. In *International HVDC Seminar*, 1986. Nenhuma citação no texto.
- [7] JCG Siqueira and GHF Floriano. Espectro harmônico de uma função periódica, utilizando transformada de fourrier. *EFEI/CPq/DET, Itajubá, Brasil*, 1987. Citado na página 21.
- [8] AJJ Rezek, JPG Abreu, VF Silva, and MS Miskulin. Novas alternativas para transmissão hvdc. *Cigré, VI ERLAC, Fóz do Iguçu-PR*, 1995. Citado na página 21.
- [9] Erich Uhlmann. *Power transmission by direct current*. Springer Science & Business Media, 2012. Nenhuma citação no texto.
- [10] Jos Arrillaga. *High voltage direct current transmission*. Number 29. Iet, 1998. Nenhuma citação no texto.
- [11] Angelo JJ Rezek, José PG de Abreu, Valberto F da Silva, José ME Vicente, José A Cortez, Otavio HS Vicentini, Adriana Cortez de Sá, Adriana AS Izidoro, and Mauro S Miskulin. Melhoria do fator de potência através do aumento do número de pulsos

- de conversores graetz comutados pela rede: modelagem e resultados experimentais. *Revista Eletrônica de Potência, Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência*, 7(1):39–44, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 31.
- [12] curso de treinamento Petrobras. Exercício vsd abb. *Proceedings AMSE Modelling, Simulation & Control*, 2014. Citado na página 21.
- [13] AJJ Rezek, MS Miskulin, and JPG Abreu. Projeto auxiliado por computador aplicado a eletrônica de potência. *II Seminário de Eletrônica de Potência*, pages 102–109. Citado na página 22.
- [14] Angelo JJ Rezek, JPG Abreu, VF Silva, José ME Vicente, José A Cortez, Wanderson de O Assis, and Mauro S Miskulin. Power factor improvement of line-commutated graetz converters by increasing their number of pulses. In *V Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, pages 551–556. Nenhuma citação no texto.
- [15] Angelo JJ Rezek, Jose PG de Abreu, Valberto F da Silva, JME Vicente, JA Cortez, OHS Vicentini, AC de Sá, and MS Miskulin. Power factor improvement of line-commutated graetz converters by increasing their number of pulses: modeling and experimental results. In *Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on*, volume 1, pages 60–65. IEEE, 2002. Citado na página 22.
- [16] Bin Wu and Mehdi Narimani. *High-power converters and AC drives*. John Wiley & Sons, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- [17] Shota Miyairi, Shoji Iida, Kiyoshi Nakata, and Shigeo Masukawa. New method for reducing harmonics involved in input and output of rectifier with interphase transformer. *IEEE transactions on industry applications*, (5):790–797, 1986. Citado na página 24.
- [18] Chung-ming Young, Ming-hui Chen, Chien-hsiang Lai, and Der-Chun Shih. A novel control for active interphase transformer using in a 24-pulse converter. In *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, pages 2086–2091. IEEE, 2010. Nenhuma citação no texto.
- [19] RS Bhide and SV Kulkarni. Analysis of parallel operation of converters with interphase transformer. In *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on*, pages 193–196. IEEE, 2006. Citado na página 24.
- [20] Rodrigues R.R, Silva V.F, and Rezek A.J.J. Eletrônica de potência aplicada a sistemas elétricos. In *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on*, pages 193–196. IEEE, 2014. Citado na página 27.

- [21] Daniel S. Costa, Alexandre de C. Duarte, and Rafael de S Machado. Sistema conversor retificador de 12 pulsos utilizando transformador de 3 enrolamentos. In *Power Electronics, 2006. IICPE 2006. India International Conference on*, pages 193–196. IEEE, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.
- [22] Vinícius Assad Gonçalves. Redução de harmônicos de corrente em retificadores de múltiplos pulsos: generalização das conexões diferenciais. 2006. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.
- [23] Muhammad H Rashid. *Eletrônica de potência: Dispositivos circuitos e aplicações*, 2015. Citado na página 31.
- [24] Angelo JJ Rezek, Christel EG Ogoulola, José PG de Abreu, Luiz EB da Silva, Valberto F da Silva, Rafael Di Lorenzo Corrêa, José A Cortez, Carlos R Borges, Adriana A dos Santos Izidoro, and Thiago A de Mello Araujo. Winding turns calculus methodology for a new 48 pulse multiconverter system employing lower cost three winding special transformers. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International Conference on*, pages 18–23. IEEE, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.
- [25] João Carlos Pelicer Junior. Análise de conversor multipulso utilizando transformador com culatra intermediária. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 49, 50, 51 e 53.
- [26] Christopher K Duffey and Ray P Stratford. Update of harmonic standard ieee-519: Ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(6):1025–1034, 1989. Citado na página 69.

Apêndices

APÊNDICE A – Previsão de Equipamentos

Foi feita uma lista de equipamentos (transformadores especiais), a serem adquiridos descrevendo para cada equipamentos: especificação técnica.

A.1 Especificações dos equipamentos necessários

A.1.1 Transformadores de três enrolamentos especial

Primário: conexão delta estendido $7,5^\circ$, potência 2 [kVA], tensão fase-fase 220 [V].

Secundário: Conexão estrela, potência 1 [kVA], tensão fase-fase 180 [V].

Terciário: conexão delta, potência 1 [kVA], tensão fase-fase 180 [V].

Para a obtenção da defasagem de $7,5^\circ$ da conexão delta estendido e tensões indicadas, uma relação de número de espiras deverá ser obedecida sendo:

N_1 : Número de espiras da conexão secundário

$N_2 = 0,9354 \times N_1$: Conexão primária delta estendido

$N_3 = 0,5525 \times N_1$: Conexão secundário delta estendido

$N_4 = 1,7320 \times N_1$: Conexão terciária delta

Lembre-se que N_1 é o número de espiras da conexão estrela secundária.

Estes valores foram obtidos a partir de um nosso artigo apresentado no COBEP (Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência), realizado em Florianópolis em 2001 [?].

Quantidade 4

A.1.2 Autotransformador defasador especial trifásico, tipo ADZ

Primário: Tensões fase-fase/fase-neutro 220/127 [V]

Secundário: Tensão fase-fase/fase-neutro 220/127 [V]

Potência: 4 [kVA]

$N_2 = 0,08359 \times N_1$ e $N_3 = 0,0677 \times N_1$

A.1.3 Transformador especial estrela delta estendido

Primário: Tensões fase-fase/fase-neutro 220/127 [V]

Secundário: Tensão fase-fase/fase-neutro 220/127 [V]

Potência: 4 [kVA]

$N_2 = 0,7653 \times N_1$ e $N_3 = 0,4520 \times N_1$

APÊNDICE B – Transformadores trifásicos especiais e autotransformador construídos

Com base nos cálculos feitos, foram enviados os dados para uma empresa para a construção dos transformadores. Foram construídos ao total, conforme este projeto, quatro (04) transformadores com três enrolamentos e um (01) autotransformador.

As figuras 51 e 52 mostram o transformador trifásico com três enrolamentos e o autotransformador tipo ADZ.

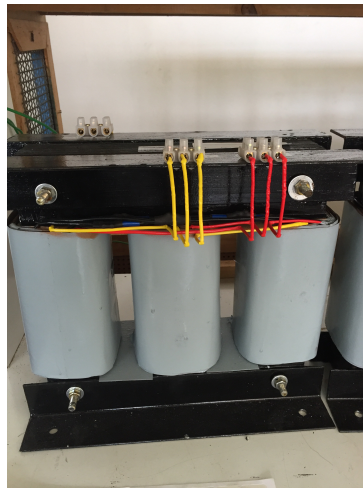


Figura 51 – Transformador trifásico com três enrolamentos.

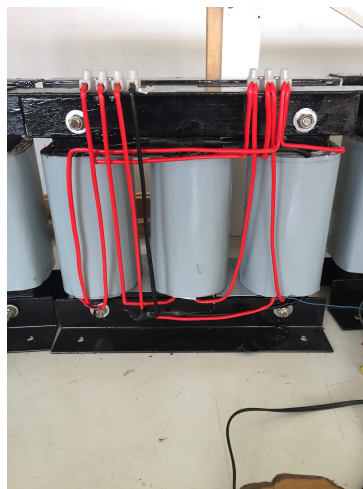


Figura 52 – Autotransformador trifásico ADZ .

Estes transformadores serão utilizados para a fase prática que será realizada para implementação no laboratório.