

TESE

1124

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**“ Implementação Computacional do Transformador
T : ADZ Aplicado a Conversores de Potência ”**

ROBSON ALMIR DE OLIVEIRA

Dezembro de 2001



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**“IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL
DO TRANSFORMADOR T-ADZ APLICADO A
CONVERSORES DE POTÊNCIA”**

por **Róbson Almir de Oliveira**

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá, como parte dos requisitos, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mohallem Guimarães

Co-Orientador: Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu

Dezembro de 2001

_____	PLANO
_____	INSTITUIÇÃO
_____	TÍTULO

Agradecimentos

A Deus, pelo dom de viver.

Aos meus pais, José Benício e Maria Aparecida, pela educação e orientação.

Aos meus irmãos, João e Vitorino, pelo apoio e incentivo durante este trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Alberto M. G. G. pela confiança depositada e pelo apoio durante este trabalho.

Ao professor Dr. José Poliana Cruzalves de Almeida, pela orientação e apoio durante este trabalho.

Ao meu amigo e doutor Gilson, pela paciência, pelas sugestões, palavras motivadoras e encorajadoras, pelas conversas e trocas de ideias durante este trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, do Centro de Estudos, especialmente, Fernando e Daniel, pelo carinho, pela amizade e pelo apoio durante este trabalho.

Aos professores Fernando, Valério e Sérgio, pelo apoio durante este trabalho.

Aos companheiros do GGER, pela amizade, incentivo e encorajamento durante este trabalho.

**À minha esposa Gláucia pelo amor,
compreensão e apoio durante
todos os momentos.**

Aos funcionários da PPG, BIM, OIA e demais departamentos, pelo apoio durante este trabalho.

A CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

A Inepi Nacional pelo apoio à conclusão deste trabalho.

CLASS.	621.316.728(043).2)
CUTTER.	Q48i
TOMBO.	1124

A minha esposa Gláucia pelo amor,
compromisso e apoio durante
todos os momentos.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom de viver.

Aos meus pais, José Benício e Maria Aparecida, pelo apoio e compreensão.

Aos meus sogros, João e Vanildes, pelo apoio e amizade durante este trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Mohallem Guimarães, meu mais profundo agradecimento e respeito, pela confiança depositada e pela orientação segura.

Ao professor Dr. Jose Policarpo Gonçalves de Abreu, pela confiança depositada.

Ao meu amigo e doutor Gilson, pela paciência, pelas conversas sempre instrutivas e animadoras, pelos conhecimentos transmitidos e pela grande atenção dispensada durante todos os momentos deste trabalho.

Aos meus colegas de república, João Ricardo, Marquinhos, Ezequiel e Daniel, pelo carinho, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos professores Hermeto, Valberto e Arango, pela atenção dispensada e o apoio recebido.

Aos companheiros do GQEE, pela amizade, incentivo e conhecimentos transmitidos ao longo deste trabalho.

Aos funcionários da PPG, BIM, DRA e DET, pelos auxílios, esclarecimentos e atenção dispensados durante a realização deste trabalho.

À CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

À Itaipu Binacional pelo apoio à conclusão deste trabalho.

Resumo

Atualmente, a qualidade da energia elétrica – QEE tem se tornado centro de grandes preocupações pelos mais diversos setores, principalmente pelos consumidores e fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos, em face da má operação destes equipamentos e, conseqüentemente, dos prejuízos associados aos diversos processos industriais.

Neste contexto, esta dissertação apresenta a implementação computacional de um novo dispositivo eletromagnético, denominado de T-ADZ, capaz de minimizar os efeitos dos desequilíbrios de tensão da rede elétrica. Esse novo dispositivo é baseado no Autotransformador ADZ, desenvolvido por Abreu [Ab91], que é capaz de disponibilizar em sua saída tensões defasadas em módulo e em ângulo, de forma independente para cada fase. A validação computacional, da aplicação deste equipamento na alimentação de conversores de potência mostra a minimização do aparecimento de harmônicos não característicos na corrente de entrada, contribuindo para uma energia de melhor qualidade.

Com este objetivo, o trabalho apresenta o modelo de conversores de 12 pulsos, em sua topologia convencional e na topologia utilizando o T-ADZ, ambos implementados no pacote computacional EMTP. Os resultados apresentados foram obtidos considerando-se diversas condições de desequilíbrio da rede de alimentação.

Adicionalmente, esta dissertação traz ainda um estudo sobre a influência de diversas condições de desequilíbrio de tensão na operação de conversores de potência e, principalmente, na geração de harmônicos não característicos. Este estudo permite, da mesma forma, observar a eficácia do T-ADZ na minimização desses harmônicos, o que permite concluir que o mesmo é também eficaz na mitigação de desequilíbrios de tensão.

Abstract

Nowadays, Power Quality - PQ, has become center of great concerns for most consumers and manufacturers of electronics equipment, in face of the bad operation of these equipment associated damages in industrial process.

In this context, this work presents the computational implementation of a new electromagnetic device, named T-ADZ, which can minimize the effect of voltage imbalances in the electric network. This new device is based on a special transformer ADZ, whose connection arrangement is similar to an autotransformer. The ADZ has a complex and variable transformation ratio, enabling it to provide a non-conventional phase-shift between I-O voltage signals. Thus, ADZ allows variations for the output voltage magnitude and/or phase angle by means of the taps of its auxiliary coils.

Another purpose of this dissertation is the computational validation of the application of this equipment to feeding power converters. It shows the reduction of non-characteristic harmonics, contributing for a better Power Quality.

This dissertation presents the model of 12-pulse power converters, considering conventional and T-ADZ topology, both implemented by means of EMTP package. The results have been obtained considering several voltage imbalance conditions.

Finally, a study of the influence of several conditions of voltage unbalanced in operation of power converters, specially in the generation of non-characteristic harmonics, is also presented. Through this analysis, the effectiveness of the T-ADZ can be also observed.



Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Sumário.....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xi
Simbologia	xii
Capítulo I - Introdução	1
1.1 - Considerações Iniciais.....	1
1.2 - Motivação da Dissertação	3
1.3 - Proposta da Dissertação	4
1.4 - Apresentação do Conteúdo da Dissertação.....	5
Capítulo II - Generalidades Sobre QEE, Harmônicos e Desequilíbrios de Tensão	7
2.1 - Considerações Iniciais.....	7
2.2 - A Qualidade da Energia Elétrica	8
2.2.1 - Itens de Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.....	8
2.3 - Harmônicos.....	10
2.3.1 - Principais Fontes de Harmônicos.....	10
2.3.1.1 - Geração Harmônica pelos Sistemas Conversores CA/CC.....	11
2.3.2 - Principais Conseqüências dos Harmônicos	13
2.3.3 - Soluções para o problema de Harmônicos.....	14

2.3.3.1 - Disparo Assimétrico dos Tiristores do Conversor:	14
2.3.3.2 - Conversores “G”:	15
2.3.3.3 - Transformadores Tri-Pentafásicos Para Conversores Estáticos de Potência.....	16
2.4 - Desequilíbrio de Tensão.....	16
2.4.1 - Principais Fontes de Desequilíbrios de Tensão	18
2.4.2 - Conseqüências dos Desequilíbrios de Tensão	19
2.4.3 - Soluções para o Problema de Desequilíbrios de Tensão	20
2.4.3.1 - Transformador regulador para controle do módulo da tensão:	20
2.4.3.2 - DVR -Dynamic Voltage Restorer.....	21
2.4.3.3 - Condicionadores Universais de Energia	21
2.4.3.4 – A aplicação do ADZ na Compensação de Desequilíbrios e de Quedas de Tensão - LDUC.....	22
2.5 – Conclusões	22

Capítulo III - O Transformador Defasador em Ziguezague - T-ADZ

3.1 - Considerações Iniciais.....	24
3.2 - O Autotransformador Defasador - ADZ	25
3.3 – A aplicação LDUC	27
3.3.1 - Modelagem Matemática da aplicação LDUC	28
3.3.2 - Obtenção dos Parâmetros da aplicação LDUC:	31
3.4 - O T-ADZ.....	34
3.4.1 - Relação Fundamental do T-ADZ	36
3.4.2 - Obtenção dos tapes e polaridades para o T-ADZ.....	39
3.5 - Conclusões.....	40

Capítulo IV - Desenvolvimento e Aplicação da Ferramenta

Computacional para a Validação do T-ADZ.....	41
---	-----------

4.1 - Considerações Iniciais.....	41
4.2 - O EMTP	42
4.2.1 - Estrutura de Dados do EMTP	42
4.2.2 - Modelo do T-ADZ para o EMTP	43
4.3 - Simulação dos Modelos no EMTP	47
4.3.1 - Resultados	48
4.3.1.1 - Topologia Clássica Alimentando o Conversor de 12 Pulsos.....	48
4.3.1.2 - Topologia T-ADZ Alimentando o Conversor de 12 Pulsos	54
4.4 - Conclusão.....	59

Capítulo V - Análise de Conversores de 12 Pulsos sob Desequilíbrio de

Tensão	61
5.1 - Considerações Iniciais.....	61
5.2 - Simulações em EMTP	62
5.2.1 - Desequilíbrios de Tensão com VUF Variável.....	62
5.2.2 - Desequilíbrios de Tensão com VUF Constante.....	66
5.3 - Conclusões	71

Capítulo VI - Conclusões e Sugestões

Anexos	78
Anexo I – Fluxograma de cálculo dos Tapes e Polaridades do T-ADZ	79
Anexo II – Programa em Matlab de cálculo dos tapes e polaridades do T-ADZ	84
Anexo III – Estrutura geral de dados do EMTP	90
Anexo IV – Programa em EMTP do T-ADZ em conjunto com o conversor de 12 pulsos	104

Bibliografia ..

Lista de Figuras

Capítulo I

Figura 1.1 - Sistema de alimentação com a nova topologia proposta.	5
---	---

Capítulo II

Figura 2.1 - Controle do módulo de tensão.	21
---	----

Capítulo III

Figura 3.1 - Conexão do ADZ.	25
Figura 3.2 - Tensão de saída do ADZ considerando-se $N2 = N3$	27
Figura 3.3 - Sistema de balanceamento da aplicação LDUC.	30
Figura 3.4 - Zoom no lugar geométrico da aplicação LDUC.	33
Figura 3.5 - Modelo do T-ADZ para conversores de 12 Pulsos.	35

Capítulo IV

Figura 4.1 - Um Modelo de Transformador para o EMTP.	44
Figura 4.2 - Modelo do T-ADZ para o EMTP.	45
Figura 4.3 - Modelo do T-ADZ e do conversor de 12 pulsos para o EMTP.	45
Figura 4.4 - Modelo do conversor de 12 pulsos com a topologia clássica D/Y/D.	46
Figura 4.5 - Corrente de linha do conversor de 12 pulsos – topologia clássica.	48
Figura 4.6 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia clássica.	49
Figura 4.7 - Espectro harmônico da corrente de linha, fase A.	50
Figura 4.8 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.	50
Figura 4.9 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.	51
Figura 4.10 - Corrente de linha do conversor de 12 pulsos – topologia clássica.	51
Figura 4.11 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia clássica.	52
Figura 4.12 - Espectro harmônico da corrente de linha fase A.	52
Figura 4.13 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.	53
Figura 4.14 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.	53
Figura 4.15 - Corrente de linha do conversor de 12 pulsos - topologia T-ADZ.	54

Figura 4.16 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia T-ADZ.....	54
Figura 4.17 - Espectro harmônico da corrente de linha fase A.....	55
Figura 4.18 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.....	55
Figura 4.19 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.....	56
Figura 4.20 – Corrente de linha do conversor de 12 pulsos – topologia T-ADZ.....	56
Figura 4.21 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia T-ADZ.....	57
Figura 4.22 - Espectro harmônico da corrente de linha fase A.....	57
Figura 4.23 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.....	58
Figura 4.24 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.....	58

Capítulo V

Figura 5.1 - Terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	63
Figura 5.2 - Quinto harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	63
Figura 5.3 - Sétimo harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.	64
Figura 5.4 - Nono harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	64
Figura 5.5 – Décimo primeiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	65
Figura 5.6 – Décimo Terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	65
Figura 5.7 - Terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	68
Figura 5.8 - Quinto harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	68
Figura 5.9 - Sétimo harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.	69
Figura 5.10 - Nono harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	69
Figura 5.11 - Décimo primeiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	70
Figura 5.12 - Décimo terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.....	70

Lista de Tabelas

Capítulo II

Tabela 2.1 - Classificação Geral dos Distúrbios na QEE segundo IEEE 1159/95.....	9
Tabela 2.2 - Harmônicos característicos em sistemas conversores.....	12
Tabela 2.3 - Limites permissíveis para Desequilíbrio de Tensão.....	19

Capítulo IV

Tabela 4.1 - Casos selecionados.....	48
--------------------------------------	----

Capítulo V

Tabela 5.1 - Tensões fase-neutro com VUF variável.....	62
Tabela 5.2 - Tensões fase-neutro para VUF de 4%.	66
Tabela 5.3 - Tensões fase-neutro para um VUF de 6%.....	67

Simbologia

A	Fase A Módulo da tensão da fase A
ADZ	Autotransformador Defasador Zigue-Zague
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B	Fase B Módulo da tensão da fase B
C	Fase C Módulo da tensão da fase C
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
EMTP	<i>Eletromagnetic Transients Program</i>
h	Ordem Harmônica
Hz	Hertz
i	Corrente de magnetização
i_A	Corrente de linha da fase A
i_{a1}	Corrente de saída da fase A da estrela
i_{a2}	Corrente de saída da fase A do delta
i_B	Corrente de linha da fase B
i_{b1}	Corrente de saída da fase B da estrela
i_{b2}	Corrente de saída da fase B do delta
i_C	Corrente de linha da fase C
i_{c1}	Corrente de saída da fase C da estrela
i_{c2}	Corrente de saída da fase C do delta
ICHQP	<i>International Conference on Harmonics and Quality of Power</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITHD	Distorção Harmônica Total de Corrente
K_1	Polaridade da primeira bobina auxiliar
K_{1A}	Polaridade da primeira bobina auxiliar fase A
K_{1B}	Polaridade da primeira bobina auxiliar fase B
K_{1C}	Polaridade da primeira bobina auxiliar fase C
K_2	Polaridade da segunda bobina auxiliar
K_{2A}	Polaridade da segunda bobina auxiliar fase A
K_{2B}	Polaridade da segunda bobina auxiliar fase B
K_{2C}	Polaridade da segunda bobina auxiliar fase C
L_a	Indutância da rede - fase A
L_b	Indutância da rede - fase B

Lc	Indutância da rede - fase C
LDUC	<i>Line Drop and Unbalance Compensator</i>
Ln	Indutância do enrolamento n
ms	Milissegundos
n	Número de pulsos
N1	Número de espiras da bobina principal
N2	Número de espiras da primeira bobina auxiliar
N3	Número de espiras da segunda bobina auxiliar
N4	Número de espiras da primeira bobina secundária
N5	Número de espiras da segunda bobina secundária
ns	Nanossegundos
p	Inteiro positivo
pu	Por unidade
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
Rmag	Resistência de magnetização
Rn	resistência do enrolamento n
s	Segundo
SBQEE	Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica
T ₁	Tape da primeira bobina auxiliar
T _{1A}	Tape da primeira bobina auxiliar fase A
t _{1A}	Fator que reúne o tape e a polaridade da primeira bobina auxiliar - fase A
T _{1B}	Tape da primeira bobina auxiliar fase B
t _{1B}	Fator que reúne o tape e a polaridade da primeira bobina auxiliar - fase B
T _{1C}	Tape da primeira bobina auxiliar fase C
t _{1C}	Fator que reúne o tape e a polaridade da primeira bobina auxiliar - fase C
T ₂	Tape da segunda bobina auxiliar
T _{2A}	Tape da segunda bobina auxiliar fase A
t _{2A}	Fator que reúne o tape e a polaridade da segunda bobina auxiliar - fase A
T _{2B}	Tape da segunda bobina auxiliar fase B
t _{2B}	Fator que reúne o tape e a polaridade da segunda bobina auxiliar - fase B
T _{2C}	Tape da segunda bobina auxiliar fase C
t _{2C}	Fator que reúne o tape e a polaridade da segunda bobina auxiliar - fase C
T-ADZ	Transformador Defasador em Zigue-Zague

$\dot{\hat{V}}^-$	Módulo da tensão de seqüência positiva
$\dot{\hat{V}}^+$	Módulo da tensão de seqüência negativa
$\dot{\hat{V}}_A$	Fasor de tensão em pu da fase A
$\dot{\hat{V}}_B$	Fasor de tensão em pu da fase B
$\dot{\hat{V}}_C$	Fasor de tensão em pu da fase C
$\dot{\hat{V}}_{NA}$	Tensão fase neutro da fase A em fasor e em pu
$\dot{\hat{V}}_{NB}$	Tensão fase neutro da fase B em fasor e em pu
$\dot{\hat{V}}_{NC}$	Tensão fase neutro da fase C em fasor e em pu
$\dot{\hat{V}}_S$	Fasor de tensão de saída em pu
\dot{V}^+	Módulo da tensão de seqüência positiva
\dot{V}_A	Fasor de tensão da fase A
\dot{V}_B	Fasor de tensão da fase B
\dot{V}_C	Fasor de tensão da fase C
\dot{V}_X	Fasor de tensão na saída do ADZ fase A
\dot{V}_Y	Fasor de tensão na saída do ADZ fase B
\dot{V}_Z	Fasor de tensão na saída do ADZ fase C
\dot{V}_{AV}	Tensão média
V_A	Módulo da tensão da fase A
V_{Ad}	Tensão de saída da fase A do delta
V_{Ae}	Tensão de saída da fase A da estrela
V_{Bd}	Tensão de saída da fase B do delta
V_{Be}	Tensão de saída da fase B da estrela
V_{Cd}	Tensão de saída da fase C do delta
V_{Ce}	Tensão de saída da fase C da estrela
V_{MAX}	Maior das tensões em módulo
V_{MIN}	Menor das tensões em módulo
VUF	Fator de Desequilíbrio de Tensão
X	Módulo da tensão da fase A na saída do ADZ
Y	Módulo da tensão da fase B na saída do ADZ
Z	Módulo da tensão da fase C na saída do ADZ
$1\phi - A$	Defasamento desigual de uma fase
$1\phi - OV$	Elevação de tensão em uma fase
$1\phi - UV$	Queda de tensão monofásica

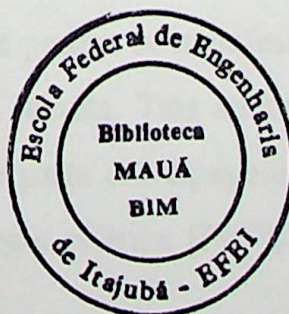
$2\phi - A$	Defasamento desigual de duas fases
$2\phi - OV$	Elevação de tensão em duas fases
$2\phi - UV$	Queda de tensão em duas fases
$3\phi - OV$	Elevação de tensão em três fases
$3\phi - UV$	Queda de tensão em três fases
ψ	Fluxo magnético
μs	Microssegundos
ΔV	Máximo desvio das tensões com a relação a média

1.1 - Considerações Iniciais

Atualmente, com a crescente utilização da rede elétrica com o intuito de promover a expansão da produção e na comercialização da energia elétrica, está diante de um cenário de um cenário cada vez mais complexo e por isso a produção de energia elétrica tornou-se um problema mundial, a energia elétrica nos países desenvolvidos é produzida em usinas hidrelétricas, eólicas e nucleares, enquanto nos países em desenvolvimento a produção de energia elétrica é feita em usinas termelétricas, a maioria delas são movidas a carvão. A falta de QEE (Qualidade de Energia Elétrica) surge como um dos grandes desafios do setor, pois quando falamos, afeta em muito os processos produtivos modernos, isso pode ser evidenciado pelo impacto econômico da ordem de bilhões de dólares de perda de produtividade em países desenvolvidos devido à falta de QEE e que, quando se fala em setores específicos, também estão presentes no Brasil (Cesee).

A importância de QEE também pode ser evidenciada pelo fato de que ela está no centro de grandes discussões e preocupações por parte de autoridades de setor, dos consumidores, dos produtores e dos fabricantes de equipamentos, isso vem se tornando fonte a origem do assunto que atravessa no mundo todo.

Os problemas com a QEE são variados e podem ser classificados em dois tipos: problemas de natureza elétrica, mais associados ao sistema de transmissão e distribuição, e problemas de natureza mecânica, relacionados ao sistema de geração de energia elétrica. Os problemas de natureza elétrica são mais comuns e podem ser classificados em dois tipos: problemas de natureza elétrica, mais associados ao sistema de transmissão e distribuição, e problemas de natureza mecânica, relacionados ao sistema de geração de energia elétrica.



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

Atualmente, com a crescente privatização do setor elétrico com o intuito de promover a competição na geração e na comercialização da energia elétrica, esta deixou de ser considerada um subsídio estatal e passou a ser um produto dentro do processo produtivo do país. Desta forma, sendo um produto comercial, a energia elétrica está sujeita, por parte dos órgãos competentes, a exigências, a fiscalizações e a penalizações. Dentro desta nova conjuntura do setor elétrico brasileiro, a qualidade da energia elétrica (QEE) surge como um dos grandes desafios do setor, pois quando imprópria, afeta em muito os processos produtivos modernos. Isto pode ser sintetizado pelo impacto econômico, da ordem de bilhões de dólares, de perdas já contabilizadas em países desenvolvidos devido à falta de QEE e que, guardadas as devidas proporções, também estão presentes no Brasil [Ca98B].

A importância da QEE também pode ser evidenciada pelo fato de que ela está no centro de grandes discussões e preocupações por parte das autoridades do setor, dos consumidores, dos produtores e dos fabricantes de equipamentos, haja vista os inúmeros fóruns a respeito do assunto que acontecem no mundo todo.

Os problemas com a QEE estão vinculados a um conjunto de alterações no fornecimento elétrico, cujas alterações ou anomalias podem se manifestar em diferentes pontos da rede, podendo ser de natureza local ou remota. Tais anormalidades podem causar problemas de operação e/ou de consumo por parte dos equipamentos elétricos e, conseqüentemente, maiores desembolsos com energia elétrica [Pe97]. Em casos mais

extremos, equipamentos podem ser danificados ou até mesmo destruídos se submetidos a uma rede elétrica com este tipo de problema.

Vale também ressaltar que, nas últimas décadas, a natureza do setor elétrico alterou-se profundamente, migrando-se de um sistema puramente eletromecânico para um sistema, sobretudo, eletroeletrônico. E, isto se deve à grande evolução da eletrônica de potência e da microeletrônica. Os avanços nestas duas áreas têm contribuído, de forma notável, para o grande aumento da produção industrial mundial e para o uso mais eficiente da energia elétrica. Contudo, esta verdadeira revolução trouxe também suas conseqüências, tal como a distorção dos sinais de corrente e tensão, que passaram a não mais apresentar características puramente senoidais. Isto se deu de tal forma que os índices de produtividade preconizados pelos projetos fabris não são, por vezes, atingidos, seja na sua forma quantitativa, seja na sua forma qualitativa.

Isto tem levado, cada vez mais, a se buscar soluções para o problema da QEE, assim como buscar uma legislação que seja eficiente, de forma a garantir tanto aos consumidores quanto aos produtores ou distribuidores um real consenso sobre o assunto. Há muitos aspectos sobre QEE que ainda merecem uma maior discussão entre os diversos setores ligados a energia elétrica (concessionárias, consumidores, fabricantes de equipamentos, órgãos reguladores, universidades e centros de pesquisas). Dentro destes aspectos, destacam-se [An98] [Pa96]:

- ↳ a necessidade de uma conceituação apropriada do fenômeno perturbador que causa a perda da QEE;
- ↳ a necessidade de se ter uma nomenclatura adequada e uma simbologia padronizada;
- ↳ a definição de uma metodologia específica no tratamento de cada fenômeno;
- ↳ uma efetiva atuação no controle de desempenho e da qualidade do serviço das empresas privatizadas, bem como a participação dos órgãos de defesa do consumidor, viabilizando o efetivo e legal respeito dos direitos;

- ↳ a estruturação e a atuação das entidades estaduais de fiscalização e controle, de forma complementar à atuação da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;
- ↳ a disponibilidade de equipamentos capazes de, simultaneamente, avaliar os índices de qualidade e determinar os responsáveis pela poluição no sistema elétrico, sejam eles consumidores ou concessionárias;
- ↳ estabelecer qual a penalização a ser aplicada e qual o rigor associado, uma vez determinado os responsáveis;
- ↳ desenvolver estudos, a fim de se ponderar o custo financeiro decorrente da perda de QEE e, isto posto, acordar metas condizentes.

1.2 - Motivação da Dissertação

No trabalho desenvolvido por Ngandui [Ng97], foi apresentada uma alternativa para se mitigar o aparecimento de harmônicos não característicos na rede de alimentação provenientes de conversores estáticos, operando sob condições desequilibradas da rede de alimentação, através do disparo assimétrico dos dispositivos semicondutores do conversor. Porém, este trabalho trouxe como benefício somente a melhora das condições de alimentação da carga conectada do lado CC do conversor, sem, efetivamente, atenuar os harmônicos não característicos na rede.

Motivado por uma solução que viesse resolver o problema da injeção de harmônicos não característicos gerados por conversores de potência, alimentados por tensões desequilibradas no lado CA do conversor, foi desenvolvida uma Tese de Doutorado por Gilson Paulillo [Pa01], no âmbito do Grupo de Estudos sobre a QEE, da EFEI. Dentro da filosofia implementada por este grupo de pesquisa, como parte integrante desta investigação maior, foi gerada a motivação para esta Dissertação de Mestrado, a qual aborda a implementação computacional de uma nova topologia de transformadores para alimentação de conversores de potência, alimentados com tensões desequilibradas.

1.3 - Proposta da Dissertação

Reconhecendo-se os harmônicos e desequilíbrios de tensão como dois graves problemas dentro do universo da QEE, esta dissertação apresenta o modelo e a implementação computacional de uma nova alternativa para se mitigar os harmônicos não característicos produzidos por conversores estáticos alimentados com tensões desequilibradas. Esta nova alternativa é baseada num dispositivo eletromagnético, um transformador especial, que permite minimizar ou até mesmo eliminar os efeitos dos desequilíbrios de tensão na rede elétrica. Como resultado da aplicação desta nova alternativa, espera-se:

- a mitigação dos harmônicos não característicos injetados na rede de alimentação pelos sistemas multiconversores;
- a melhoria na qualidade da tensão que alimenta a carga conectada no lado CC do conversor, uma vez que a ondulação apresentada por esta é reduzida.

Esta nova alternativa é baseada, concomitantemente, no Autotransformador Defasador em Ziguezague – ADZ, concebido e implementado por Abreu [Ab91], e na aplicação deste à compensação de desequilíbrios de tensão, denominada *Line Drop and Unbalance Compensator* - LDUC [Pa96].

Neste sentido, buscou-se uma solução inicial baseada no ADZ. Contudo, o mesmo não foi utilizado pelo fato de não apresentar desacoplamento galvânico entre a tensão de entrada e a tensão de saída, requisito imprescindível na alimentação de sistemas multiconversores de potência.

Desta maneira, a solução encontrada foi o desenvolvimento de um novo membro da família de transformadores ADZ, aplicado à alimentação de conversores de potência, denominado de Transformador Defasador em Ziguezague – T-ADZ [Pa01] e, que têm como característica principal, a mitigação do desequilíbrio de tensão, da rede de alimentação, aplicada ao sistema multiconversor.

Esta nova topologia, originalmente concebida para a alimentação de cargas não lineares, tais como conversores estáticos, também pode ser aplicada à alimentação de cargas lineares, do tipo motores de indução, em redes elétricas que, sobretudo, apresentam um elevado nível de desequilíbrio de tensão. A fim de se comprovar a sua eficácia, este trabalho apresentará o modelo desta nova topologia, a qual será implementada no pacote computacional EMTP (*Electromagnetics Transients Program*).

A figura 1.1 ilustra uma aplicação típica desta nova solução. Onde através de transformadores de potencial (TP's) o sistema de controle detecta o desequilíbrio de tensão da rede, processa-se o cálculo dos parâmetros do T-ADZ e comanda a comutação dos tapes do mesmo, de forma que se tenha na carga tensões equilibradas.

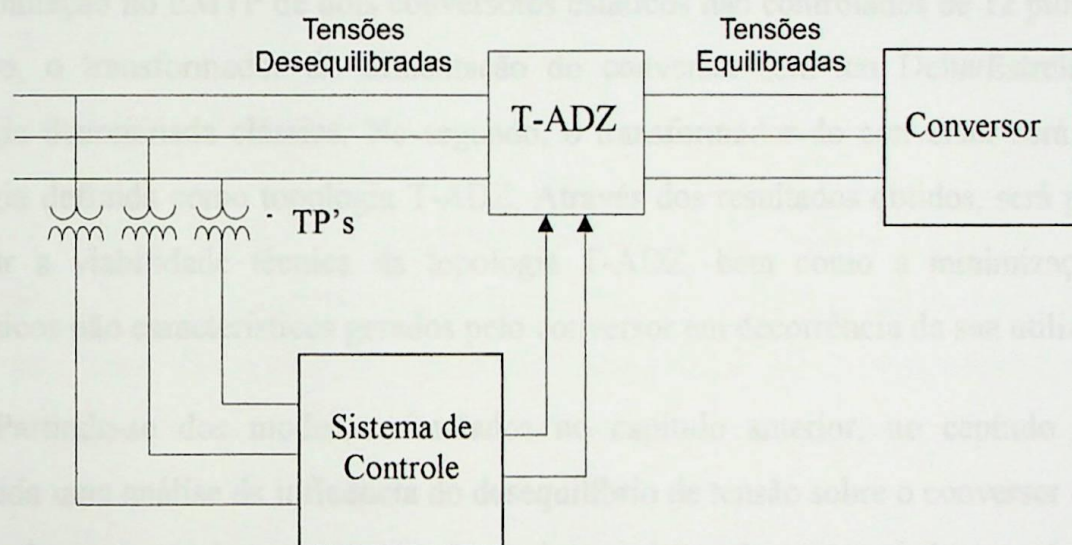


Figura 1.1 - Sistema de alimentação com a nova topologia proposta.

1.4 - Apresentação do Conteúdo da Dissertação

No capítulo II, será apresentada, de forma introdutória, a definição do que é energia elétrica de boa qualidade, bem como os principais itens de sua avaliação. Desta forma, situado o leitor no universo da QEE, abordar-se-ão dois de seus problemas, ambos relacionados com a proposição desta dissertação: os desequilíbrios de tensão e os harmônicos. Esta abordagem se dará de forma introdutória, apresentando-se, na seqüência, as principais causas, as conseqüências e as soluções possíveis destes dois problemas.

No capítulo III, serão abordados os aspectos relevantes sobre o ADZ e sobre sua aplicação na correção de desequilíbrios de tensão denominada LDUC. Consolidadas estas bases, será apresentada a nova alternativa de alimentação de conversores estáticos, a qual foi denominada topologia T-ADZ, a qual foi desenvolvida por Paulillo [Pa01] em sua Tese de Doutorado. Esta se constitui em um transformador especial que permite a correção dos desequilíbrios de tensão e que pode ser aplicado tanto na alimentação de cargas lineares quanto de cargas não lineares.

No capítulo IV, será exibida a estrutura do pacote computacional de simulação escolhido para a comprovação do modelo apresentado no capítulo anterior – EMTP (*Electromagnetics Transients Program*). Neste sentido, serão apresentados os modelos para simulação no EMTP de dois conversores estáticos não controlados de 12 pulsos. No primeiro, o transformador de alimentação do conversor será um Delta/Estrela/Delta, topologia denominada clássica. No segundo, o transformador do conversor será a nova topologia definida como topologia T-ADZ. Através dos resultados obtidos, será possível verificar a viabilidade técnica da topologia T-ADZ, bem como a minimização dos harmônicos não característicos gerados pelo conversor em decorrência da sua utilização.

Partindo-se dos modelos simulados no capítulo anterior, no capítulo V será conduzida uma análise da influência do desequilíbrio de tensão sobre o conversor estático de 12 pulsos, especialmente na geração de harmônicos não característicos no lado AC, considerando-se o grau de intensidade e o tipo do mesmo. Neste sentido, os resultados obtidos desta análise também permitirão observar como a utilização da topologia T-ADZ minimiza o aparecimento dos harmônicos não característicos, comparando-se com a topologia convencional.

No capítulo VI, serão apresentadas as conclusões deste trabalho e as propostas para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES SOBRE QEE, HARMÔNICOS E DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

2.1 - Considerações Iniciais

No capítulo anterior, foi apresentada a importância do tema QEE, bem como a motivação e a proposta desta Dissertação. Pode-se verificar que o tema QEE é, atualmente, uma das principais áreas de pesquisa e desenvolvimento dentro da Engenharia Elétrica e alvo de grandes discussões pelos mais diversos setores ligados a energia elétrica.

Por outro lado, esta dissertação está fundamentada na implementação computacional de um novo equipamento cuja aplicação permitirá, conforme será demonstrado ao longo deste trabalho, minimizar os efeitos de desequilíbrios de tensão e harmônicos, dois problemas que compõem o universo da QEE.

Desta forma, este capítulo visa apresentar uma abordagem geral sobre os principais itens de avaliação da QEE, enfocando, especialmente, desequilíbrios de tensão e harmônicos.

2.2 - A Qualidade da Energia Elétrica

Quando um consumidor compra um produto, ele quer que este atenda às suas necessidades, de forma satisfatória. No caso de um consumidor de energia elétrica ocorre o mesmo, ou seja, ele quer que a energia por ele comprada seja capaz de garantir o bom funcionamento de seus equipamentos.

Dentro deste objetivo, um sistema elétrico ideal tem que disponibilizar energia elétrica com tensões de suprimento equilibradas, senoidais, com amplitude e frequência constantes, sem interrupções, independentemente do equipamento elétrico energizado [So97]. Desta forma, diz-se que a energia elétrica fornecida é de boa qualidade.

Do ponto de vista prático, define-se como energia de boa qualidade aquela que é capaz de garantir o funcionamento de equipamentos e processos de forma segura e confiável, a custos viáveis, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas [Ca97A].

Com o grande crescimento das cargas ao longo dos anos, o sistema elétrico tem-se tornado cada vez mais carregado e, conseqüentemente, excessivamente sensível a distúrbios. Isto indica uma degradação da qualidade da energia elétrica [Ra98] e, faz-se necessário uma avaliação coerente da QEE, como a que se segue.

2.2.1 - Itens de Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica

A QEE em um sistema elétrico pode ser afetada por vários distúrbios que podem ser agrupados de diversas formas. A tabela 2.1 apresenta um resumo destes distúrbios segundo a sua duração e intensidade.

Tabela 2.1 - Classificação Geral dos Distúrbios na QEE segundo IEEE 1159/95.

CATEGORIA	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude Típica da Tensão
1.0 Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5-ns	< 50 ns	
1.1.2 Microssegundos	1- μ s	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1-ms	> 1 ms	
1.2 – Oscilatórios			
1.2.1 Baixa frequência	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Média frequência	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu
1.2.3 Alta frequência	0,5-5MHz	5 μ s	0-4 pu
2.0 Variações de Curta Duração			
2.1 Instantânea			
2.1.1 Interrupção		0.5-30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2 Mergulho de Tensão		0.5-30 ciclos	0,1-0,9 pu
2.1.3 Salto de Tensão		0.5-30 ciclos	1,1-1,8 pu
2.2 Momentânea			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos-3 s	<0,1 pu
2.2.2 Mergulho de Tensão		30 ciclos-3 s	0,1-0,9 pu
2.2.3 Salto de Tensão		30 ciclos-3 s	1,1-1,4 pu
2.3 Temporária			
2.2.1 Interrupção		3 s-1 min	<0,1 pu
2.2.2 Mergulho de Tensão		3 s-1 min	0,1-0,9 pu
2.2.3 Salto de Tensão		3 s-1 min	1,1-1,2 pu
3.0 Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupção Sustentada		>1 min	0,0 pu
3.2 Subtensão		>1 min	0,8-0,9 pu
3.3 Sobretensão		>1 min	1,1-1,2 pu
4.0 Desequilíbrio de Tensão		regime permanente	0,5-2%
5.0 Distorção de Forma de Onda			
5.1 Harmônicos	0-100 th harmônico	regime permanente	0-20%
5.2 Recorte na Tensão		regime permanente	-----
5.3 Ruído		regime permanente	0-1%
5.4 Desvio de Nível CC		regime permanente	0-0,1%
5.5 Interharmônicos	0-6 kHz	regime permanente	0-2%
6.0 Flutuação de Tensão	<25 Hz	intermitente	0,1-7%
7.0 Variações de Frequência		< 10 s	-----

2.3 - Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais que têm frequências múltiplas da frequência fundamental do sistema (50 ou 60 Hz), e que se somam aos componentes fundamentais, de tensão ou de corrente, causando distorção na forma de onda.

2.3.1 - Principais Fontes de Harmônicos

Outrora, a natureza da maioria das cargas do sistema elétrico, conectadas à rede de distribuição, era tal que as correntes solicitadas eram também senoidais; cargas estas ditas Cargas Lineares [Gu98]. Este é o caso de todas as cargas resistivas, motores assíncronos em carga, condensadores, etc.

Contudo, atualmente, prolifera-se muito as cargas cujas correntes solicitadas são não senoidais, que recebem a denominação de Cargas Não Lineares [Gu98]. Esta deformação da corrente se deve, basicamente, ao aparecimento dos harmônicos, que são correntes senoidais cuja frequência é um múltiplo da frequência da fundamental.

Desta forma, as cargas não lineares se configuram como a fonte de harmônicos do sistema elétrico. Antes do aparecimento dos conversores estáticos, as correntes de magnetização dos transformadores, de máquinas elétricas e de reatores constituíam-se na essência das cargas não lineares presentes na rede elétrica, que não causavam, na maioria dos casos, problemas mais sérios. Contudo, atualmente, a grande fonte de harmônicos é os conversores estáticos. Estes equipamentos, originados a partir da grande evolução da eletrônica de potência, têm-se tornado cada vez mais imprescindíveis nas instalações industriais modernas, cujo objetivo é aliar a produtividade e qualidade com baixo custo. Estes conversores estão presentes em:

- variadores de velocidade para motores;
- retificadores;
- linhas de transmissão em corrente contínua;
- fontes chaveadas para eletrodomésticos;
- reatores para lâmpadas;

- etc.

Vale ressaltar que as cargas não lineares, principalmente os conversores estáticos, agem como fontes de correntes harmônicas que, dependendo da impedância da rede, podem gerar tensões harmônicas. Quando esta for composta somente do sinal fundamental, as correntes harmônicas não circulam da fonte em direção à carga, mas sim da carga em direção à fonte, contrariamente à corrente fundamental, e a sua amplitude somente depende da carga [Gu98]. De acordo com as impedâncias da rede, as correntes harmônicas podem se propagar em direção a outros clientes conectados ao mesmo circuito, sendo que, para estes, os harmônicos parecem vir da rede elétrica, e responsabiliza-se, freqüentemente, a concessionária. Isto é muitas vezes mal compreendido, até mesmo por especialistas em sistemas elétricos.

2.3.1.1 - Geração Harmônica pelos Sistemas Conversores CA/CC

Como mencionado anteriormente, os conversores se configuram como a grande fonte injetora de harmônicos na rede elétrica. Isto se deve ao fato de que eles são cargas não lineares e, como tais, injetam correntes não senoidais na rede. Estas podem ser em maior ou menor amplitude, dependendo das condições da rede de alimentação.

O tipo mais básico de conversor trifásico é o de 6 pulsos, que tem seus harmônicos característicos dado pela equação 2.1. Sua taxa de distorção harmônica total de corrente (ITHD), calculado conforme 2.2, é, teoricamente, igual a 30,7%.

$$h = 6p \pm 1 \quad (5^{\circ}, 7^{\circ}, 11^{\circ}, 13^{\circ}, \text{etc}) \quad (2.1)$$

onde, “h” é a ordem harmônica e “p” é um inteiro positivo.

$$ITHD = \frac{\sum I_h}{I_1} \quad (2.2)$$

onde, $\sum I_h$ é corrente harmônica eficaz total e I_1 é a corrente fundamental.

Uma vez que os retificadores CA/CC geram harmônicos que voltam para a rede de alimentação pelo apropriado defasamento dos grupos retificadores, pode-se cancelar

certos harmônicos, reduzindo-se o impacto dos mesmos na rede. Pelo fato da magnitude dos harmônicos ser inversamente proporcional a sua ordem harmônica, o cancelamento de harmônicos de baixa ordem reduz, significativamente, a distorção harmônica.

Logo, se dois conversores de 6 pulsos são combinados de forma a obter-se uma operação doze pulsos (defasagem de 30° entre as duas pontes de 6 pulsos), ou seja, com os quais tem-se a característica harmônica $12p \pm 1$, portanto, os harmônicos $5^\circ, 7^\circ, 17^\circ, 19^\circ, \dots$ são cancelados, reduzindo-se o ITHD para 14,9%, teoricamente.

O mesmo princípio pode ser aplicado a mais grupos de conversores, tais como 18 pulsos, 24 pulsos, 36 pulsos, 48 pulsos, etc., de forma que, teoricamente, para o conversor de 72 pulsos tenha-se um ITHD de 2,2% [St98].

Genericamente, de acordo com Yacamini e Oliveira [Ya80], tem-se:

Tabela 2.2 - Harmônicos característicos em sistemas conversores.

Número de Conversores	$n/6$
Defasagem Angular entre as Pontes	$360/n$
Ordem dos Harmônicos Esperados	$np \pm 1$

onde:

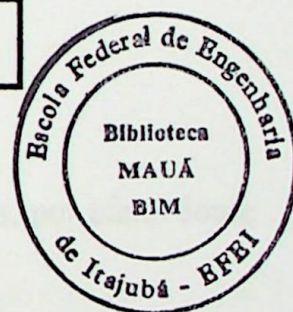
$n \rightarrow$ número de pulsos ($n = 12, 18, 24, \dots$);

$p \rightarrow$ um inteiro positivo qualquer.

Quando os harmônicos gerados por um sistema conversor não estão relacionados com a operação normal ou com a operação balanceada, diz-se que estes harmônicos são não característicos [En90], ou seja, estes harmônicos não são do tipo $np \pm 1$.

Os sistemas conversores geram harmônicos não característicos quando estes estão submetidos a condições não ideais de alimentação [Ng97], tais como:

- tensão de alimentação desequilibrada;



- impedância de comutação assimétrica;
- pulsos de disparo não equidistantes aplicados aos semicondutores.

Entretanto, a principal e a mais relevante causa da geração de harmônicos não característicos pelos sistemas conversores é o desequilíbrio da tensão de alimentação [Wa94, Ba92, Ra88, Ca98a].

2.3.2 - Principais Conseqüências dos Harmônicos

A circulação de correntes harmônicas na rede elétrica causa diversos tipos de problemas em equipamentos elétricos, com conseqüências de maior ou menor intensidade. Dentre estas conseqüências, segundo [Gu98], [En90] e [Al97], destacam-se:

- problemas em sistemas de controle dos conversores;
- mau funcionamento de equipamentos baseados em microprocessadores;
- erros de diagnóstico em aparelhos médicos;
- erros em medidores de kWh;
- atuação indevida de relés de proteção, fusíveis e disjuntores;
- interferência em sistemas de telefonia;
- perdas excessivas em máquinas rotativas;
- sobretensões harmônicas;
- aumento das perdas, em condutores e peças de equipamentos, por efeito Joule que ainda se somam às perdas por efeito pelicular;
- ressonâncias;
- etc.

Apesar dos efeitos dos harmônicos serem bem conhecidos, eles são de difícil quantificação, demonstrando a grande dificuldade com relação ao assunto em termos de normas, legislação, medição, fiscalização e punição.

2.3.3 - Soluções para o problema de Harmônicos

Não existem soluções triviais para o problema de harmônicos. Diversas atitudes podem ser tomadas, mas certamente evitar o aparecimento ou a produção dos harmônicos se torna bem mais coerente. Para tal fim, deve-se procurar, na medida do possível, adquirir e especificar equipamentos que respondam às normas mais recentes de tal forma que produzam o mínimo de harmônicos. Além disso, deve-se procurar balancear corretamente os sistemas de distribuição e transmissão e as cargas, de forma que não apareçam tensões desequilibradas no sistema.

Tendo em vista que a produção de harmônicos é inerente aos sistemas elétricos modernos, uma solução coerente é mitigar ou eliminar os harmônicos ou parte deles, principalmente os de ordem baixa, de forma a reduzir a gravidade do problema. Para isto não existem soluções triviais, podendo ser citadas, como exemplo, a instalação de filtros harmônicos, o aumento do número de pulsos dos conversores e, até mesmo, a correção das tensões desequilibradas que alimentam conversores, uma vez que, como mencionado anteriormente, os conversores quando submetidos a tensões desequilibradas geram mais harmônicos além dos característicos.

Na literatura especializada, observam-se algumas soluções não triviais para a mitigação do problema causado pelos harmônicos, como:

2.3.3.1 - Disparo Assimétrico dos Tiristores do Conversor:

Os conversores, quando alimentados por tensões desequilibradas, produzem uma tensão de saída retificada com harmônicos não característicos. A principal causa desta distorção, deve-se ao aparecimento do segundo harmônico no lado CC [Ng97].

Esta proposição, baseada no disparo dos tiristores de forma assimétrica, ou seja, no controle individual de cada tiristor, cancela o segundo harmônico do lado CC, promovendo uma melhor qualidade da tensão contínua na saída [Ng97].

Porém, este método de eliminação de harmônicos pode promover tanto o aumento quanto a diminuição do fator harmônico nas correntes de entrada do conversor. Logo, tal

solução visa somente atender à necessidade da carga do lado CC em ser alimentada por uma tensão de boa qualidade, não se importando com a rede de alimentação.

2.3.3.2 - Conversores “G”:

Com o objetivo de reduzir os harmônicos na corrente de entrada de conversores estáticos, bem como melhorar a tensão de saída retificada, deve-se incrementar o número de pulsos dos conversores através da conexão de vários conversores. Entretanto, para tal conexão faz-se necessário o uso dos transformadores de interface, que, por sua vez, possuem grande volume, projeto complexo, baixa confiabilidade e necessitam de manutenção freqüente.

Esta nova família de conversores, denominada G [O197], baseia-se numa peculiar conexão dos transformadores: a conexão em série dos enrolamentos primários do transformador. Tal ligação assegura a divisão da corrente entre os circuitos retificadores ligados em paralelo.

Desta forma, têm-se as seguintes vantagens:

- a corrente é forçada a se dividir igualmente entre os semicondutores;
- transformador principal pode ser dividido em unidades menores;
- defasamento angular pode ser obtido do lado primário onde a corrente é baixa e a tensão é alta;
- pode-se usar cabos ao invés de barras no primário;
- é fácil incrementar o número de pulsos;
- os semicondutores são mais bem utilizados, ou seja, mais condutores estão em uso ao mesmo tempo;
- pode-se usar retificador em ponte de Graëtz ou em estrela;
- melhora-se a confiabilidade.

Assim sendo, tem-se o fácil incremento do número de pulsos do conversor sem o uso de transformadores de interface. Ademais, com aumento do número de pulsos do conversor, como visto anteriormente, reduz-se o conteúdo harmônico da corrente de entrada e diminui-se o *ripple* da tensão de saída retificada. Logo, verifica-se que esta

solução, que promove o fácil incremento do número de pulsos do conversor, é tão boa para a rede quanto para a carga.

2.3.3.3 - Transformadores Tri-Pentafásicos Para Conversores Estáticos de Potência

Esta proposta, segundo Oliver [OI97], tem como peculiaridade à disposição adequada dos enrolamentos dos transformadores de forma a garantir a distribuição equilibrada da corrente entre os semicondutores de potência. Além disto, esta estrutura permite o aumento do número de fases dos conversores de potência, o que leva a uma redução da ondulação ou *ripple* da tensão contínua, bem como a redução do conteúdo harmônico da corrente de linha.

Este transformador tri-pentafásico difere de uma unidade trifásica clássica pelo fato de permitir obter um sistema pentafásico a partir de uma alimentação trifásica. Além disso, sob tensão de alimentação desequilibrada, este transformador comporta-se da mesma maneira que os transformadores trifásicos clássicos e seu uso torna-se justificável devido às vantagens associadas com a utilização de conversores de corrente a cinco ou sete (se for tri-heptafásico) fases.

2.4 - Desequilíbrio de Tensão

Diz-se que um sistema elétrico trifásico está desequilibrado quando as três fases deste sistema apresentam valores de tensões, em módulo, diferentes entre si e/ou defasagem angular entre elas não iguais a 120° elétricos [Ar00].

No caso em que os módulos das tensões são diferentes de 1,0 p.u., mantendo-se a defasagem entre elas de 120° , tem-se então o problema clássico de queda ou elevação de tensão, que se constitui num caso particular de desequilíbrio de tensão.

Segundo a literatura especializada, há diversas maneiras de se avaliar o desequilíbrio de tensão, destacando-se as seguintes:

(a) avaliação do desequilíbrio através da relação entre o módulo da tensão de seqüência negativa pelo módulo da tensão de seqüência positiva [We65], conforme o método das componentes simétricas. Assim:

$$VUF = \frac{|\bar{V}^-|}{|\bar{V}^+|} \times 100[\%] \quad (2.2)$$

onde:

VUF → fator de desequilíbrio de tensão, em por cento;

$|\bar{V}^-|$ → módulo da tensão de seqüência negativa;

$|\bar{V}^+|$ → módulo da tensão de seqüência positiva.

(b) avaliação segundo a norma NEMA – MG1 – 14.34 que define o fator de desequilíbrio de tensão como sendo a relação entre o máximo desvio das tensões com relação à tensão média dividido pela tensão média [We65], tendo por referência as tensões de linha. Assim:

$$VUF = \frac{\Delta V}{V_{AV}} \times 100[\%] \quad (2.3)$$

onde:

VUF → fator de desequilíbrio de tensão em por cento;

ΔV → máximo desvio das tensões com relação à média;

V_{AV} → tensão média.

(c) avaliação do desequilíbrio como recomenda o IEEE [Ie87]:

$$VUF = \frac{3 \times (V_{MAX} - V_{MIN})}{V_A + V_B + V_C} \times 100[\%] \quad (2.4)$$

Onde:

V_{UF} → fator de desequilíbrio de tensão, em porcento;

V_A V_B V_C → módulos das tensões de fase A, B e C, respectivamente;

V_{MAX} → maior das tensões em módulo;

V_{MIN} → menor das tensões em módulo.

Essas definições são as mais utilizadas. Porém, existe uma dinâmica muito grande e sempre novos métodos para se avaliar desequilíbrios de tensão estão aparecendo. Neste trabalho, adotar-se-á como padrão a primeiro método, que consiste em quantificar o desequilíbrio de tensão como sendo a relação entre o módulo da tensão de seqüência negativa pelo módulo da tensão de seqüência positiva.

2.4.1 - Principais Fontes de Desequilíbrios de Tensão

De uma forma geral, todas as instâncias de um sistema elétrico, geração, transmissão e distribuição, apresentam e sofrem problemas de desequilíbrio de tensão. De forma que, como principais fontes de desequilíbrios de tensão, segundo [Ng97], destacam-se:

- transformadores com enrolamentos assimétricos;
- impedância assimétrica de linhas de transmissão;
- transformadores conectados em delta aberto;
- cargas desequilibradas em linhas de transmissão;
- combinação de cargas trifásicas e monofásicas num mesmo circuito;
- cargas trifásicas desequilibradas, como, por exemplo, fornos a arco, máquinas de solda;
- cargas monofásicas desigualmente distribuídas ao longo de um mesmo sistema de distribuição;
- linhas de transmissão não transposta;
- etc.

2.4.2 - Conseqüências dos Desequilíbrios de Tensão

Os desequilíbrios de tensão afetam mais gravemente o sistema de distribuição se comparado com os demais níveis do sistema elétrico. Isto pode ser evidenciado pelo fato das próprias concessionárias trabalharem levando em consideração um desequilíbrio de tensão admissível de 2 % no sistema de distribuição [Al97], o que esta coerente com a tabela 2.3 a seguir.

Tabela 2.3 - Limites permissíveis para Desequilíbrio de Tensão.

Norma	Limite
NEMA MG1 14-34	2%
ANSI C.84.1-1989	3%
IEEE Orange Book – 446/1995	2,5%
GTCP/CTST/GCPS – ELETROBRÁS	2% e 1,5%

Os desequilíbrios de tensão afetam vários tipos de cargas, principalmente os motores de indução. Estes são uma das mais importantes cargas do sistema elétrico e, são responsáveis por cerca de 60% do consumo de energia em sistemas industriais. Um desequilíbrio de 2,3% na tensão de alimentação de um motor de indução é responsável por um desequilíbrio de corrente de aproximadamente 17% e uma elevação de temperatura de 30° C [Kn85] (sabe-se que a cada 10° C de elevação da temperatura de um motor sua vida útil diminui pela metade). Neste sentido, um recente estudo produzido por [Le98] investigou-se os efeitos de diferentes desequilíbrios de tensão, com o mesmo VUF, no desempenho de um motor de indução. Com desequilíbrios da ordem de 4 a 6%, chegou-se às seguintes conclusões:

- é muito importante considerar o valor da tensão de seqüência positiva que, quando muito elevado, provoca um baixo fator de potência e um alto rendimento;
- as piores situações em relação a sobrelevação de temperatura ocorrem para desequilíbrios trifásicos considerando a diminuição das tensões;

- os desequilíbrios causam perdas excessivas, aumentando-se o consumo de energia elétrica;
- há influência na estabilidade do sistema;
- os torques de rotor bloqueado e de frenagem diminuem, o que, em casos mais severos, podem não ser adequados à aplicação a que se destinam;
- escorregamento aumenta ligeiramente;
- desequilíbrio da corrente de rotor bloqueado será da mesma ordem do desequilíbrio das tensões;
- há a aparição de ruídos e vibrações, sendo mais severa em motores de 2 pólos.

Para as cargas não lineares, especialmente do tipo sistemas conversores CA-CC, os desequilíbrios de tensão provocam fatores de potência ruins e que variam com a carga, além dos problemas já mencionados anteriormente no item 2.3.2.

2.4.3 - Soluções para o Problema de Desequilíbrios de Tensão

As soluções para os desequilíbrios de tensão, assim como para os harmônicos, podem ser de dois tipos: primeiro é evitar ou minimizar o aparecimento no sistema de tensões desequilibradas, o que pode ser feito fazendo-se um correto balanceamento das cargas tanto ao longo do sistema de distribuição quanto de transmissão, transpondo-se corretamente as linhas de transmissão; segundo, sendo evidente que não se pode eliminá-los, deve-se tomar medidas corretivas para eliminá-los, dentre as quais destacam-se:

2.4.3.1 - Transformador regulador para controle do módulo da tensão:

Esta configuração é dada pela figura 2.1 e considerando, por exemplo, a fase A do sistema, a tensão resultante no tape T_a está em fase com V_a . Logo, o transformador em série com a fase A deverá, neste caso, adicionar uma tensão ΔV_a a V_a , em fase com V_a , de acordo com o diagrama fasorial. O valor deste acréscimo depende, logicamente, da posição do tape. Desta maneira, tem-se o controle do módulo da tensão [E176].

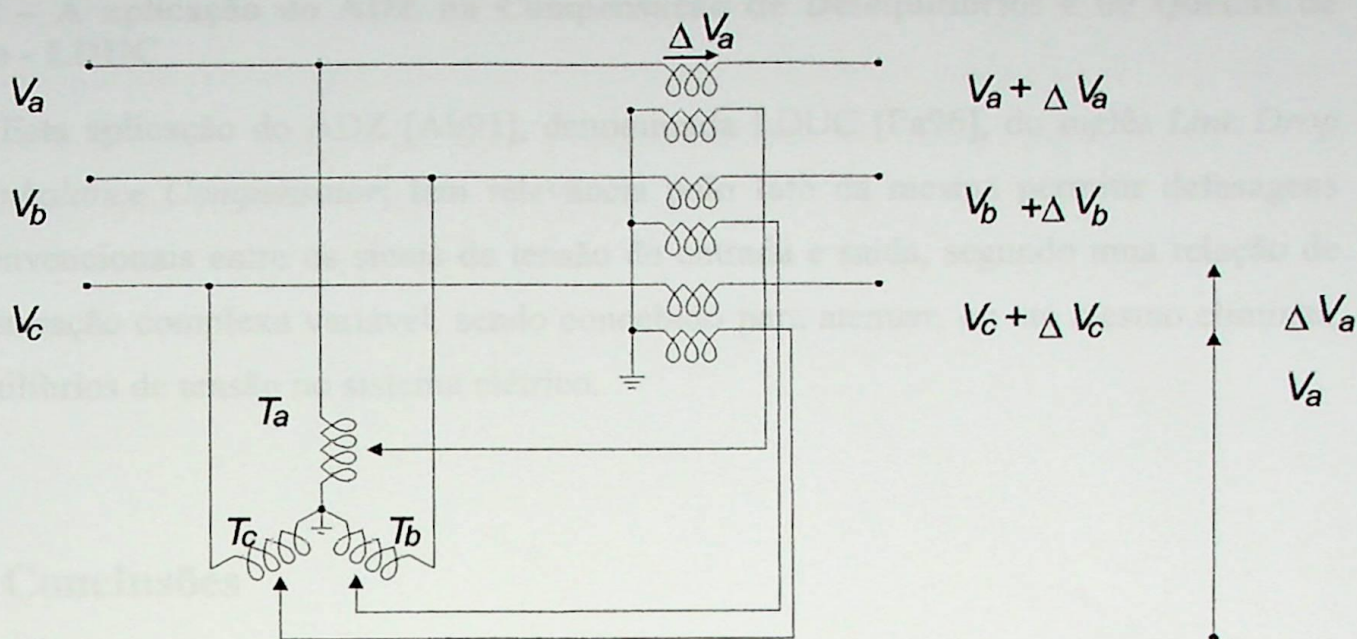


Figura 2.1 - Controle do módulo de tensão.

2.4.3.2 - DVR -Dynamic Voltage Restorer

É um dispositivo que restaura dinamicamente a tensão, atuando de acordo com limites previamente fixados. O DVR [Li98, Wh98] é um conversor eletrônico com alta velocidade de chaveamento, conectado em série em um sistema de distribuição que alimenta cargas sensíveis. De sua concepção, o DVR é um equipamento capaz de mitigar depressões e elevações de tensão por meio da injeção de uma tensão de compensação no sistema de distribuição, em tempo real. Devido a seu elevado custo não é largamente utilizado nos dias de hoje, sendo somente encontrado em aplicações em sistemas de baixa e média tensão e potência.

2.4.3.3 - Condicionadores Universais de Energia

Constituem-se em uma família de equipamentos que podem corrigir problemas de QEE, dentre os quais: desequilíbrios de tensão, harmônicos, cintilação, depressão de tensão e elevação de tensão [Be98]. Também são capazes de atuar na compensação de reativos e no balanceamento de cargas. Contudo, essa correção não é simultânea, ou seja, somente é especificado para a correção de um único problema. São dispositivos que podem ser conectados em série ou em derivação no sistema de distribuição e, cuja aplicação tem crescido substancialmente nos últimos anos.

2.4.3.4 – A aplicação do ADZ na Compensação de Desequilíbrios e de Quedas de Tensão - LDUC

Esta aplicação do ADZ [Ab91], denominada LDUC [Pa96], do inglês *Line Drop and Unbalance Compensator*, tem relevância pelo fato da mesma permitir defasagens não convencionais entre os sinais de tensão de entrada e saída, segundo uma relação de transformação complexa variável, sendo concebido para atenuar, ou até mesmo eliminar, desequilíbrios de tensão no sistema elétrico.

2.5 - Conclusões

Este capítulo teve como objetivo apresentar, de forma introdutória, os principais itens de avaliação da QEE, dando ênfase especial a harmônicos e desequilíbrios de tensão, dois de seus fenômenos relacionados com esta dissertação.

Sobre os harmônicos, sabe-se que as suas principais fontes geradoras são as cargas não lineares, principalmente representadas pelos sistemas conversores CA-CC, baseados nos dispositivos semicondutores. Nestes sistemas, vale lembrar que, quanto maior o número de pulsos, menor será a taxa de distorção harmônica na corrente de linha. Além disso, quando estes sistemas estão submetidos a uma tensão de alimentação desequilibrada, geram outros harmônicos além dos tradicionais ($np \pm 1$), os denominados não característicos e que acabam por agravar ainda mais o problema de injeção de harmônicos no sistema elétrico.

Por sua vez, os desequilíbrios de tensão afetam, de forma mais grave, o sistema de distribuição, sendo praticamente impossível eliminá-los, de forma que as distribuidoras têm convivido, de forma consciente, com este fenômeno. Porém, os desequilíbrios de tensão afetam em muito tanto as cargas lineares quanto as cargas não lineares. Assim sendo, torna-se importante qualquer solução que venha mitigar ou eliminar o problema.

Reconhecida a relevância do assunto bem como definidos os conceitos envolvidos, nos capítulos subseqüentes será apresentada e validada uma nova proposição para a

mitigação de desequilíbrios de tensão. Esta solução traz como principal benefício, quando aplicada a cargas não lineares do tipo conversores estáticos, a mitigação de harmônicos não característicos e, quando aplicada a cargas lineares, do tipo girantes, a garantia de que sua vida útil não será afetada.

O TRANSFORMADOR DEFASADOR EM ZIGZAGUE - T-ADZ

3.1 - Considerações Iniciais

Na busca de soluções para os problemas aqui nome apresentados, neste capítulo apresenta-se o Transformador Defasador Zigzague, T-ADZ, que foi desenvolvido através da associação das técnicas utilizadas no Autotransformador Defasador Zigzague (ADZ) [AB91], da colocação em série de enrolamentos do primário de um transformador [GUS] e do desenvolvimento matemático da aplicação LDUC [Paf04].

O ADZ é um autotransformador que permite o ajuste de defasagem não convencional entre a tensão de entrada e de saída, de maneira independente para cada fase. A sua aplicação na correção de desequilíbrios de tensão foi denominada de LDUC.

Esta nova topologia, o T-ADZ, tem como principal característica a correção de desequilíbrios de tensão de rede de alimentação e pode ser aplicado à alimentação tanto de cargas lineares quanto de cargas não lineares. No caso de cargas não lineares, esta nova topologia pode apresentar, diretamente, um conteúdo de THD muito menor do que outros dispositivos.

Assim sendo, torna-se necessária a elaboração de estudos para esta nova topologia de transformador, bem como sobre suas bases que são o ADZ e o LDUC. O T-ADZ na correção de desequilíbrios de tensão (LDUC) e a colocação em série de enrolamentos do primário de transformadores.



CAPÍTULO III

O TRANSFORMADOR DEFASADOR EM ZIGUEZAGUE - T-ADZ

3.1 - Considerações Iniciais

Na busca de soluções para os problemas anteriormente apresentados, neste capítulo apresenta-se o Transformador Defasador Ziguezague, T-ADZ, que foi obtido através da associação das técnicas utilizadas no Autotransformador Defasador Ziguezague (ADZ) [Ab91], da colocação em série de enrolamentos do primário de um transformador [Gu95] e do desenvolvimento matemático da aplicação LDUC [Pa96].

O ADZ é um autotransformador que permite o ajuste de defasagens não convencionais entre a tensão de entrada e de saída, de maneira independente para cada fase. A sua aplicação na correção de desequilíbrios de tensão foi denominada de LDUC.

Esta nova topologia, o T-ADZ, tem como principal característica a correção de desequilíbrios de tensão da rede de alimentação e pode ser aplicado à alimentação tanto de cargas lineares quanto de cargas não lineares. No caso de cargas não lineares, esta nova topologia pode alimentar, diretamente, um conversor de 12 pulsos, sem o auxílio de outros transformadores.

Assim sendo, torna-se imprescindível esclarecimento sobre esta nova topologia de transformadores, bem como sobre suas bases que são o ADZ, a aplicação do ADZ na correção de desequilíbrios de tensão (LDUC) e a colocação de enrolamentos em série no primário de transformadores.

3.2 - O Autotransformador Defasador - ADZ

O ADZ é um autotransformador que possui uma bobina principal e duas bobinas auxiliares, por fase. A ligação do ADZ apresenta as bobinas principais conectadas em estrela e a ligação entre as bobinas principais e auxiliares em ziguezague [Ab91], conforme a figura 3.1 a seguir.

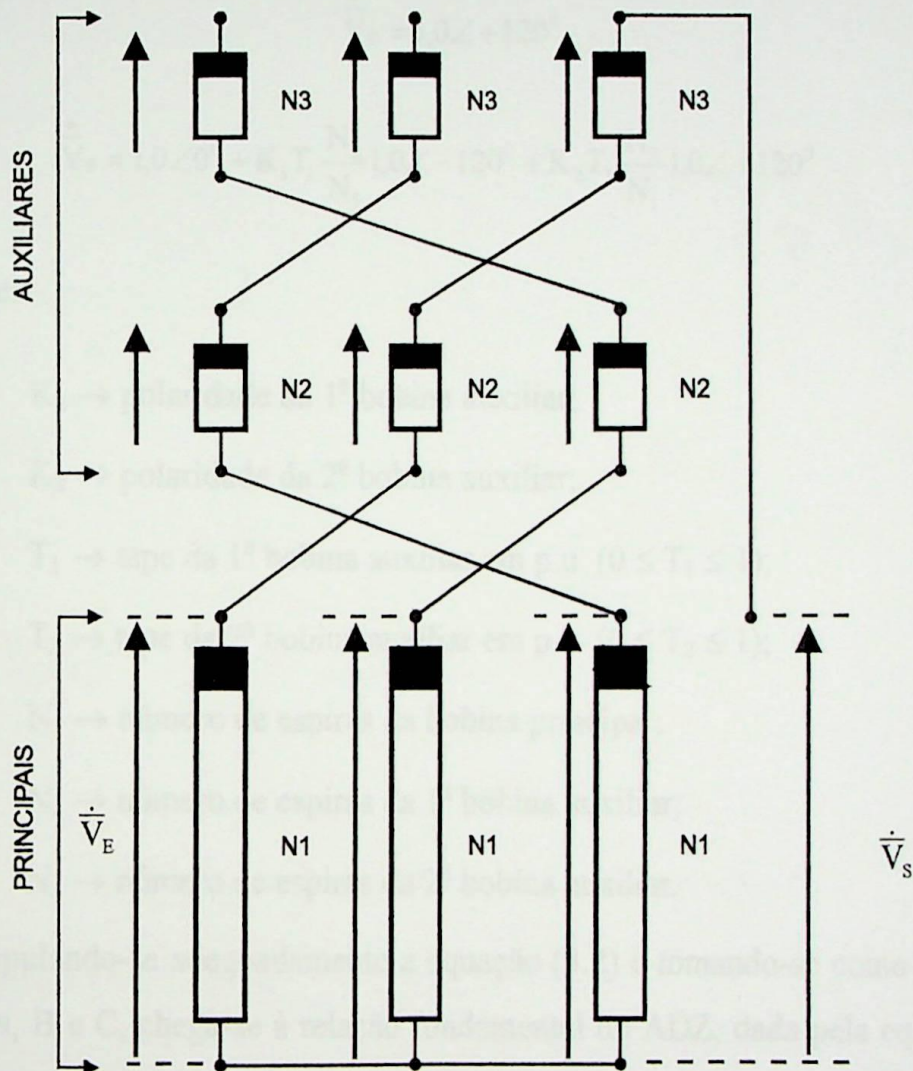


Figura 3.1 - Conexão do ADZ.

Desta forma, conforme a figura anterior, o valor obtido para o fasor de tensão de saída depende da polaridade das bobinas auxiliares e da relação entre o número de espiras das mesmas com a principal, característica esta puramente construtiva. Fica evidente que esta proporcionalidade depende da aplicação para a qual se quer destinar o equipamento.

Assim sendo, considere-se uma alimentação trifásica de tensões balanceadas, conforme a equação (3.1), aplicada às bobinas principais do ADZ. O fasor de tensão de saída, tendo por referência a fase A e conforme a figura 3.1, será dado pela equação (3.2).

$$\begin{aligned}\dot{V}_A &= 1,0 \angle 0^\circ \\ \dot{V}_B &= 1,0 \angle -120^\circ \\ \dot{V}_C &= 1,0 \angle +120^\circ\end{aligned}\quad (3.1)$$

$$\dot{V}_s = 1,0 \angle 0^\circ + K_1 T_1 \frac{N_2}{N_1} 1,0 \angle -120^\circ + K_2 T_2 \frac{N_3}{N_1} 1,0 \angle +120^\circ \quad (3.2)$$

Onde:

$K_1 \rightarrow$ polaridade da 1ª bobina auxiliar;

$K_2 \rightarrow$ polaridade da 2ª bobina auxiliar;

$T_1 \rightarrow$ tape da 1ª bobina auxiliar em p.u. ($0 \leq T_1 \leq 1$);

$T_2 \rightarrow$ tape da 2ª bobina auxiliar em p.u. ($0 \leq T_2 \leq 1$);

$N_1 \rightarrow$ número de espiras da bobina principal;

$N_2 \rightarrow$ número de espiras da 1ª bobina auxiliar;

$N_3 \rightarrow$ número de espiras da 2ª bobina auxiliar.

Manipulando-se adequadamente a equação (3.2) e tomando-se como referência as demais fases, B e C, chega-se à relação fundamental do ADZ, dada pela equação (3.3) a seguir.

$$\dot{V}_s = 1,0 - 0,5 \left(\frac{K_1 T_1 N_2 + K_2 T_2 N_3}{N_1} \right) - j0,866 \left(\frac{K_1 T_1 N_2 - K_2 T_2 N_3}{N_1} \right) \quad (3.3)$$

Os valores possíveis para as polaridades das bobinas auxiliares, K_i 's, são:

+1 \rightarrow polaridade positiva;

-1 \rightarrow polaridade negativa;

0 → ausência de bobina.

Considerando-se a equação (3.3) e as polaridades como definidas anteriormente, pode-se representar todos os pontos do fasor tensão de saída em relação ao de entrada, para o caso em que se considera $N_2 = N_3$, pela figura 3.2 a seguir. De forma que, de acordo com a polaridade das bobinas auxiliares, pode-se ter o fasor de tensão de saída sobre um dos pontos de 1 a 9.

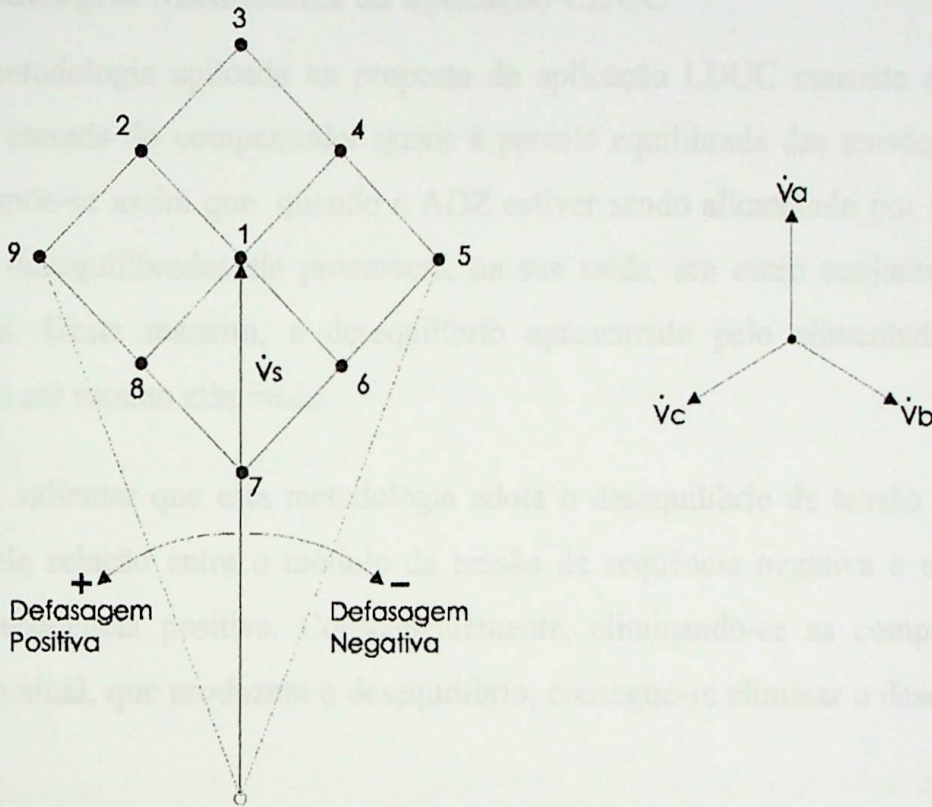


Figura 3.2 - Tensão de saída do ADZ considerando-se $N_2 = N_3$.

3.3 – A aplicação LDUC

A aplicação do ADZ na compensação de desequilíbrios e de quedas de tensão, denominada LDUC, foi desenvolvida por Paulillo em [Pa96]. Neste trabalho, foi demonstrado que a aplicação LDUC é capaz de controlar do fasor de tensão de saída em módulo, ângulo de fase ou ambos.

A relevância desta aplicação reside no fato de permitir defasagens não convencionais entre os sinais de tensão de entrada e saída, segundo uma relação de transformação complexa variável e independente para cada uma das fases. Este controle é obtido através da conveniente seleção dos tapes e das polaridades das bobinas auxiliares

que compõem o ADZ de forma que, a partir de um determinado conjunto conhecido de tensões na entrada do equipamento, se obtenha, na saída, tensões com variações no módulo, no ângulo ou em ambos.

Desta maneira, a aplicação LDUC foi concebido para mitigar, ou até mesmo eliminar, desequilíbrios ou quedas de tensão em sistemas elétricos.

3.3.1 - Modelagem Matemática da aplicação LDUC

A metodologia aplicada na proposta da aplicação LDUC consiste em tornar as tensões na entrada do compensador iguais à parcela equilibrada das tensões de fase do sistema. Supõe-se assim que, quando o ADZ estiver sendo alimentado por um conjunto de tensões desequilibradas ele promoverá, na sua saída, um outro conjunto de tensões equilibradas. Desta maneira, o desequilíbrio apresentado pelo alimentador pode ser atenuado ou até mesmo eliminado.

Vale salientar que esta metodologia adota o desequilíbrio de tensão como sendo definido pela relação entre o módulo da tensão de seqüência negativa e o módulo da tensão de seqüência positiva. Conseqüentemente, eliminando-se as componentes não positivas do sinal, que produzem o desequilíbrio, consegue-se eliminar o desequilíbrio de tensão.

Desta forma, seja o seguinte conjunto de tensões trifásicas desequilibradas aplicado às bobinas principais do ADZ:

$$\dot{V}_A = A \angle \alpha^\circ = A \cdot (\cos \alpha + j \operatorname{sen} \alpha) \quad [\text{V}] \quad (3.4)$$

$$\dot{V}_B = B \angle \beta^\circ = B \cdot (\cos \beta + j \operatorname{sen} \beta) \quad [\text{V}] \quad (3.5)$$

$$\dot{V}_C = C \angle \gamma^\circ = C \cdot (\cos \gamma + j \operatorname{sen} \gamma) \quad [\text{V}] \quad (3.6)$$

Através da utilização do Método das Componentes Simétricas, obtém-se as tensões de seqüência positiva, negativa e zero, assim:

$$VUF = \frac{\left| \dot{V}^- \right|}{\left| \dot{V}^+ \right|} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.7)$$

onde: VUF - fator de desequilíbrio de tensão;

$\left| \dot{V}^- \right|$ - módulo da tensão de seqüência negativa;

$\left| \dot{V}^+ \right|$ - módulo da tensão de seqüência positiva.

Como a componente de seqüência positiva se constitui de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° e tem, principalmente, a mesma seqüência de fases dos fasores originais, toma-se esta como referência para as tensões de saída do compensador. De forma que, para a fase A, tenha-se:

$$\dot{V}_A = V^+ \angle \theta^\circ \quad [\text{V}] \quad (3.8)$$

onde: θ é o ângulo da tensão de seqüência positiva.

Atendendo a condição imposta anteriormente, as tensões de saída desejadas do compensador serão dadas por:

$$\dot{V}_x = V^+ \angle \theta^\circ \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_y = V^+ \angle \theta - 120^\circ \quad (3.10)$$

$$\dot{V}_z = V^+ \angle \theta + 120^\circ \quad (3.11)$$

com x, y e z referentes as fases a, b e c, respectivamente.

Uma vez obtido o perfil das tensões de saída, comparando-se os grupos de equações (3.4) a (3.6) e (3.9) a (3.11), verifica-se que as tensões, inicialmente

desequilibradas nos terminais de entrada do compensador, mostram-se totalmente equilibradas na saída do mesmo. Esta condição está representada na figura 3.3:

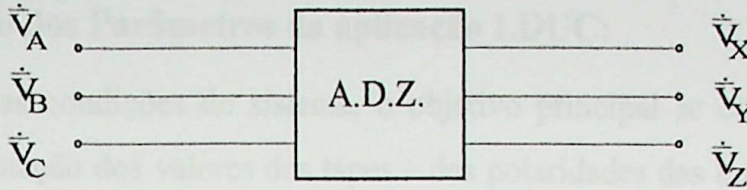


Figura 3.3 - Sistema de balanceamento da aplicação LDUC.

Baseando-se em (3.3), as tensões de saída, \dot{V}_X , \dot{V}_Y e \dot{V}_Z na saída do ADZ, são obtidas segundo o seguinte equacionamento:

$$\dot{V}_X = V \angle \theta^\circ = \dot{V}_A + K_{1B} T_{1B} \frac{N_2}{N_1} \dot{V}_B + K_{2C} T_{2C} \frac{N_3}{N_1} \dot{V}_C \quad (3.12)$$

$$\dot{V}_Y = V \angle \theta - 120^\circ = K_{2A} T_{2A} \frac{N_3}{N_1} \dot{V}_A + \dot{V}_B + K_{1C} T_{1C} \frac{N_2}{N_1} \dot{V}_C \quad (3.13)$$

$$\dot{V}_Z = V \angle \theta + 120^\circ = K_{1A} T_{1A} \frac{N_2}{N_1} \dot{V}_A + K_{2B} T_{2B} \frac{N_3}{N_1} \dot{V}_B + \dot{V}_C \quad (3.14)$$

cujos parâmetros são:

- K_{1B} , K_{2B} , K_{1A} , K_{2A} , K_{1C} e K_{2C} : polaridades da primeira e segunda bobinas auxiliares, respectivamente, para as fases B , A e C, respectivamente;
- T_{1B} , T_{2B} , T_{1A} , T_{2A} , T_{1C} e T_{2C} : valor dos tapes da primeira e segunda bobinas auxiliares, respectivamente, para as fases B , A e C, respectivamente;
- N_1 , N_2 e N_3 : número de espiras das bobinas principal, primeira auxiliar e segunda auxiliar, respectivamente.

Deste modo, para que o sistema fique equilibrado, as equações do compensador devem ser satisfeitas. Logo, o problema fica resumido à determinação dos parâmetros das equações anteriores. Além disso, verifica-se, através da escolha conveniente das

polaridades e dos tapes, que as tensões de saída, obtidas pelas equações (3.12) a (3.14), são tratadas independentemente por fase.

3.3.2 - Obtenção dos Parâmetros da aplicação LDUC:

Definidas as condições do sistema, o objetivo principal se constitui, a partir de agora, na determinação dos valores dos tapes e das polaridades das bobinas auxiliares. A fim de facilitar a solução, definem-se os seguintes fatores:

$$\begin{aligned}
 t_{1B} &= K_{1B} T_{1B} \\
 t_{2C} &= K_{2C} T_{2C} \\
 t_{2A} &= K_{2A} T_{2A} \\
 t_{1C} &= K_{1C} T_{1C} \\
 t_{1A} &= K_{1A} T_{1A} \\
 t_{2B} &= K_{2B} T_{2B}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Substituindo-se as equações (3.15) e as de (3.9) a (3.11) nas de (3.12) a (3.14), vem que a solução do sistema resultante constitui-se nos valores exatos dos diversos fatores t_{ij} , definidos de acordo com (3.15). Estes são dados por:

$$t_{1B} = \frac{\frac{N_3}{N_1} \cdot C \cdot [(V \cos \theta - A \cos \alpha) \operatorname{sen} \gamma - (V \operatorname{sen} \theta - A \operatorname{sen} \alpha) \cos \gamma]}{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot B \cdot C \cdot [\cos \beta \cdot \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \beta \cdot \cos \gamma]} \tag{3.16}$$

$$t_{2B} = \frac{\frac{N_2}{N_1} \cdot A \cdot [(V \operatorname{sen}(\theta + 120) - C \operatorname{sen} \gamma) \cos \alpha - (V \cos(\theta + 120) - C \cos \gamma) \operatorname{sen} \alpha]}{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot A \cdot B \cdot [\cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \beta - \operatorname{sen} \alpha \cdot \cos \beta]} \tag{3.17}$$

$$t_{1A} = \frac{\frac{N_3}{N_1} \cdot B \cdot [(V \cos(\theta + 120) - C \cos \gamma) \operatorname{sen} \beta - (V \operatorname{sen}(\theta + 120) - C \operatorname{sen} \gamma) \cos \beta]}{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot A \cdot B \cdot [\cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \beta - \operatorname{sen} \alpha \cdot \cos \beta]} \tag{3.18}$$

$$t_{2A} = \frac{\frac{N_2}{N_1} \cdot C \cdot [(V \operatorname{sen}(\theta - 120) - B \operatorname{sen} \beta) \cos \gamma - (V \cos(\theta - 120) - B \cos \beta) \operatorname{sen} \gamma]}{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot A \cdot C \cdot [\cos \gamma \cdot \operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \gamma \cdot \cos \alpha]} \tag{3.19}$$

$$t_{1C} = \frac{\frac{N_3}{N_1} \cdot A \cdot [(V \cos(\theta - 120) - B \cos \beta) \sin \alpha - (V \sin(\theta - 120) - B \sin \beta) \cos \alpha]}{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot A \cdot C \cdot [\cos \gamma \cdot \sin \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \alpha]} \quad (3.20)$$

$$t_{2C} = \frac{\frac{N_2}{N_1} \cdot B \cdot [(V \sin \theta - A \sin \alpha) \cos \beta - (V \cos \theta - A \cos \alpha) \sin \beta]}{\frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot B \cdot C \cdot [\cos \beta \cdot \sin \gamma - \sin \beta \cdot \cos \gamma]} \quad (3.21)$$

Ao se calcular cada um destes fatores, são obtidas simultaneamente duas informações: a primeira diz respeito à polaridade e a segunda informa o valor do tape, ambas a serem ativadas na bobina auxiliar correspondente. As polaridades das bobinas auxiliares, K_{1B} , K_{2B} , K_{1A} , K_{2A} , K_{1C} e K_{2C} , são determinadas através do sinal de t_{1B} , t_{2B} , t_{1A} , t_{2A} , t_{1C} e t_{2C} , respectivamente, e podem assumir valores de acordo com a equação (3.22). Os valores absolutos de t_{1B} , t_{2B} , t_{1A} , t_{2A} , t_{1C} e t_{2C} representam, de modo análogo, os valores dos tapes T_{1B} , T_{2B} , T_{1A} , T_{2A} , T_{1C} e T_{2C} , respectivamente. Porém, estes valores, que são exatos, não coincidirão, em geral, com os valores dos tapes reais disponíveis no transformador. Por exemplo, no caso do protótipo do ADZ, cada bobina auxiliar dispõe de dez tapes, com uma variação de 0,1 entre cada tape, ou seja, valores discretos.

$$K_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{para } t_{ij} > 0 \\ -1, & \text{para } t_{ij} < 0 \\ 0, & \text{para } t_{ij} = 0 \text{ (ausência de bobina)} \end{cases} \quad (3.22)$$

Como a meta principal é otimizar a correção do desequilíbrio através da combinação discreta dos tapes, um dos fatores que deve ser levado em consideração é a obtenção da melhor configuração destes. Esta situação pode ser melhor compreendida partir da figura 3.4.

Nesta figura tem-se a visão detalhada do fasor tensão de saída de uma das fases do sistema. Por exemplo, para fase A, onde os valores exigidos são os valores dos tapes t_{1B} e t_{2C} , são obtidos dois valores discretos a partir do valor exato de cada tape. Estes são dados por:

$$|t_{ij}| \Rightarrow \begin{cases} T_{ij}(1) = |t_{ij}| - 0,05 \\ T_{ij}(2) = |t_{ij}| + 0,05 \end{cases} \quad (3.23)$$

Isto representa que, conforme caracterizado na figura 3.4, para cada fase são possíveis quatro valores próximos ao valor exato. Ou seja, considerando todo o lugar geométrico dos fasores tensão de saída, delimita-se uma sub-região definida pelos valores de K_{ij} , $T_{ij}(1)$ e $T_{ij}(2)$. No exemplo mostrado na figura 3.4, para a fase A (ponto G), esta sub-região é delimitada por K_{1B} , K_{2C} , $T_{1B}(1)$, $T_{1B}(2)$, $T_{2C}(1)$ e $T_{2C}(2)$. A combinação destes tapes e polaridades resulta em quatro pontos de controle, ou seja em quatro valores possíveis para a tensão de saída. Graficamente, esta situação é apresentada a seguir:

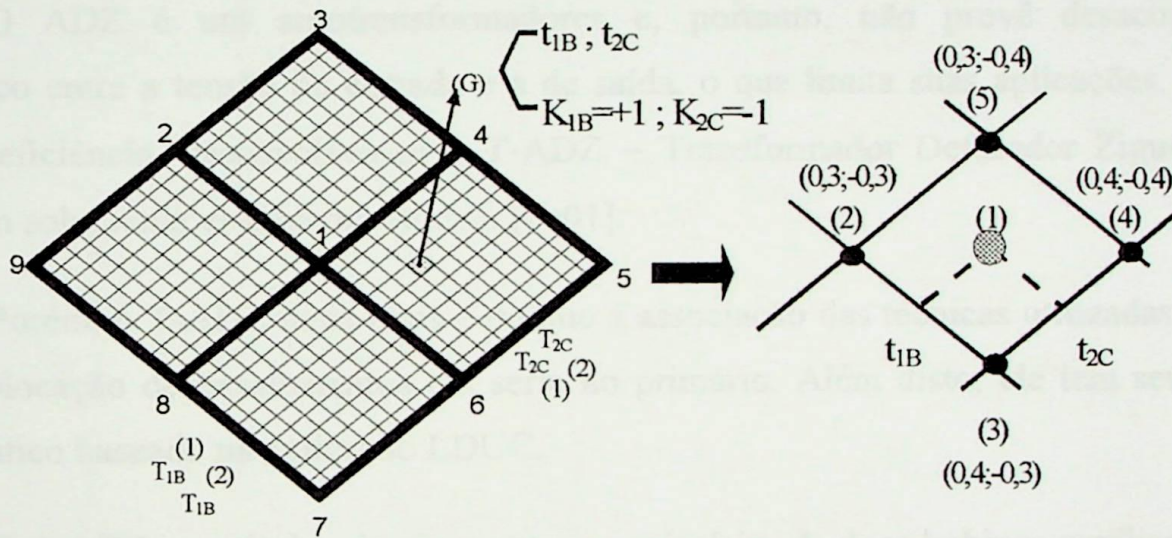


Figura 3.4 - Zoom no lugar geométrico da aplicação LDUC.

- (1) $[(K_{1B}, t_{1B}), (K_{2C}, t_{2C})]$ - valor exato;
- (2) $[(K_{1B}, T_{1B}(1)), (K_{2C}, T_{2C}(1))]$ - valor aproximado;
- (3) $[(K_{1B}, T_{1B}(2)), (K_{2C}, T_{2C}(1))]$ - valor aproximado;
- (4) $[(K_{1B}, T_{1B}(2)), (K_{2C}, T_{2C}(2))]$ - valor aproximado;
- (5) $[(K_{1B}, T_{1B}(1)), (K_{2C}, T_{2C}(2))]$ - valor aproximado;

Do exposto anteriormente, verifica-se que para cada uma das tensões de saída desejadas, tem-se, na verdade, quatro tensões de saída reais possíveis. Considerando-se que o sistema é trifásico, a combinação de todas as possibilidades leva a um conjunto

com sessenta e quatro (64) opções para se comutar o ADZ. Em cada uma delas, tem-se um sistema trifásico de tensões diferente na saída do ADZ e, conseqüentemente, um valor diferente de desequilíbrio de tensão associado. A opção selecionada será aquele que, dentre as 64 possibilidades, gerar o menor fator de desequilíbrio de tensão.

Com a determinação dos tapes e das polaridades, da maneira descrita anteriormente, consegue-se avaliar qual a correção imposta ao desequilíbrio apresentado pelas tensões na entrada do compensador e, se a mesma é total ou parcial.

3.4 - O T-ADZ

O ADZ é um autotransformadores e, portanto, não provê desacoplamento galvânico entre a tensão de entrada e a de saída, o que limita suas aplicações. Em face desta deficiência, desenvolveu-se o T-ADZ – Transformador Defasador Ziguezague – que vem solucionar este inconveniente [Pa01].

Porém, o T-ADZ nada mais é do que a associação das técnicas utilizadas no ADZ e na colocação de enrolamentos em série no primário. Além disto, ele tem seu modelo matemático baseado na aplicação LDUC.

O T-ADZ constitui-se basicamente, no primário, de duas bobinas auxiliares e uma principal e, no secundário de, pelo menos, uma bobina de saída. A conexão das bobinas auxiliares é de tal forma que se tenha no primário a mesma conexão do ADZ.

Dentre as aplicações possíveis desta nova topologia de transformador, tem-se a sua aplicação na alimentação de sistemas conversores, utilizando os arranjos convencionais de acordo com o número de pulsos do conversor a ser alimentado. No caso de conversores de 12 pulsos, deve-se construir o T-ADZ com duas bobinas secundárias por fase, de forma que se tenha uma defasagem de 30° entre as pontes conversoras, obtidas, através da ligação delta-estrela. Contudo, ele também pode ser aplicado na alimentação de cargas lineares, como motores de corrente alternada, bastando para isto construir o T-ADZ com apenas uma bobina secundária por fase.

É muito comum a utilização das bobinas de transformadores conectadas em série no secundário, porém, pelo fato do transformador ser uma “máquina” reversível, é possível fazer esta conexão também no primário, sem nenhum tipo de ressalva, como a feita por Guimarães em [Gu95].

Após estas considerações, o transformador defasador ziguezague – T-ADZ – para alimentar um conversor de 12 pulsos é apresentado na figura 3.5 a seguir.

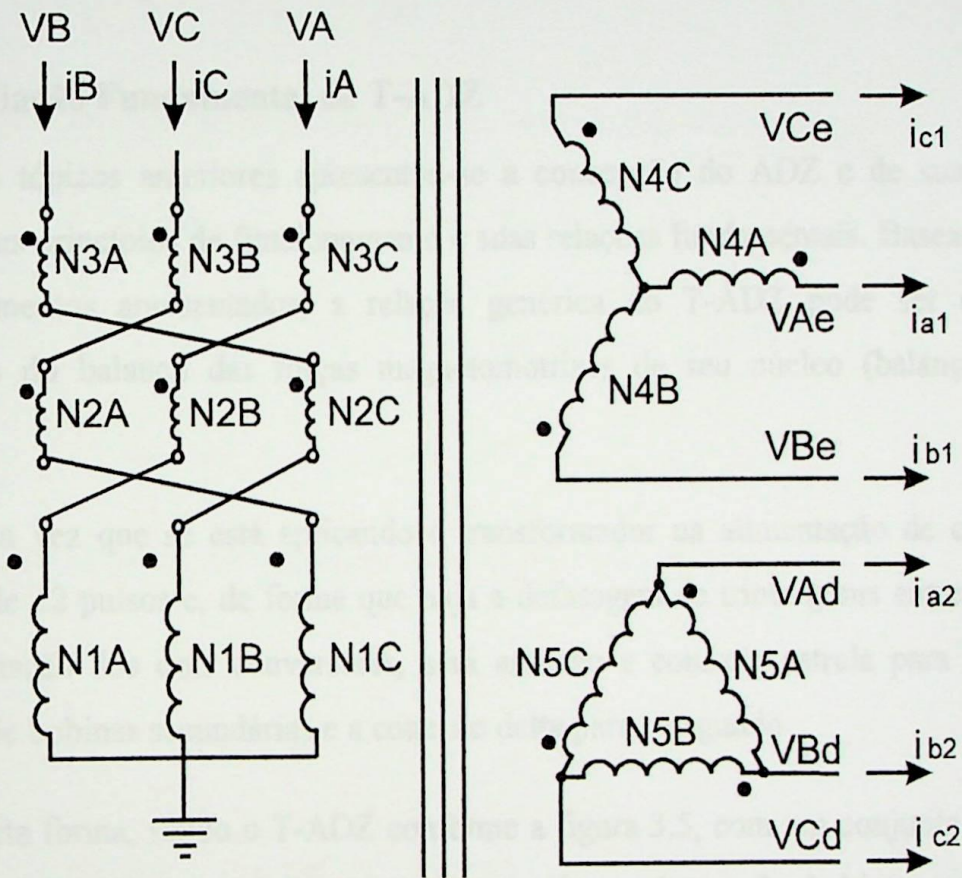


Figura 3.5 - Modelo do T-ADZ para conversores de 12 Pulsos.

Onde:

- V_A , V_B e $V_C \rightarrow$ são as tensões de alimentação no primário;
- V_{Ae} , V_{Be} e $V_{Ce} \rightarrow$ são as tensões de saída no secundário conectado em estrela;
- V_{Ad} , V_{Bd} e $V_{Cd} \rightarrow$ são as tensões de saída no secundário conectado em delta;
- i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} , i_{a2} , i_{b2} e $i_{c2} \rightarrow$ são as correntes de saída para as fases A, B e C da estrela e do delta, respectivamente;

- N_1, N_2, N_3, N_4 e $N_5 \rightarrow$ são o número de espiras da bobina principal primária, primeira e segunda bobinas auxiliares primárias, primeira e segunda bobinas secundárias, respectivamente.

Nessa figura, a representação dos enrolamentos do lado primário não obedeceu a representação angular conforme feita nos enrolamentos do secundário. E, isto se deve ao fato de que, desta forma, há uma melhor visualização da conexão do ADZ no primário e da defasagem de 30 graus dos enrolamentos do secundário.

3.4.1 - Relação Fundamental do T-ADZ

Nos tópicos anteriores apresentou-se a concepção do ADZ e de sua aplicação LDUC, seus princípios de funcionamento e suas relações fundamentais. Baseando-se nos equacionamentos apresentados, a relação genérica do T-ADZ pode ser obtida por intermédio do balanço das forças magnetomotrizes de seu núcleo (balanço ampère-espira).

Uma vez que se está aplicando o transformador na alimentação de conversores estáticos de 12 pulsos e, de forma que haja a defasagem de trinta graus entre as tensões de alimentação dos dois conversores, será adotado a conexão estrela para o primeiro conjunto de bobinas secundárias e a conexão delta para o segundo.

Desta forma, sendo o T-ADZ conforme a figura 3.5, com um conjunto de tensões trifásicas desequilibradas aplicadas aos segundo conjunto de bobinas auxiliares e, utilizando-se a relação fundamental para a conexão ADZ, o balanço de ampères-espiras do T-ADZ será dado por:

$$N_1 \cdot i_A + K_{1A} \cdot T_{1A} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_C + K_{2A} \cdot T_{2A} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot i_B = N_4 \cdot i_{a1} + N_5 \cdot i'_{a2} \quad (3.24)$$

$$K_{1B} \cdot T_{1B} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_A + N_1 \cdot i_B + K_{2B} \cdot T_{2B} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot i_C = N_4 \cdot i_{b1} + N_5 \cdot i'_{b2} \quad (3.25)$$

$$K_{2C} \cdot T_{2C} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot i_A + K_{1C} \cdot T_{1C} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_B + N_1 \cdot i_C = N_4 \cdot i_{c1} + N_5 \cdot i'_{c2} \quad (3.26)$$

De acordo com a finalidade desejada, que influencia diretamente a conexão a ser adotada para as bobinas do secundário, a relação do número de espiras entre as bobinas primária e secundária pode ser alterada. Neste sentido, para a configuração dada na Figura 3.5, tem-se:

$$\frac{N_4}{N_1} = 1,0$$

$$\frac{N_5}{N_1} = 1,73$$
(3.27)

Logo, substituindo-se nas equações (3.24) a (3.26), resulta em:

$$i_A + K_{1A} \cdot T_{1A} \cdot N_2 \cdot i_C + K_{2A} \cdot T_{2A} \cdot N_3 \cdot i_B = i_{a1} + 1,73 \cdot i'_{a2}$$
(3.28)

$$i_B + K_{1B} \cdot T_{1B} \cdot N_2 \cdot i_A + K_{2B} \cdot T_{2B} \cdot N_3 \cdot i_C = i_{b1} + 1,73 \cdot i'_{b2}$$
(3.29)

$$i_C + K_{1C} \cdot T_{1C} \cdot N_2 \cdot i_B + K_{2C} \cdot T_{2C} \cdot N_3 \cdot i_A = i_{c1} + 1,73 \cdot i'_{c2}$$
(3.30)

Com o objetivo de simplificar estas expressões, adota-se:

$$\Gamma_{1A} = K_{1A} \cdot T_{1A} \cdot N_2$$

$$\Gamma_{2A} = K_{2A} \cdot T_{2A} \cdot N_3$$

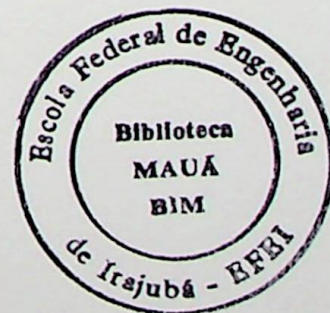
$$\Gamma_{1B} = K_{1B} \cdot T_{1B} \cdot N_2$$

$$\Gamma_{2B} = K_{2B} \cdot T_{2B} \cdot N_3$$

$$\Gamma_{1C} = K_{1C} \cdot T_{1C} \cdot N_2$$

$$\Gamma_{2C} = K_{2C} \cdot T_{2C} \cdot N_3$$
(3.31)

Uma vez que o transformador em estudo será aplicado na alimentação de um conversor de 12 pulsos, no qual é necessária uma defasagem de trinta graus na alimentação dos dois conversores, serão adotadas a conexão estrela para a primeira bobina secundária e a conexão delta para a segunda. A manipulação adequada das equações resultantes leva a:



$$\begin{aligned} i_{a2}' &= \frac{i_{a2} - i_{b2}}{3} \\ i_{b2}' &= \frac{i_{b2} - i_{c2}}{3} \\ i_{c2}' &= \frac{i_{c2} - i_{a2}}{3} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Substituindo-se (3.31) nas equações (3.28) a (3.30), estas passarão a ser dadas por:

$$i_A + \Gamma_{2A} \cdot i_B + \Gamma_{1A} \cdot i_C = i_{a1} + 1,73 \cdot i_{a2}' \quad (3.33)$$

$$\Gamma_{1B} \cdot i_A + i_B + \Gamma_{2B} \cdot i_C = i_{b1} + 1,73 \cdot i_{b2}' \quad (3.34)$$

$$\Gamma_{2C} \cdot i_A + \Gamma_{1C} \cdot i_B + i_C = i_{c1} + 1,73 \cdot i_{c2}' \quad (3.35)$$

Solucionando-se este sistema de equações, encontram-se as correntes de entrada no primário do transformador por meio das expressões abaixo:

$$i_A = \frac{H \cdot (i_{a1} + 1,73 \cdot i_{a2}') + I \cdot (i_{b1} + 1,73 \cdot i_{b2}') + J \cdot (i_{c1} + 1,73 \cdot i_{c2}')}{H} \quad (3.36)$$

$$i_B = \frac{(i_{b1} + 1,73 \cdot i_{b2}') - \Gamma_{2B} \cdot (i_{c1} + 1,73 \cdot i_{c2}') - i_A \cdot (\Gamma_{1B} + \Gamma_{2B} + \Gamma_{2C})}{(1 + \Gamma_{2B} + \Gamma_{1C})} \quad (3.37)$$

$$i_C = (i_{c1} + 1,73 \cdot i_{c2}') - \Gamma_{2C} \cdot i_A - \Gamma_{1C} \cdot i_B \quad (3.38)$$

onde:

$$G = (1 + \Gamma_{2B} + \Gamma_{1C}) \quad (3.39)$$

$$H = G \cdot (1 - \Gamma_{1A} \cdot \Gamma_{2C}) - \Gamma_{2A} \cdot (\Gamma_{1B} + \Gamma_{2B} + \Gamma_{2C}) + \Gamma_{1A} \cdot \Gamma_{1C} \cdot (\Gamma_{1B} + \Gamma_{2B} + \Gamma_{2C}) \quad (3.40)$$

$$I = \Gamma_{1A} \cdot \Gamma_{1C} - \Gamma_{2A} \quad (3.41)$$

$$J = \Gamma_{2A} \cdot \Gamma_{2B} - (\Gamma_{1A} \cdot \Gamma_{1C} \cdot \Gamma_{2B}) \quad (3.42)$$

Verifica-se que, a partir das equações (3.31) a (3.42), na solução das correntes de entrada do primário do T-ADZ, as únicas incógnitas são os valores dos tapes e das polaridades associados ao modelo proposto, uma vez que a relação entre o número de espiras das bobinas auxiliares e principais no primário é uma característica puramente construtiva. Considerando-se que este transformador é alimentado por tensões desequilibradas, os valores das polaridades e dos tapes a serem selecionados para a mitigação deste desequilíbrio são obtidos processando-se uma metodologia desenvolvida para este fim. Esta teve como ponto de partida a mesma apresentada para a aplicação LDUC da seção anterior, cujas bases se constituem nas relações dadas pelo sistema de equações (3.12) a (3.14).

3.4.2 - Obtenção dos tapes e polaridades para o T-ADZ

No ADZ as bobinas auxiliares não influenciam nas tensões aplicadas à bobina principal, o que não ocorre no T-ADZ. Neste, devido a alteração na forma de alimentação, as tensões a que estão submetidas às bobinas principais recebem a contribuição das tensões das bobinas auxiliares. Porém, são as bobinas principais que induzem as bobinas auxiliares. Logo, as bobinas auxiliares influenciam na principal e são influenciadas pela mesma. Isto indica a necessidade de um procedimento iterativo para o cálculo dos tapes e das polaridades para o T-ADZ. Este procedimento está descrito, em forma de fluxograma, no Anexo I. Com a implementação desse fluxograma chega-se aos valores dos tapes e das polaridades mais próximos da melhor correção do desequilíbrio de tensão apresentado pela rede. O programa desenvolvido para este fluxograma encontra-se no Anexo II e foi desenvolvido no Matlab.

3.5 - Conclusões

Este capítulo apresentou uma nova topologia de alimentação tanto para cargas lineares quanto para cargas não lineares, denominada T-ADZ, a qual foi concebida por Paulillo em sua Tese de Doutorado. Tal topologia tem sua concepção baseada no ADZ e permite corrigir desequilíbrios de tensão da rede de alimentação.

O cálculo dos parâmetros do T-ADZ foi baseado, inicialmente, na mesma metodologia empregada na aplicação LDUC. Entretanto, devido ao efeito de indução mútua existente entre as bobinas auxiliares e principais, decorrente da alimentação do T-ADZ ser feita pelas bobinas auxiliares, foi desenvolvida uma nova metodologia de obtenção de tapes e polaridades.

Uma vez apresentado as bases deste transformador especial, faz-se mister verificar a sua eficácia. Desta forma, no próximo capítulo será apresentada a implementação do T-ADZ aplicado à alimentação de conversores estáticos, utilizando o pacote computacional EMTP – *Electromagnetics Transients Program*. Neste sentido, foram conduzidas simulações computacionais do modelo apresentado, cujos resultados permitirão avaliar, inicialmente sua eficiência na correção do desequilíbrio de tensão e, em seguida, observar a diminuição dos harmônicos não característicos na rede de alimentação em decorrência da alteração da topologia de alimentação do transformador do conversor.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A VALIDAÇÃO DO T-ADZ

4.1 - Considerações Iniciais

No capítulo anterior apresentou-se uma nova topologia de transformador, denominada T-ADZ, a qual permite corrigir desequilíbrios de tensão da rede de alimentação. Assim sendo, faz-se necessário comprovar a factibilidade de tal topologia e, para isto, optou-se por simulações no pacote computacional EMTP - *Eletromagnetics Transients Program*.

A escolha do EMTP deve-se ao fato do mesmo ser amplamente aceito no meio técnico-científico. Através da sua utilização têm-se, principalmente, resultados muito próximos dos resultados obtidos no sistema real e uma grande gama de fenômenos que podem ser analisados. Há de se destacar também que, o EMTP apresenta um grande número de modelos para os diversos componentes do sistema elétrico de potência, incluindo-se também modelos eficientes para alguns componentes da eletrônica de potência.

De posse desta poderosa ferramenta, serão desenvolvidos os modelos do conversor de 12 pulsos, utilizando-se a topologia clássica de alimentação e a topologia T-ADZ. E, como forma de se comprovar não só o modelo, mas também a eficácia do T-ADZ, serão consideradas duas situações da rede alimentação: com e sem desequilíbrios de tensão.

4.2 - O EMTP

O EMTP é um pacote computacional aplicado a simulação de sistemas elétricos, amplamente difundido e extremamente poderoso. Logo, para o modelo do T-ADZ que se pretende simular, torna-se interessante abordar sobre a estrutura de dados do EMTP.

4.2.1 - Estrutura de Dados do EMTP

Cada circuito simulado no EMTP é descrito por um conjunto de informações, agrupadas por classes e dispostas em determinada ordem. A estrutura de um arquivo para o processamento de uma simulação no EMTP depende do caso que está sendo executado, havendo conjuntos de informações que são indispensáveis e outros que são opcionais.

A montagem da entrada de dados do EMTP deve obedecer, impreterivelmente, a ordem padrão de seqüência dos cartões. No entanto, as simulações podem utilizar todos ou somente alguns destes cartões, sendo que, quando não utilizados, eles devem ser encerrados com um cartão tipo “BLANK”. A ordem padrão da seqüência de dados do EMTP é a seguinte:

- a) BEGIN NEW DATA CASE;
- b) Miscellaneous data cards and extensions;
- c) TACS HYBRID ou TACS STAND ALONE ou MODELS;
- d) BLANK cartão que termina todos os dados do TACS;
- e) Cartão para ramos lineares e não lineares, transformadores e linhas de transmissão;
- f) BLANK cartão que termina esse grupo;
- g) Cartão para chaves do sistema elétrico;
- h) BLANK cartão que termina todos os cartões de chaves;
- i) Cartão para fontes do sistema elétrico;
- j) BLANK cartão que termina todas as fontes;
- k) Cartão para fluxo de carga;

- l) BLANK cartão que termina todos os fluxos de cargas;
- m) Cartão para sobrepor condições iniciais;
- n) BLANK cartão que termina todas as condições iniciais;
- o) Cartão para especificar variáveis de saída;
- p) BLANK cartão que termina com todas as variáveis de saída;
- q) Cartão para especificar funções ponto a ponto;
- r) Cartão do modo de plotagem;
- s) BLANK cartão que termina com todos os modos de plotagem;
- t) BLANK cartão que termina o caso a ser simulado.

A explicação sobre cada um desses cartões, bem como seus modos de utilização são apresentados no Anexo III. De forma a ilustrar a programação em EMTP, o Anexo IV exhibe um programa desenvolvido para topologia T-ADZ juntamente com o conversor de 12 pulsos.

4.2.2 - Modelo do T-ADZ para o EMTP

O EMTP admite vários modelos de transformadores tanto monofásicos quanto trifásicos, nos quais podem ser incluídos fenômenos de saturação e/ou de magnetização. Assim sendo, o modelo de transformador escolhido para representar o T-ADZ é o da figura 4.1 a seguir, o qual permite representação dos fenômenos de saturação e de magnetização.

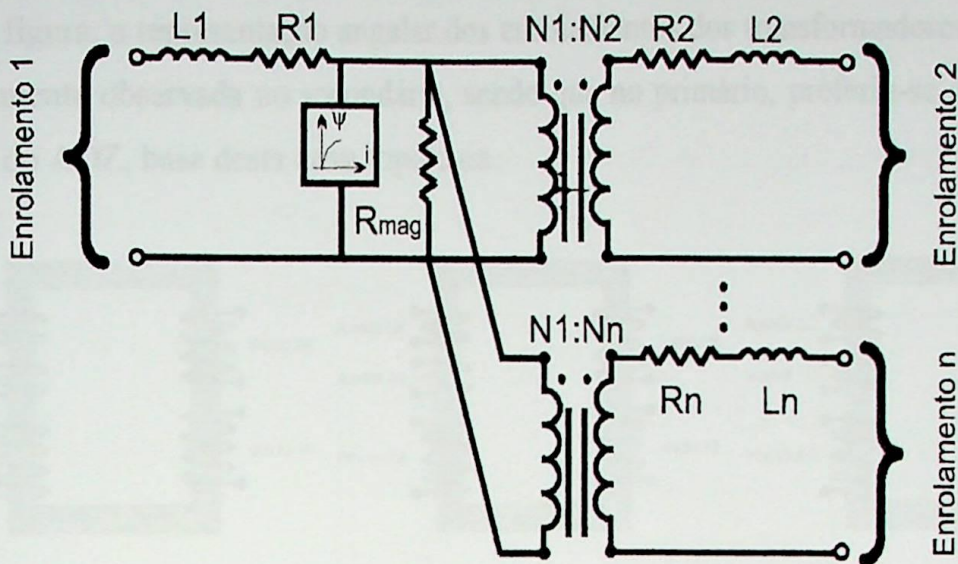


Figura 4.1 - Um Modelo de Transformador para o EMTP.

Onde:

- L_n e R_n → indutância e resistência do enrolamento 'n' do transformador, respectivamente;
- $N_1 : N_n$ → relação de transformação do enrolamento 'n' para o primeiro enrolamento, sempre;
- R_{mag} → resistência de magnetização do transformador;
- ' ψ ' e ' i ' → fluxo e corrente de magnetização do transformador, respectivamente.

Vale destacar que devido a esta implementação ser ainda em campo teórico, não se utilizou a característica ' ψ ' e ' i ', que depende muito das características construtivas do equipamento. Também se deve levar em conta que as tensões nos enrolamentos do transformador são senoidais e, portanto, o fluxo magnético será conforme esperado para um transformador comum de 60 Hz, sem maiores problemas.

Então a partir deste modelo básico, chega-se ao modelo trifásico do T-ADZ utilizado para simulações no EMTP, como apresentado na figura 4.2. Onde se tem três transformadores monofásico, cada um deles com três circuitos. Destaca-se que no primário, além da bobina principal, ainda se tem as duas bobinas auxiliares.

Assim sendo, unindo-se este modelo do T-ADZ ao modelo do conversor de 12 pulsos não controlado, tem-se o seguinte modelo aplicável ao EMTP, conforme a figura

4.3. Nesta figura, a representação angular dos enrolamentos dos transformadores somente foi corretamente observada no secundário, sendo que no primário, preferiu-se dar ênfase à conexão do ADZ, base desta nova topologia.

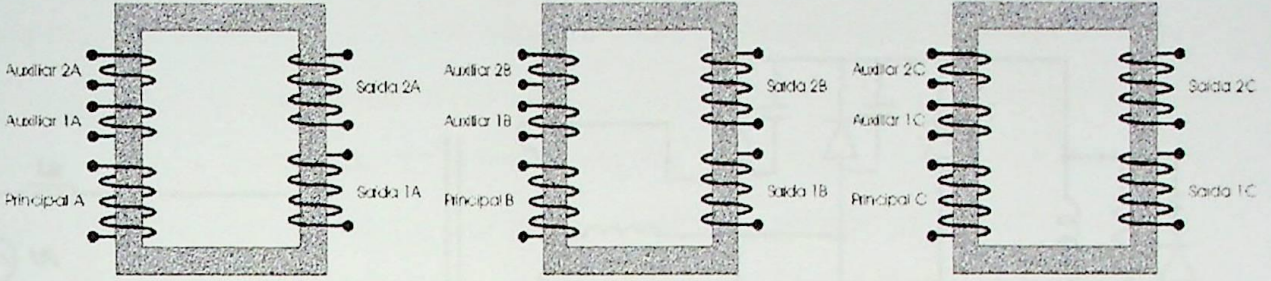


Figura 4.2 - Modelo do T-ADZ para o EMTP.

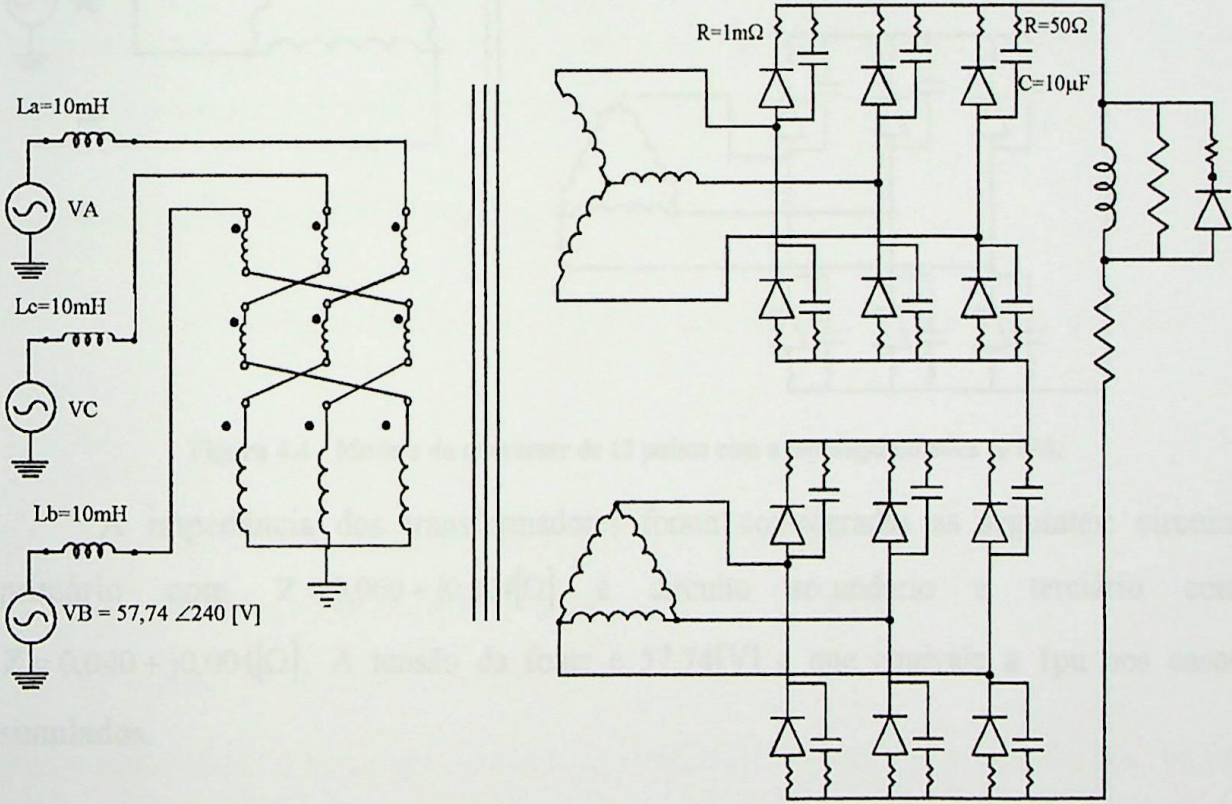


Figura 4.3 - Modelo do T-ADZ e do conversor de 12 pulsos para o EMTP.

onde:

- L_a , L_b e L_c : indutâncias da rede para as fases A, B e C, respectivamente;
- V_A , V_B e V_C : tensões das fases A, B e C, respectivamente.

A fim de subsidiar as análises que serão consideradas, ou seja, as comparações que serão feitas entre a topologia proposta e a topologia clássica, desenvolveu-se também um modelo para esta última em conjunto com o conversor de 12 pulsos, como mostra a figura 4.4.

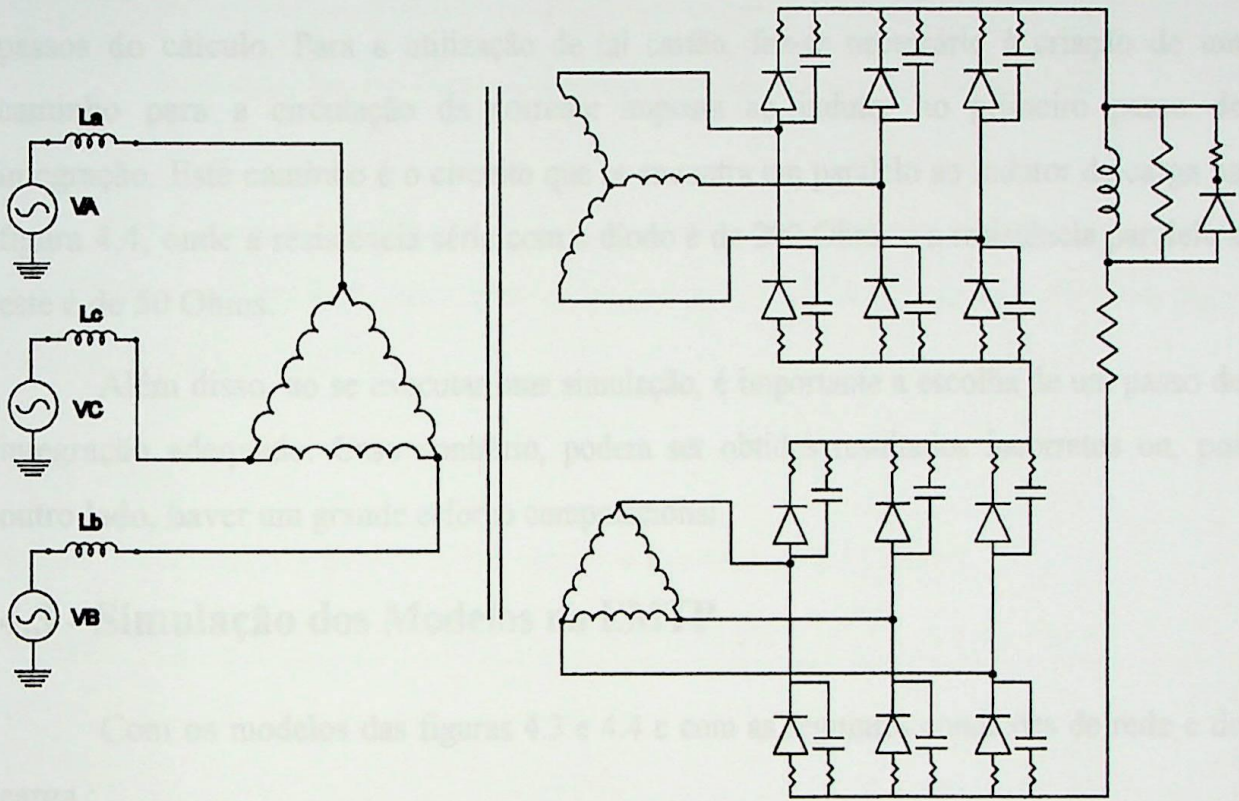


Figura 4.4 - Modelo do conversor de 12 pulsos com a topologia clássica $\Delta/Y/\Delta$.

A impedância dos transformadores foram consideradas as seguintes: circuito primário com $Z = 0,060 + j0,004[\Omega]$ e circuito secundário e terciário com $Z = 0,040 + j0,004[\Omega]$. A tensão da fonte é $57.74[V]$ o que equivale a 1pu nos casos simulados.

Na obtenção de modelos de circuitos elétricos, para a simulação no EMTP, é importante lembrar que estes devem ser muito próximos do circuito real. Desta forma, torna-se imprescindível a utilização de *snubber's* com os semicondutores para que o modelo da ponte conversora funcione corretamente. Desta forma, o circuito *snubber* utilizado é composto de uma resistência série de $0,001[\Omega]$ e um circuito paralelo com uma resistência de $50 [\Omega]$ em série com uma capacitância de $10 [\mu F]$, conforme pode ser visto na figura 4.3.

Vale ressaltar também que, para se atingir mais rapidamente o regime permanente e com isso diminuir o tempo de simulação, deve-se utilizar o cartão de condição inicial para sobrepor a corrente inicial no indutor da carga, que é de valor alto (nas simulações considerou-se um valor de 1[H], o que contribui para que a corrente de linha se apresente como degraus bem definidos). Desta forma, o indutor estará carregado logo nos primeiros passos do cálculo. Para a utilização de tal cartão, faz-se necessário à criação de um caminho para a circulação da corrente imposta ao indutor no primeiro passo de integração. Este caminho é o circuito que se encontra em paralelo ao indutor de carga na figura 4.4, onde a resistência série com o diodo é de 200 Ohms e a resistência paralela a este é de 50 Ohms.

Além disso, ao se executar uma simulação, é importante a escolha de um passo de integração adequado. Caso contrário, podem ser obtidos resultados incorretos ou, por outro lado, haver um grande esforço computacional.

4.3 - Simulação dos Modelos no EMTP

Com os modelos das figuras 4.3 e 4.4 e com as seguintes condições de rede e de carga :

- tensão de 70 [V] fase-fase,
- impedância da rede representada por uma indutância de 0,01[mH];
- carga puramente resistiva de 3 [Ω];
- indutor de alisamento de 1[H];

foram simulados os casos apresentados na tabela 4.1. A partir destas simulações, foram obtidas as formas de onda da tensão retificada e da corrente de linha de entrada, sendo que desta última, obteve-se o espectro harmônico. E neste, para se destacar mais os harmônicos não característicos, deu-se um *zoom* na figura, de tal forma que o 1^o harmônico não pode ser visualizado integralmente. Há de destacar também que, as amplitudes dos harmônicos de corrente variam um pouco de fase para fase, sendo necessária exibir os espectros harmônicos das três fases para se comprovar isto.

Tabela 4.1 - Casos selecionados.

Caso	Tensões do Sistema			VUF [%]
	\vec{V}_A	\vec{V}_B	\vec{V}_C	
1	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$1 \angle 120^\circ$	0
2	$1,252 \angle 0^\circ$	$1,15 \angle 240^\circ$	$1,016 \angle 120^\circ$	6

Nota: o caso 1 refere-se à situação ideal para o sistema elétrico, servindo de referência para análises que serão efetuadas, e o caso 2 obtido a partir dos casos simulados por Lee [Le98].

4.3.1 - Resultados

4.3.1.1 - Topologia Clássica Alimentando o Conversor de 12 Pulsos

Caso 1: $VUF = 0\%$, $\vec{V}_A = 1,0 \angle 0^\circ$, $\vec{V}_B = 1,0 \angle 240^\circ$ e $\vec{V}_C = 1,0 \angle 120^\circ$

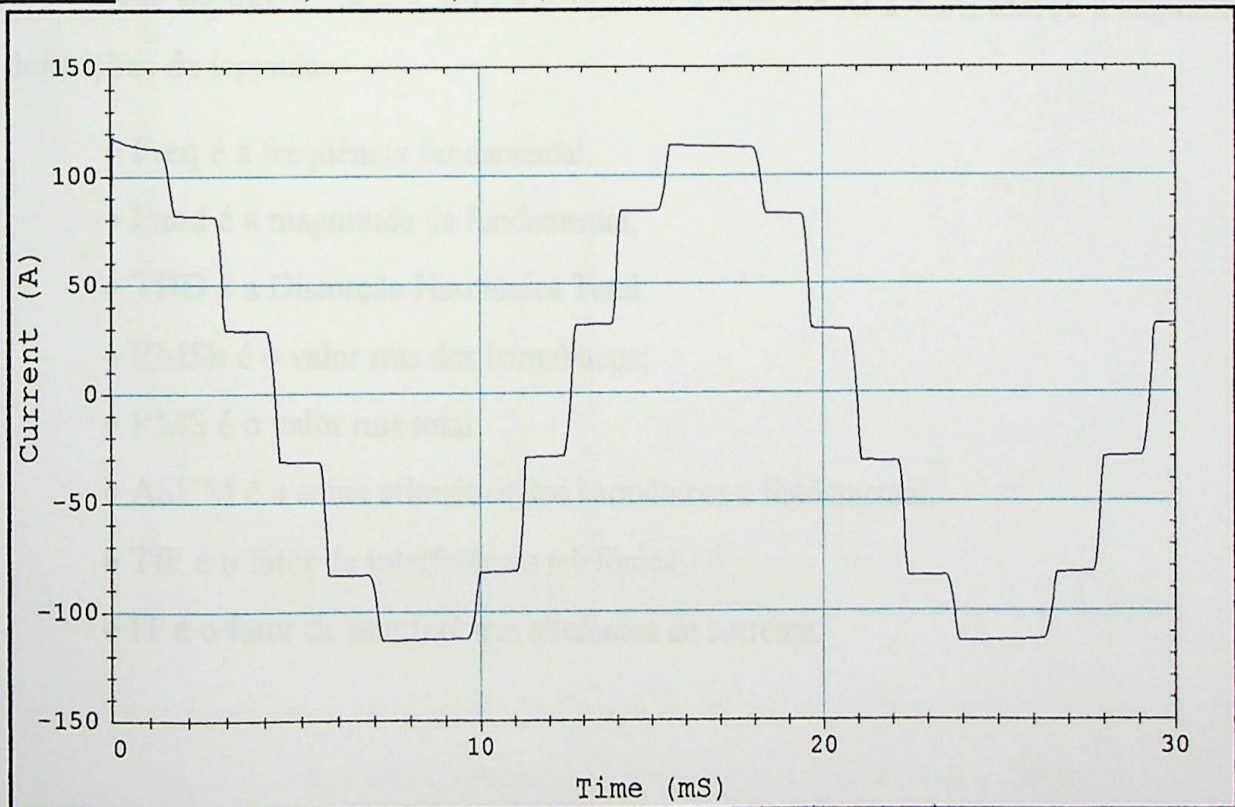


Figura 4.5 - Corrente de linha do conversor de 12 pulsos – topologia clássica.

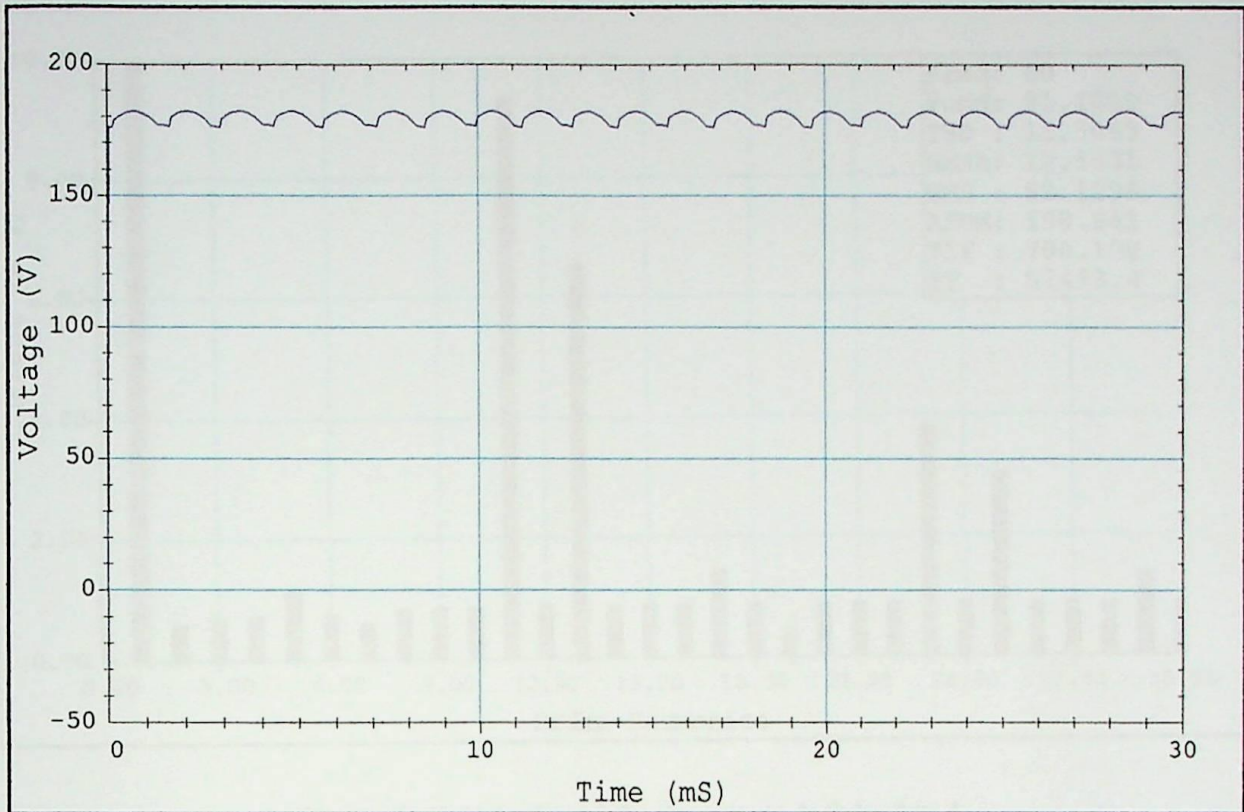


Figura 4.6 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia clássica.

Nas figuras 4.7 a 4.9, 4.12 a 4.14, 4.17 a 4.19 e 4.22 a 4.24, tem-se as seguintes definições da legenda:

- Freq é a frequência fundamental;
- Fund é a magnitude da fundamental;
- THD é a Distorção Harmônica Total;
- RMS_h é o valor rms dos harmônicos;
- RMS é o valor rms total;
- ASUM é a soma aritmética dos harmônicos e fundamental;
- TIF é o fator de interferência telefônica;
- IT é o fator de interferência telefônica de corrente.

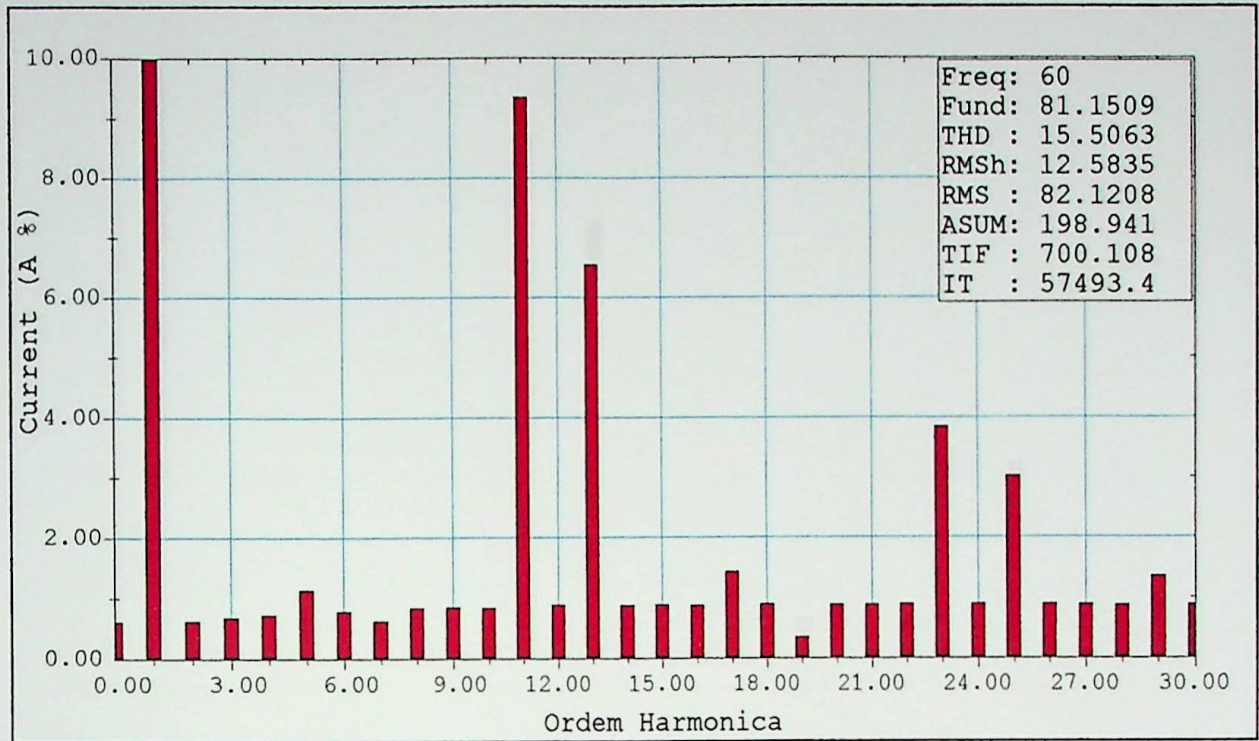


Figura 4.7 - Espectro harmônico da corrente de linha, fase A.

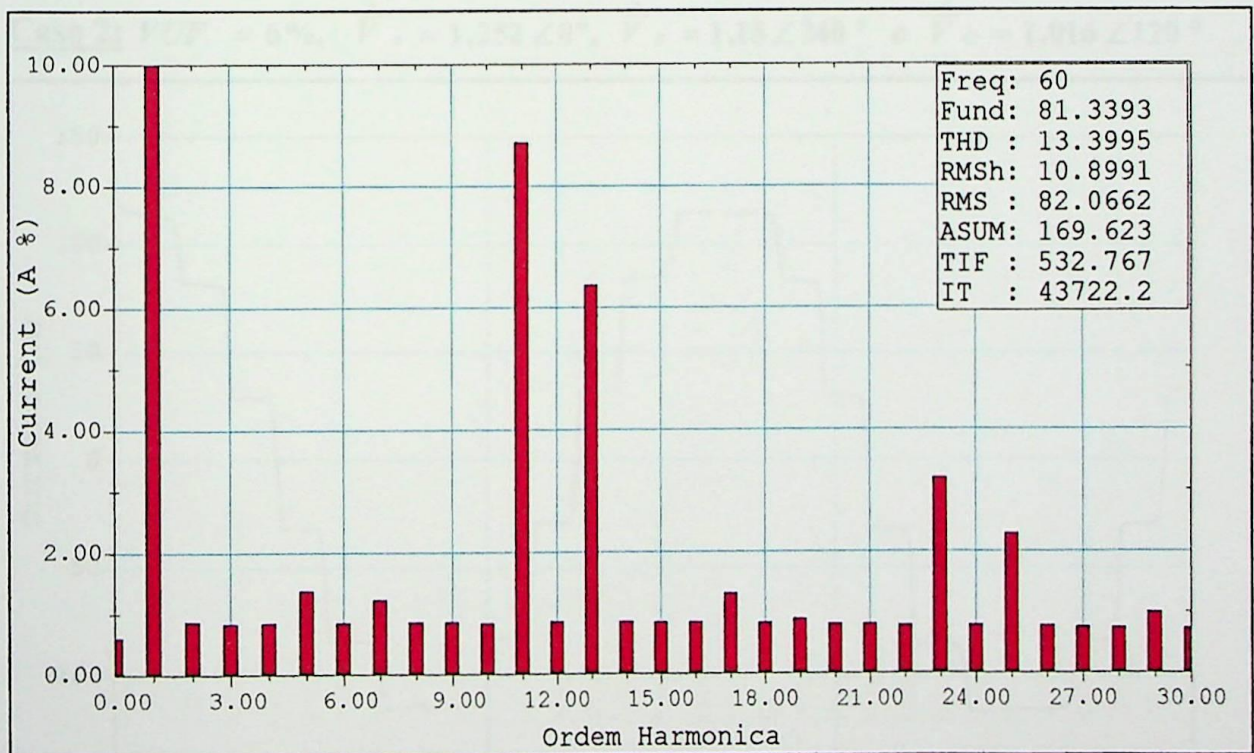


Figura 4.8 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.

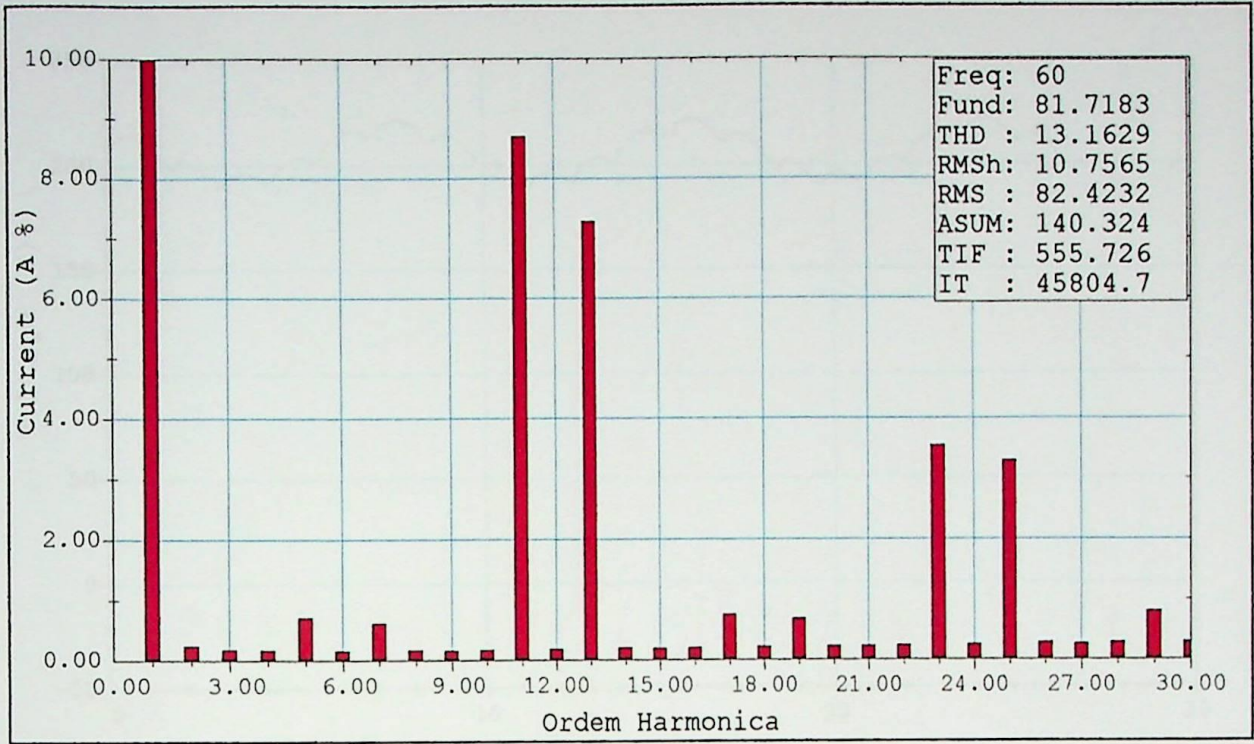


Figura 4.9 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.

Caso 2: $VUF = 6\%$, $\vec{V}_A = 1,252 \angle 0^\circ$, $\vec{V}_B = 1,15 \angle 240^\circ$ e $\vec{V}_C = 1,016 \angle 120^\circ$

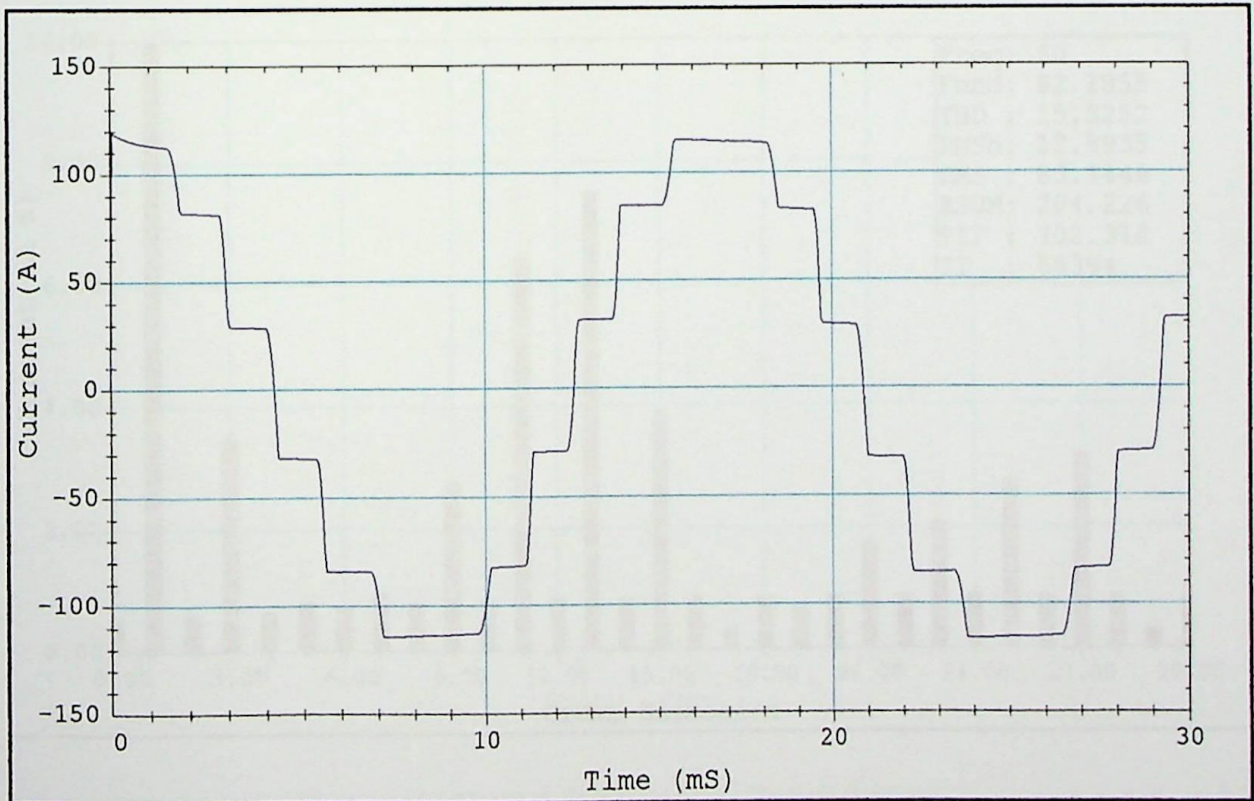


Figura 4.10 - Corrente de linha do conversor de 12 pulsos – topologia clássica.

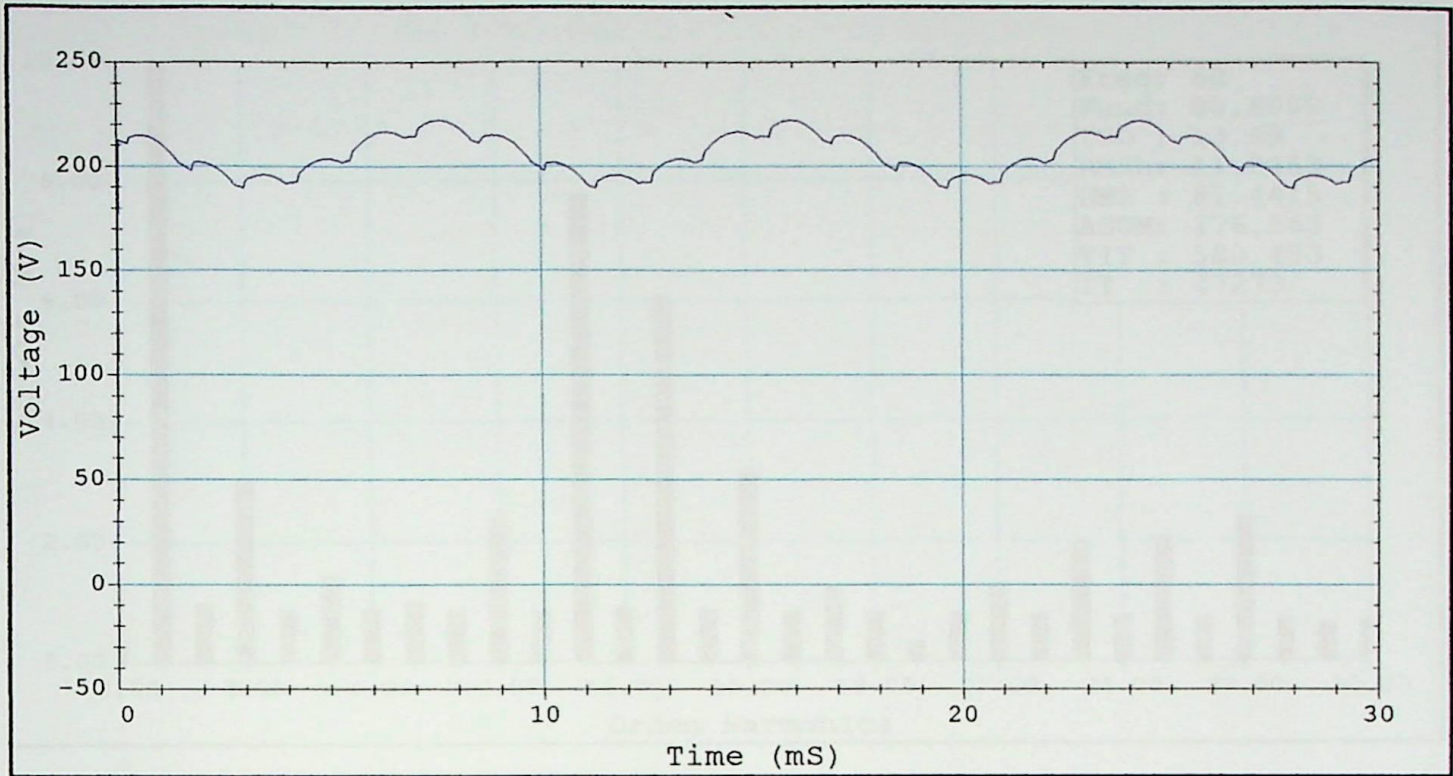


Figura 4.11 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia clássica.

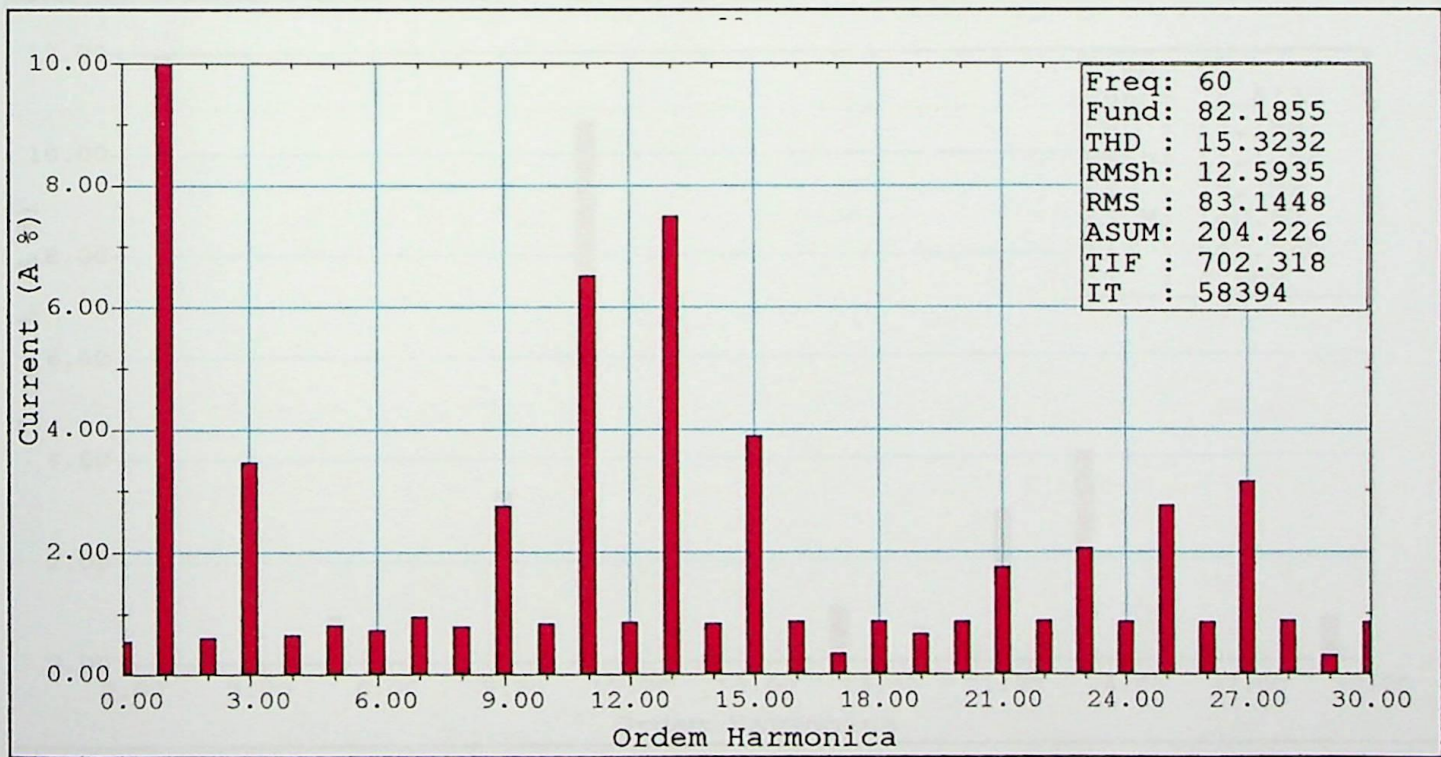


Figura 4.12 - Espectro harmônico da corrente de linha fase A.

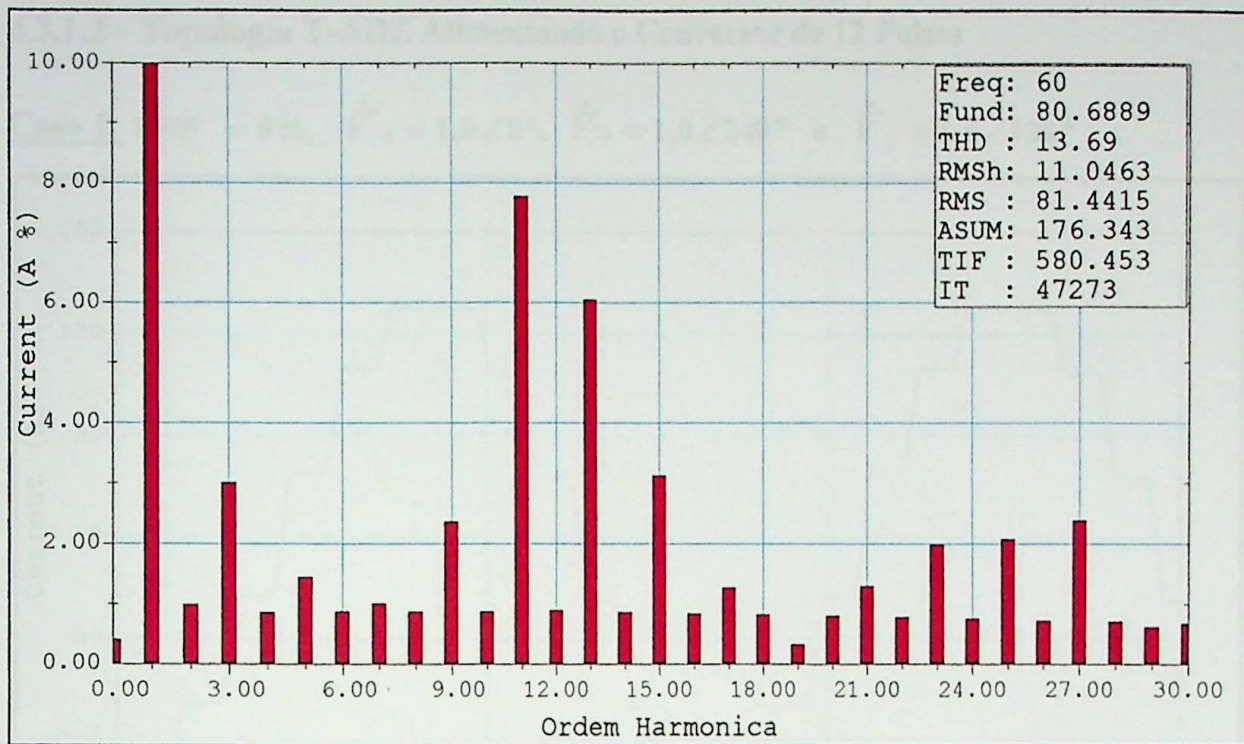


Figura 4.13 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.

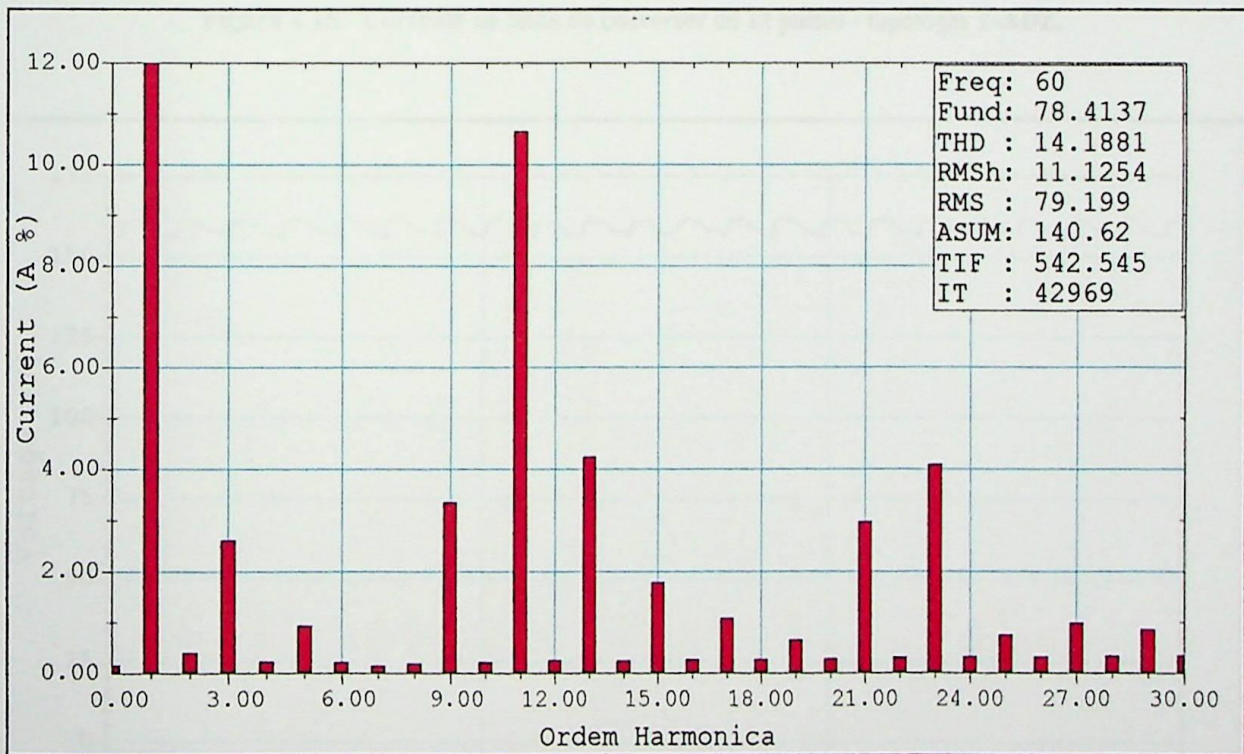


Figura 4.14 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.

4.3.1.2 - Topologia T-ADZ Alimentando o Conversor de 12 Pulsos

Caso 1: $VUF = 0\%$, $\dot{V}_A = 1,0 \angle 0^\circ$, $\dot{V}_B = 1,0 \angle 240^\circ$ e $\dot{V}_C = 1,0 \angle 120^\circ$

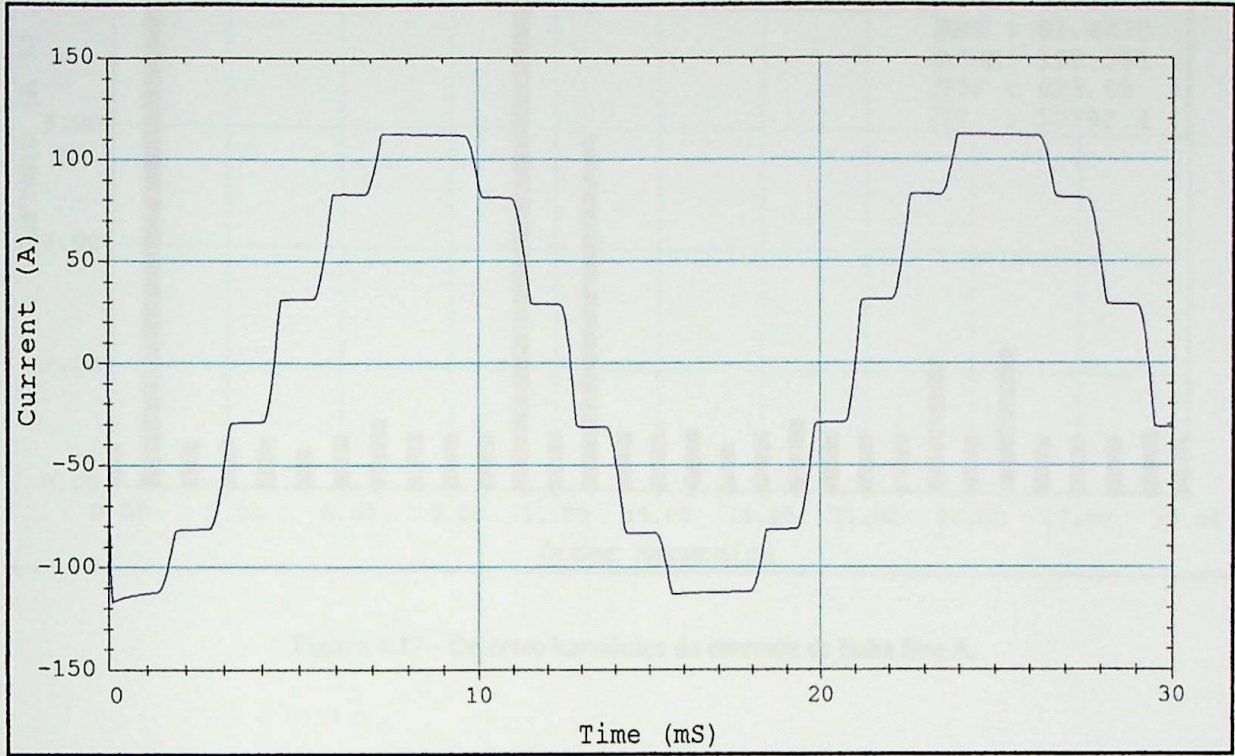


Figura 4.15 - Corrente de linha do conversor de 12 pulsos - topologia T-ADZ.

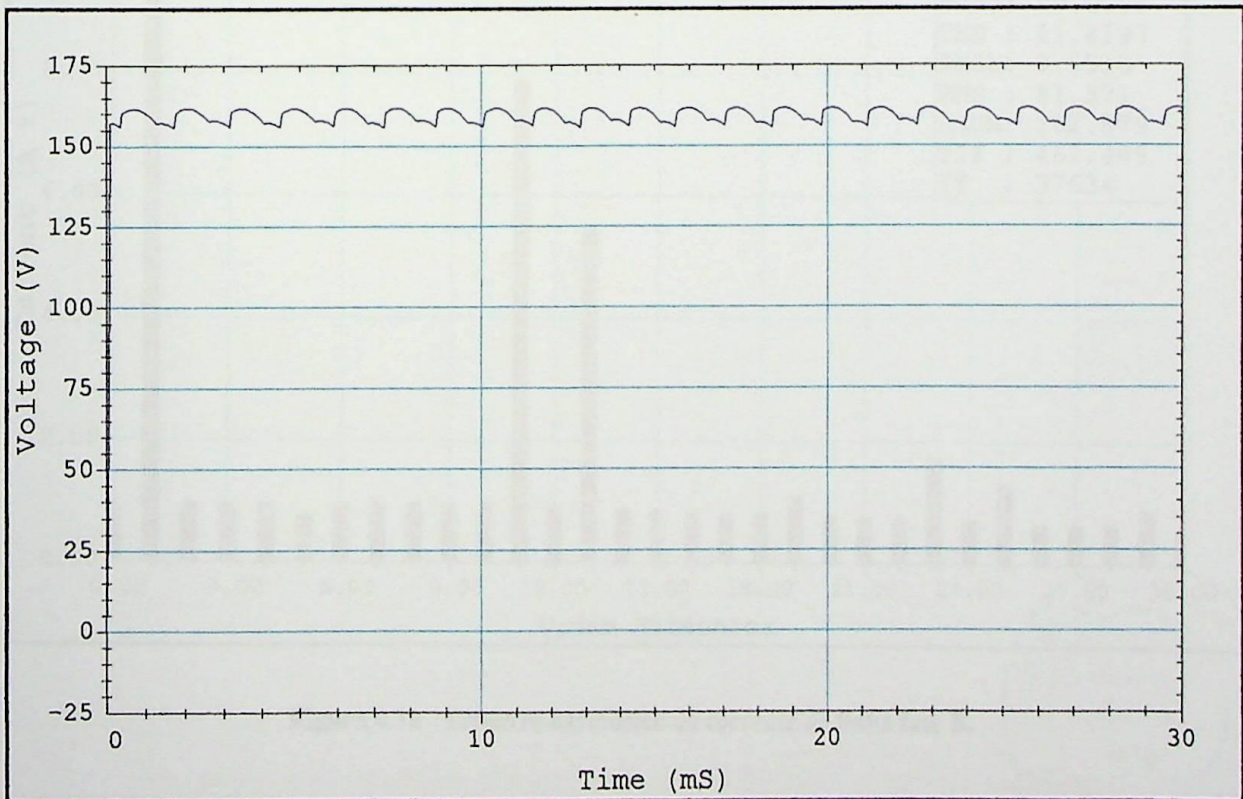


Figura 4.16 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia T-ADZ.

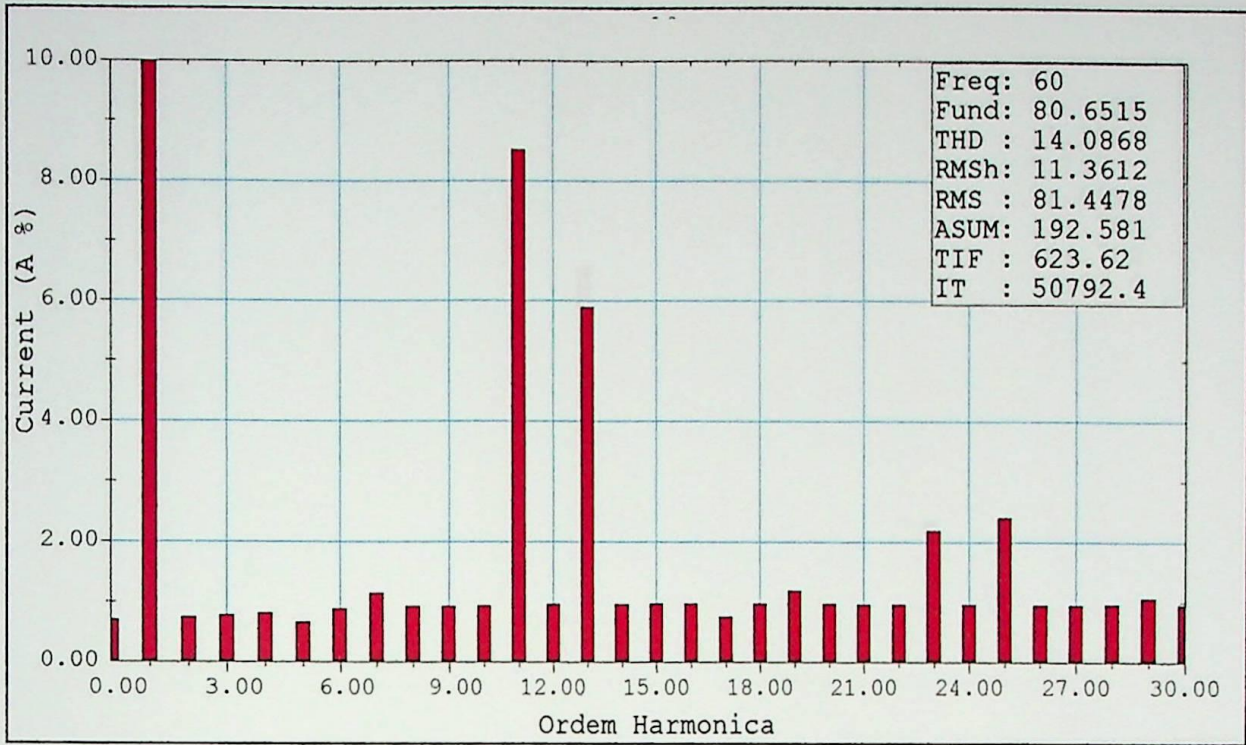


Figura 4.17 - Espectro harmônico da corrente de linha fase A.

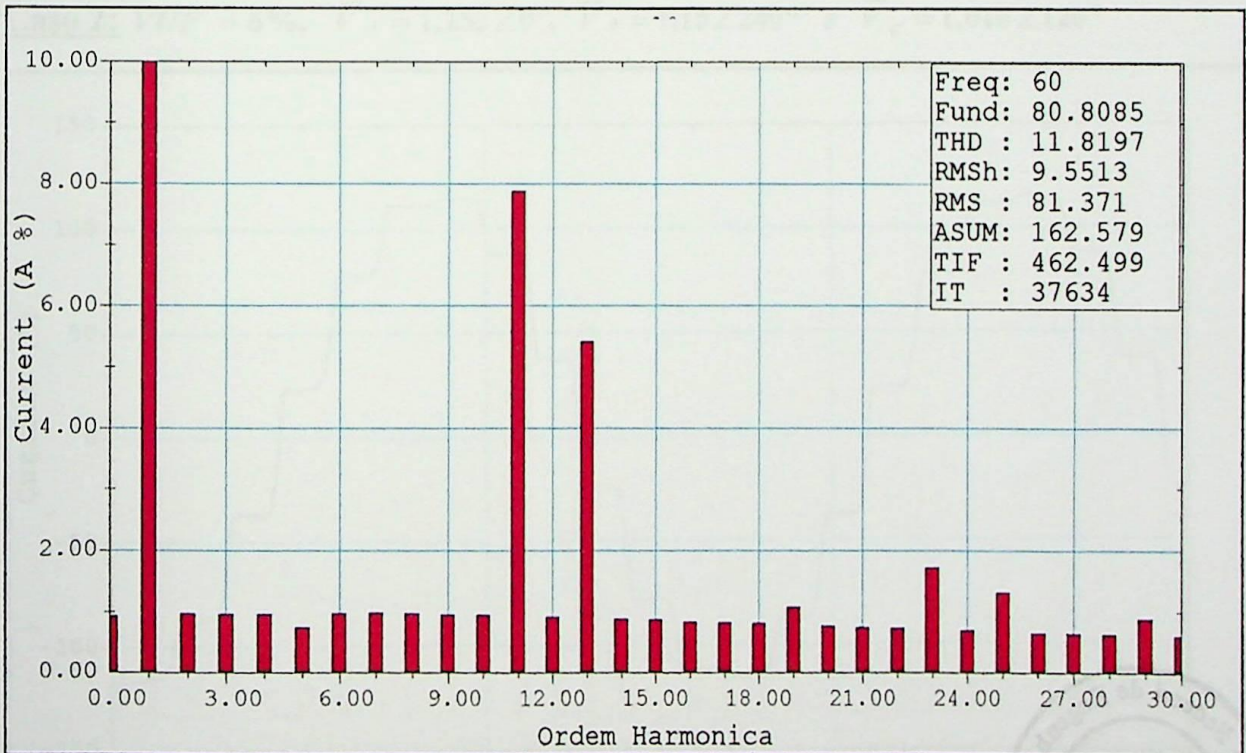


Figura 4.18 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.

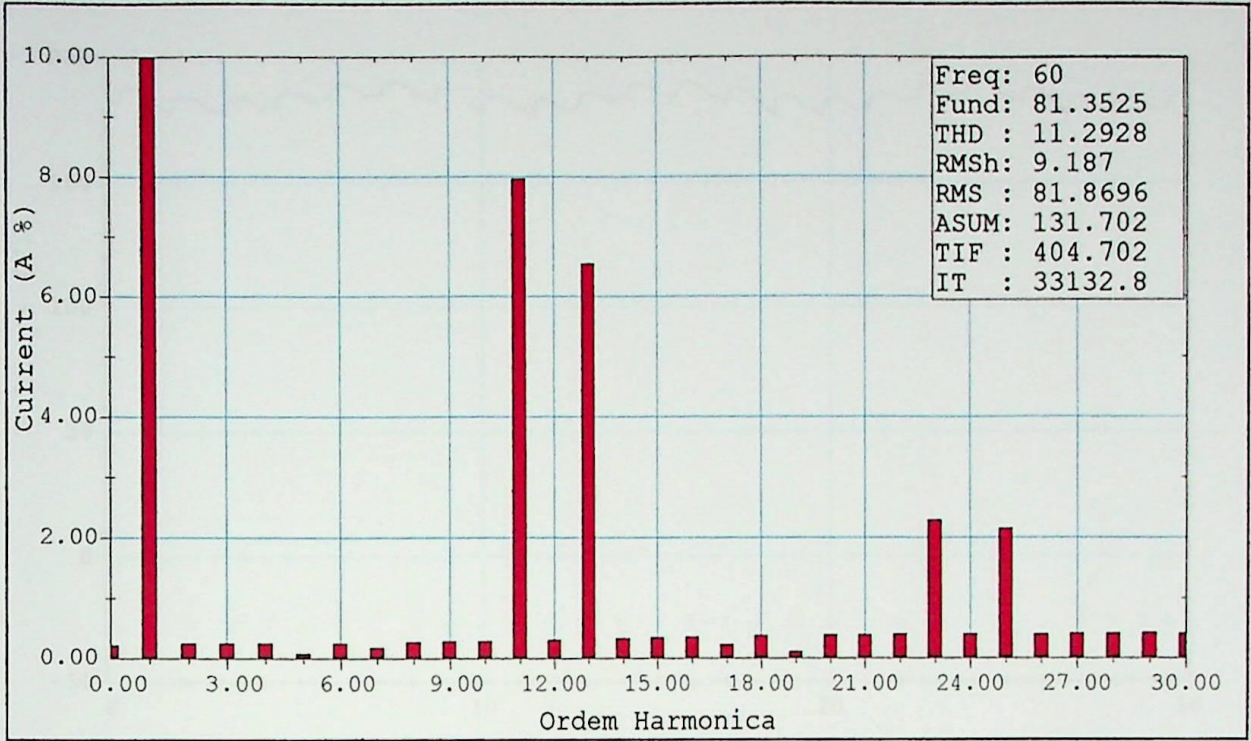


Figura 4.19 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.

Caso 2: $VUF = 6\%$, $\vec{V}_A = 1,252 \angle 0^\circ$, $\vec{V}_B = 1,15 \angle 240^\circ$ e $\vec{V}_C = 1,016 \angle 120^\circ$

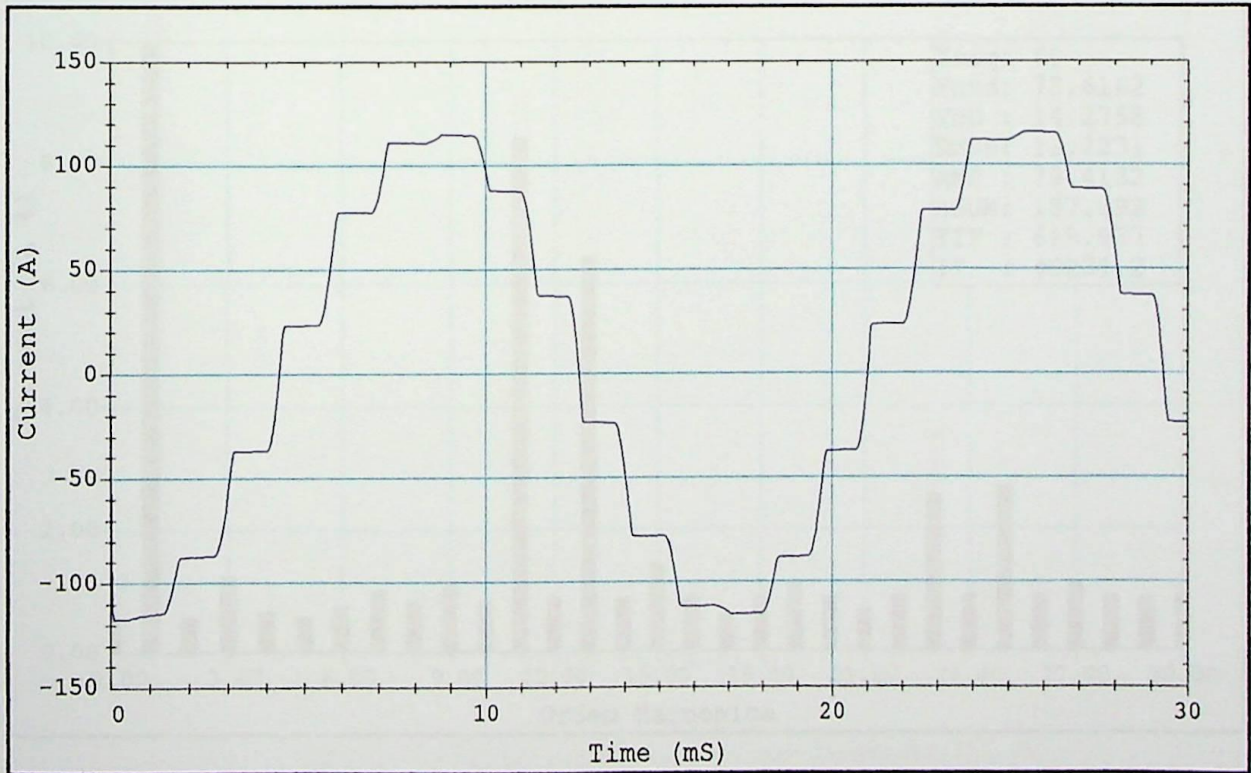


Figura 4.20 – Corrente de linha do conversor de 12 pulsos – topologia T-ADZ.

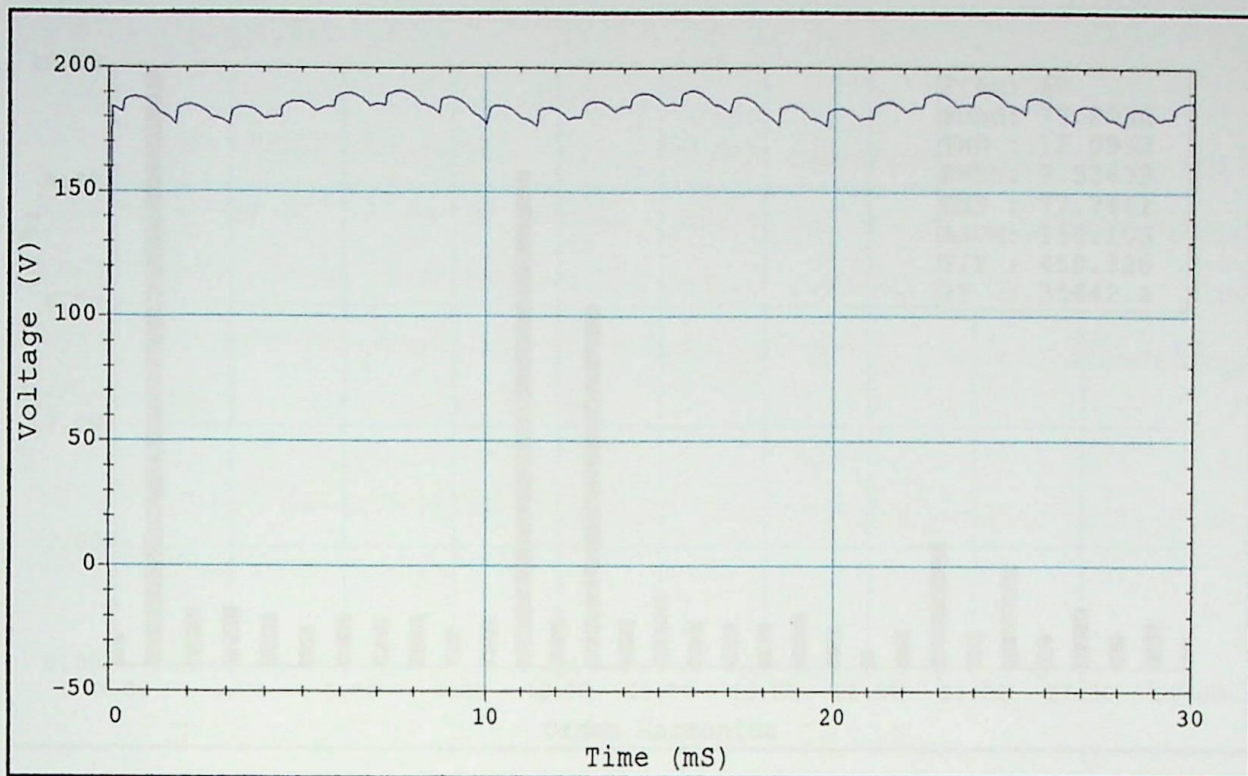


Figura 4.21 - Tensão retificada do conversor de 12 pulsos - topologia T-ADZ.

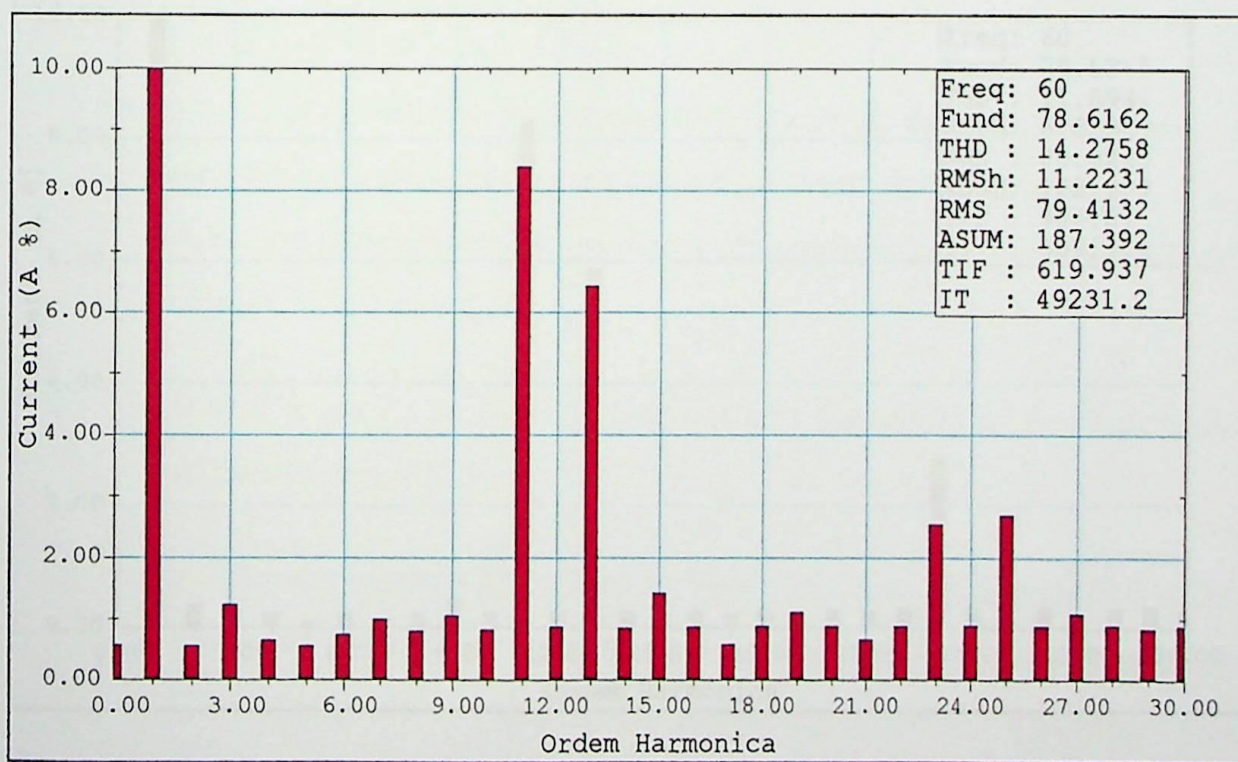


Figura 4.22 - Espectro harmônico da corrente de linha fase A.

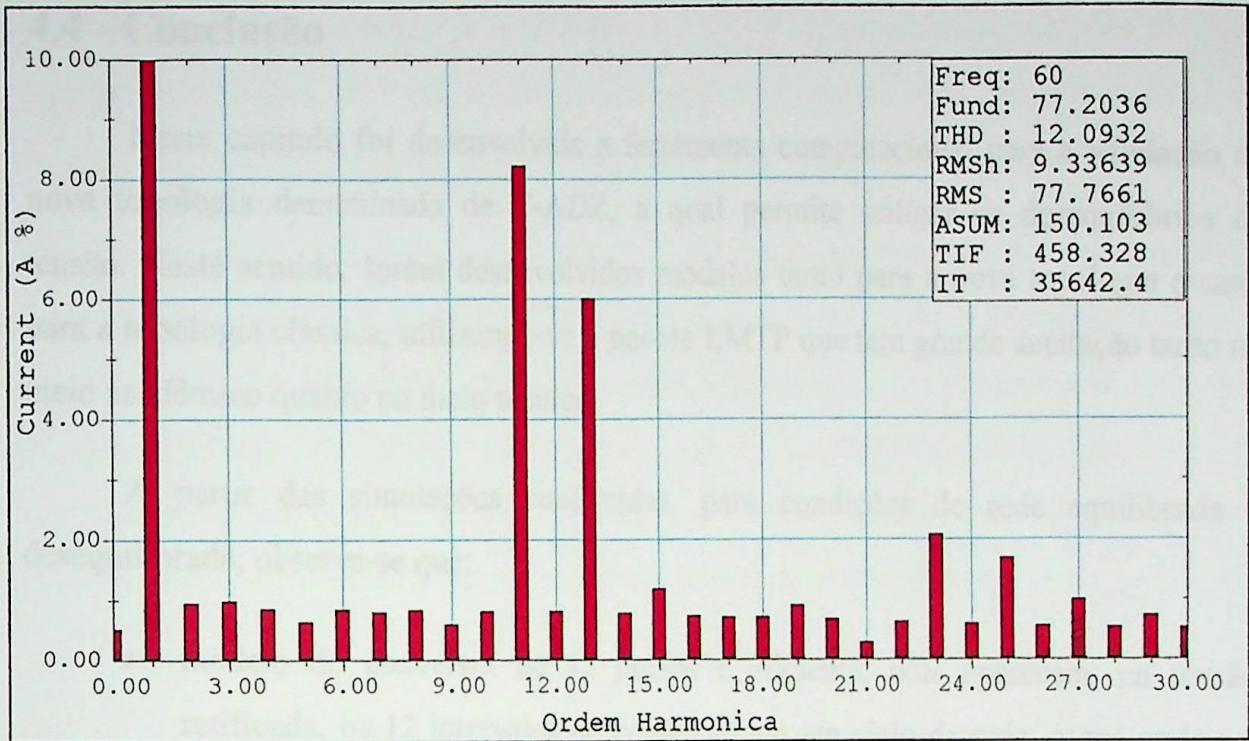


Figura 4.23 - Espectro harmônico da corrente de linha fase B.

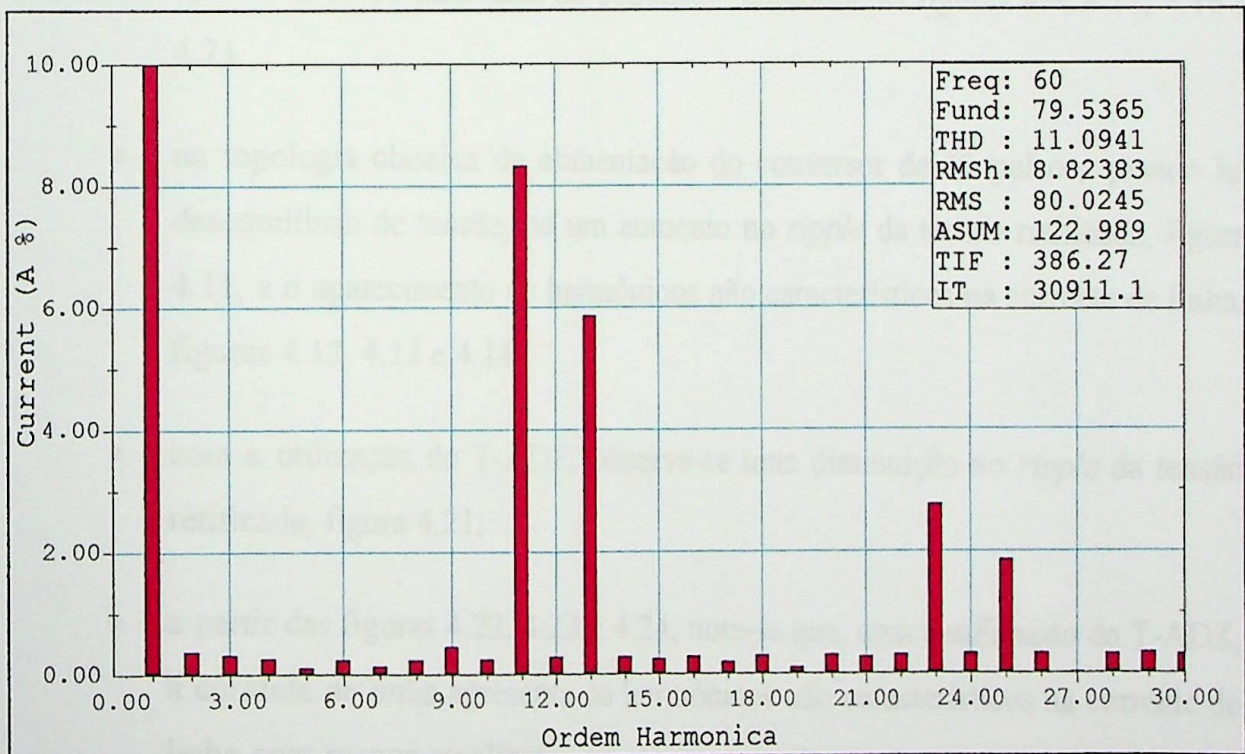


Figura 4.24 - Espectro harmônico da corrente de linha fase C.

4.4 - Conclusão

Neste capítulo foi desenvolvida a ferramenta computacional para a validação da nova topologia denominada de T-ADZ, a qual permite mitigar os desequilíbrios de tensão. Neste sentido, foram desenvolvidos modelos tanto para a nova topologia quanto para a topologia clássica, utilizando-se o pacote EMTP que tem grande aceitação tanto no meio acadêmico quanto no meio técnico.

A partir das simulações conduzidas, para condições de rede equilibrada e desequilibrada, observa-se que:

- modelo do conversor de 12 pulsos é eficiente, pois aparecem, na tensão retificada, os 12 intervalos de condução em um ciclo da rede, o que pode ser evidenciado pelas figuras 4.5, 4.10, 4.15 e 4.20. O mesmo também pode ser evidenciado pelo formato da corrente de linha do conversor que também apresenta os 12 intervalos de condução, conforme as figuras 4.6, 4.11, 4.16 e 4.21
- na topologia clássica de alimentação do conversor de 12 pulsos, quando há desequilíbrio de tensão, há um aumento no *ripple* da tensão retificada, figura 4.11, e o aparecimento de harmônicos não característicos na corrente de linha, figuras 4.12, 4.13 e 4.14;
- com a utilização do T-ADZ, observa-se uma diminuição no *ripple* da tensão retificada, figura 4.21;
- a partir das figuras 4.22, 4.23 e 4.24, nota-se que, com a utilização do T-ADZ, a corrente de linha apresenta os harmônicos não característicos na corrente de linha com menor amplitude, ou até mesmo não apresenta certos harmônicos, quando comparados com a topologia clássica, sob a mesma condição de alimentação desequilibrada;

Assim sendo, quando a topologia T-ADZ é empregada na alimentação de conversores estáticos ela permite mitigar a injeção de harmônicos não característicos na rede de alimentação bem como promove uma diminuição do *ripple* da tensão retificada.

Desta forma, fica comprovada não só a eficácia da implementação computacional da topologia T-ADZ e do conversor de 12 pulsos, mas também que a topologia T-ADZ, bem como sua metodologia de cálculo dos tapes e polaridades, são eficientes na correção de desequilíbrios de tensão. Restando, para o capítulo seguinte, verificar o comportamento do T-ADZ, comparativamente a topologia clássica, na alimentação de sistemas conversores frente a diferentes tipos e valores de desequilíbrio.

4.1 - Considerações Iniciais

No capítulo anterior verificou-se a eficácia dos modelos do T-ADZ, do conversor de 12 pulsos e da topologia clássica. Nesta forma consideramos os aspectos relevantes sobre a nova topologia na alimentação de conversores de 12 pulsos sob condições desequilibradas de tensão de rede de alimentação, sob o aspecto da mitigação dos harmônicos não característicos gerados pelo conversor.

Sendos estes, este capítulo apresenta uma análise de conversores de potência operando com condições desequilibradas de rede de alimentação. Esta análise compreende uma investigação sobre a influência do grau de desequilíbrio e do tipo de rede, bem como a análise que além do valor máximo do desequilíbrio, analisa a influência do tipo de rede, ou seja, de quanto se variações ocorrem no modelo, sob uma condição de tensão ou ainda, em outras, em que esta investigação foi conduzida para os conversores de 12 pulsos analisados no capítulo anterior, os resultados aqui obtidos igualmente permitirão verificar a eficácia da topologia T-ADZ.

Esta análise foi conduzida utilizando-se os resultados obtidos em outras simulações em EMTF, avaliando-se a injeção de harmônicos na rede de alimentação.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DE CONVERSORES DE 12 PULSOS SOB DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

5.1 - Considerações Iniciais

No capítulo anterior verificou-se a eficácia dos modelos do T-ADZ, do conversor de 12 pulsos e da topologia clássica. Também foram considerados os aspectos relevantes sobre a nova topologia na alimentação de conversores de 12 pulsos sob condições desequilibradas da tensão da rede de alimentação, tal como a mitigação dos harmônicos não característicos gerados pelo conversor.

Sendo assim, este capítulo apresenta uma análise de conversores de potência operando com condições desequilibradas da rede de alimentação. Esta análise empreende uma investigação acerca da influência do grau do desequilíbrio e do tipo do mesmo. Isto significa que, além do valor intrínseco do desequilíbrio, analisar-se-á a influência do tipo do mesmo, ou seja, decorrentes de variações somente no módulo, somente no ângulo da tensão ou ainda, em ambos. Em face desta investigação ser conduzida para os conversores de 12 pulsos utilizados no capítulo anterior, os resultados aqui obtidos igualmente permitirão verificar a eficácia da topologia T-ADZ.

Esta análise foi conduzida utilizando-se os resultados obtidos em novas simulações em EMTP, avaliando-se a injeção de harmônicos na rede de alimentação.

5.2 - Simulações em EMTP

De forma a abranger as diversas situações possíveis de desequilíbrios de tensão do sistema elétrico, os novos casos simulados foram divididos em dois grupos: o primeiro com fator de desequilíbrios de tensão – VUF, variável e, o segundo, com VUF constante. Desta maneira, avalia-se a influência do tipo de desequilíbrio e da amplitude do mesmo.

As figuras que serão exibidas foram traçadas a partir de dados de simulações no EMTP e, a magnitude dos harmônicos de corrente, em porcentagem, é sempre referente ao valor da respectiva fundamental. Estas figuras foram criadas utilizando-se o Excel. Vale lembrar que se manteve as condições de rede e de carga do capítulo anterior.

5.2.1 - Desequilíbrios de Tensão com VUF Variável

Com o intuito de se verificar o comportamento do T-ADZ na alimentação de conversores de 12 pulsos quando a rede apresenta desequilíbrios de tensão com VUF variável, foram relacionados os seguintes casos de desequilíbrios de tensão, publicados por Rashid e Maswood [Ra88], e que estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Tensões fase-neutro com VUF variável.

Caso	Tensões da Rede de Alimentação			VUF [%]
	\dot{V}_{AN}	\dot{V}_{BN}	\dot{V}_{CN}	
1	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$1 \angle 120^\circ$	0
2	$1 \angle 0^\circ$	$1,01 \angle 240^\circ$	$0,95 \angle 120^\circ$	1,9
3	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$0,9 \angle 120^\circ$	3,5
4	$1 \angle 0^\circ$	$0,863 \angle 240^\circ$	$0,861 \angle 120^\circ$	5,0
5	$1 \angle 0^\circ$	$1,06 \angle 240^\circ$	$1,2 \angle 120^\circ$	5,5
6	$1 \angle 0^\circ$	$1,1 \angle 240^\circ$	$1,4 \angle 120^\circ$	10,3
7	$1 \angle 0^\circ$	$1,13 \angle 240^\circ$	$1,55 \angle 120^\circ$	13,5
8	$1 \angle 0^\circ$	$1,1 \angle 240^\circ$	$1,9 \angle 120^\circ$	21,3

Assim sendo, para os casos de desequilíbrios de tensão da tabela anterior, tem-se os seguintes resultados:

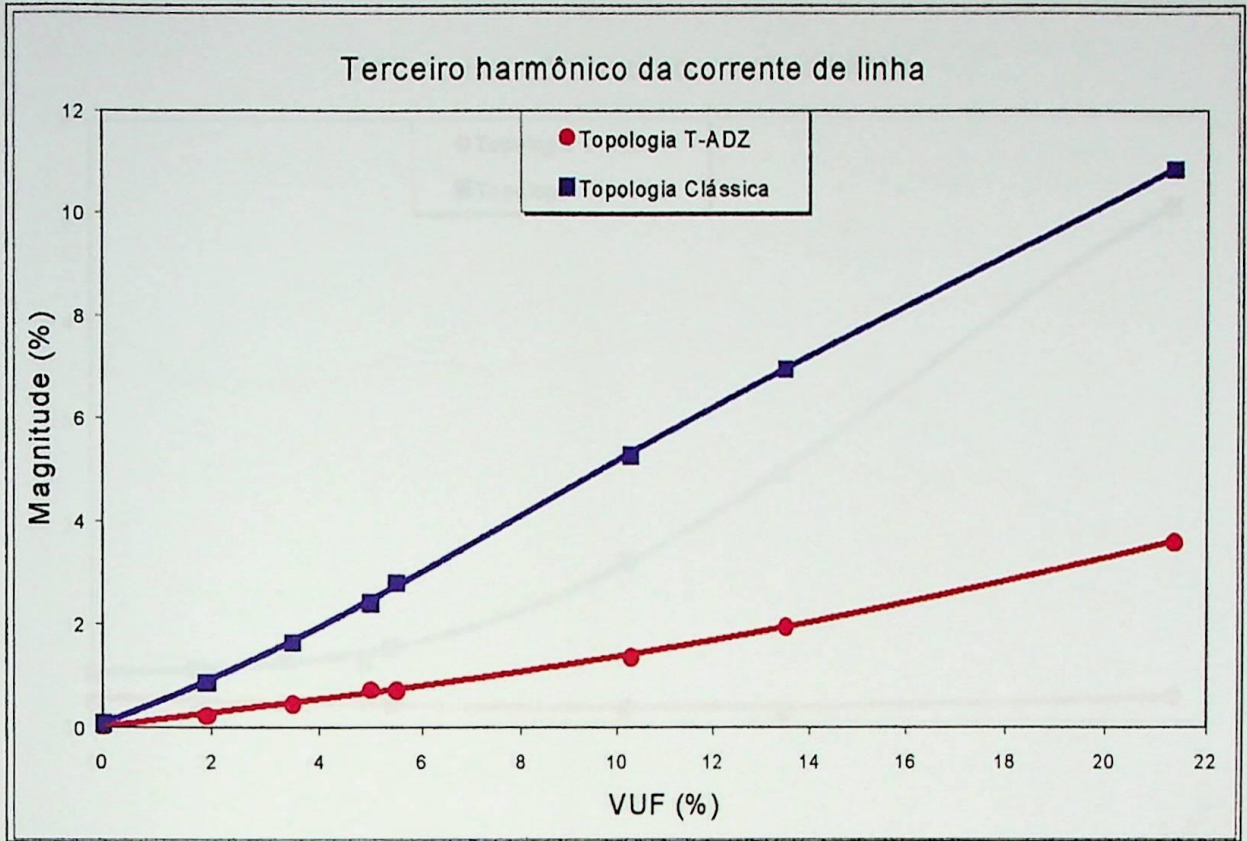


Figura 5.1 - Terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

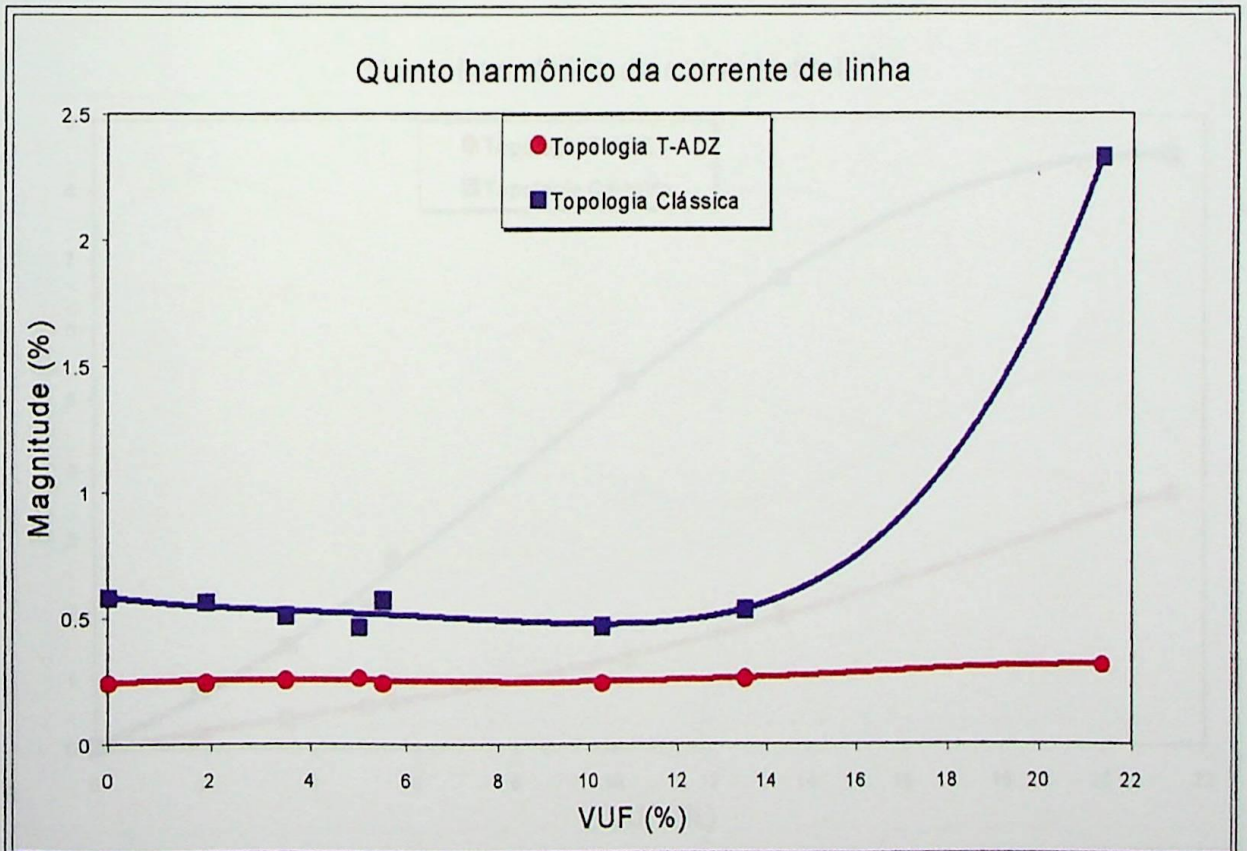


Figura 5.2 - Quinto harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

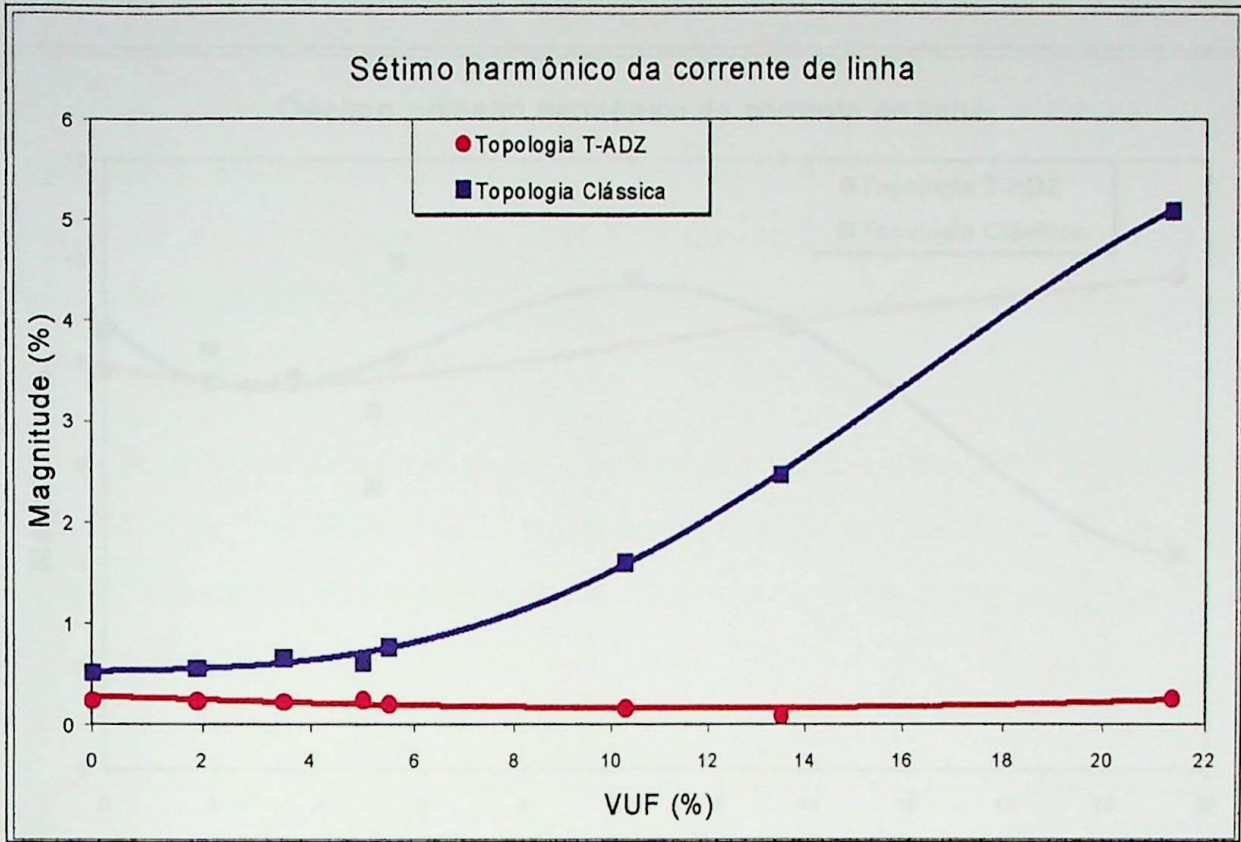


Figura 5.3 - Sétimo harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

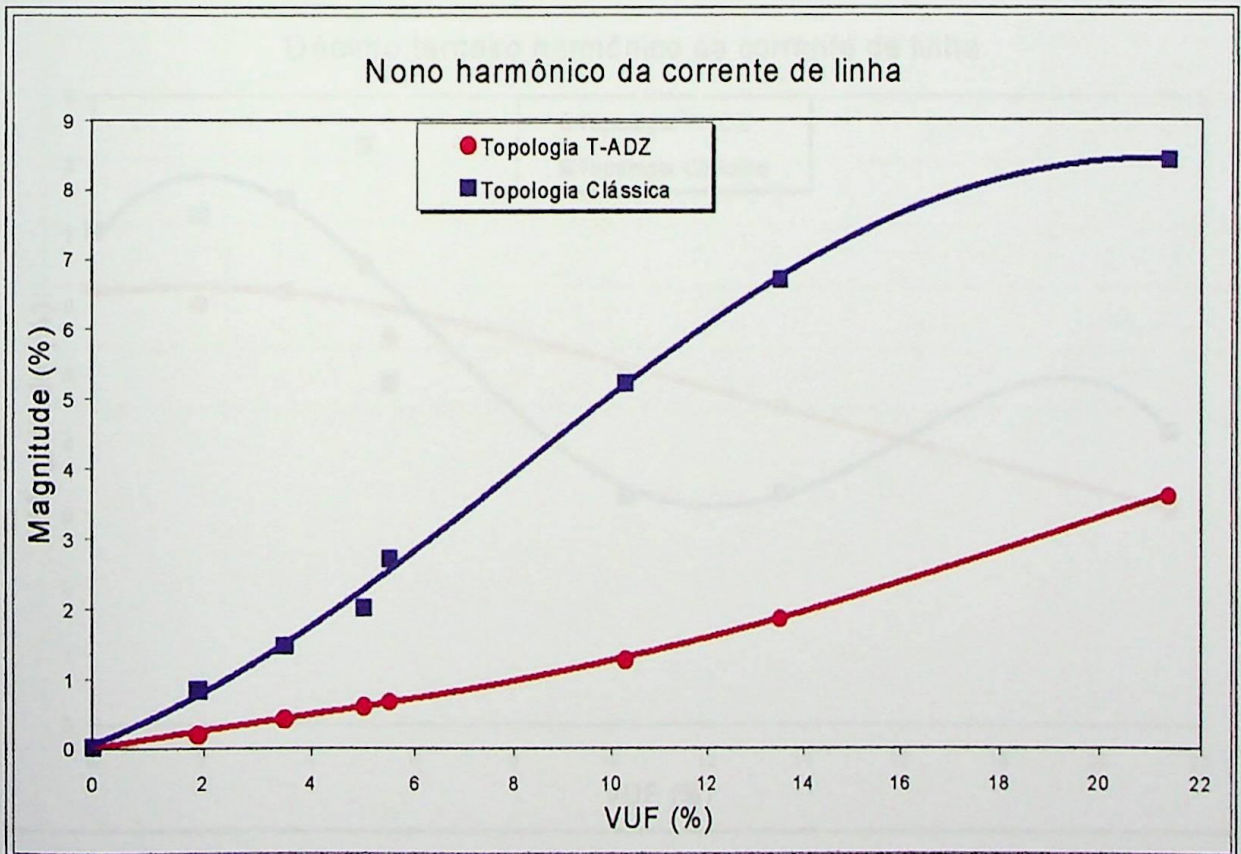


Figura 5.4 - Nono harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

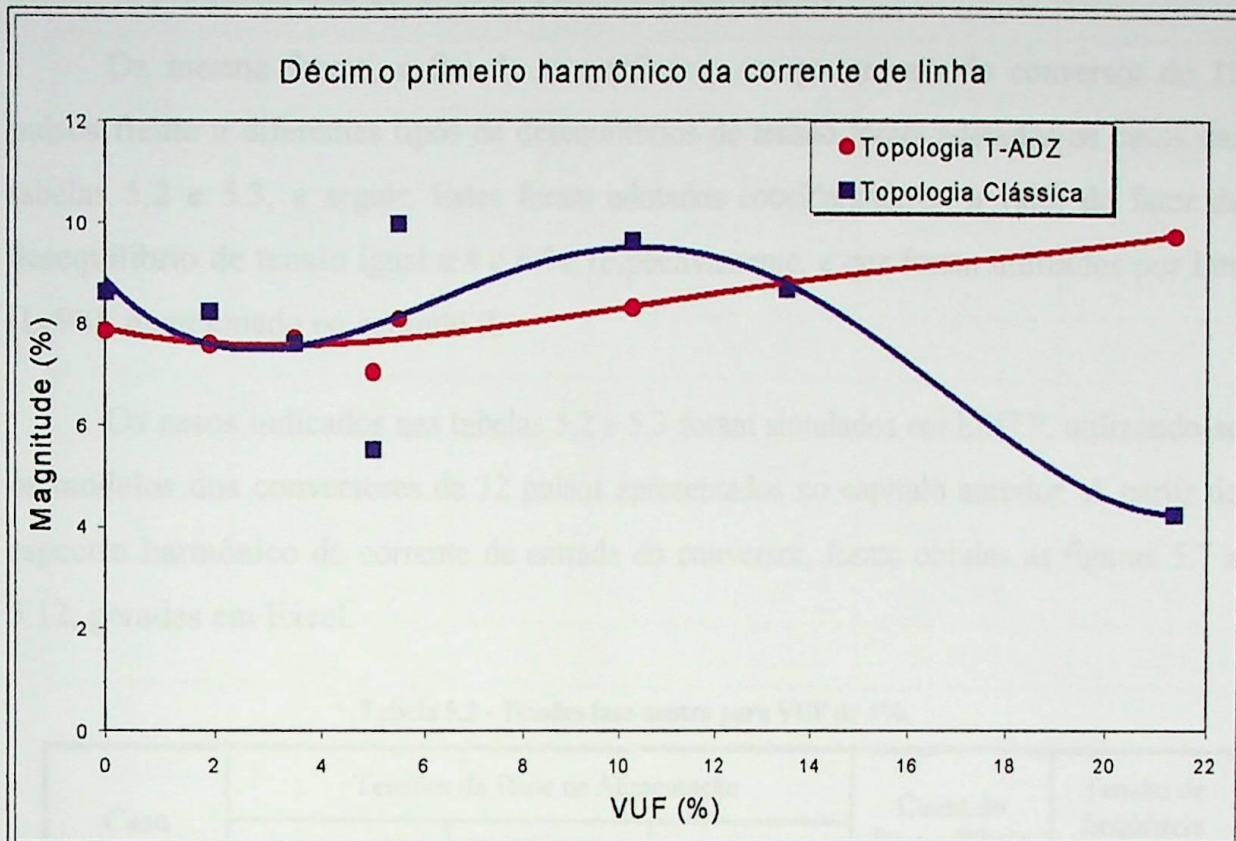


Figura 5.5 – Décimo primeiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

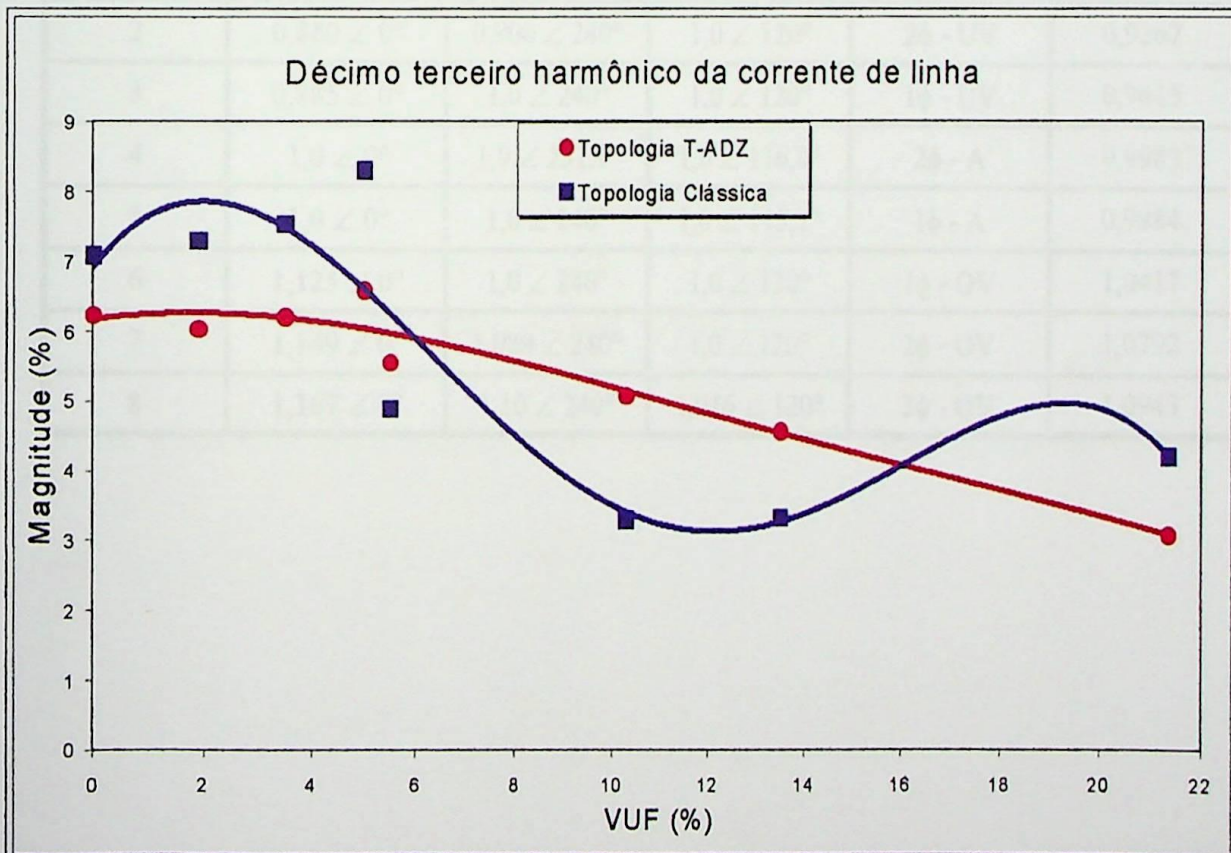


Figura 5.6 – Décimo Terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

5.2.2 - Desequilíbrios de Tensão com VUF Constante

Da mesma forma, a fim de se verificar o comportamento do conversor de 12 pulsos frente a diferentes tipos de desequilíbrios de tensão foram adotados os casos das tabelas 5.2 e 5.3, a seguir. Estes foram adotados considerando-se o valor do fator de desequilíbrio de tensão igual a 4 e 6 %, respectivamente, e que foram utilizados por Lee [Le98], mencionado no capítulo II.

Os casos indicados nas tabelas 5.2 e 5.3 foram simulados em EMTP, utilizando-se os modelos dos conversores de 12 pulsos apresentados no capítulo anterior. A partir do espectro harmônico da corrente de entrada do conversor, foram obtidas as figuras 5.7 a 5.12, geradas em Excel.

Tabela 5.2 - Tensões fase-neutro para VUF de 4%.

Caso	Tensões da Rede de Alimentação			Causa do Desequilíbrio	Tensão de Seqüência Positiva
	\dot{V}_{AN}	\dot{V}_{BN}	\dot{V}_{CN}		
1	0,866 $\angle 0^\circ$	0,887 $\angle 240^\circ$	0,984 $\angle 120^\circ$	3 ϕ - UV	0,9124
2	0,880 $\angle 0^\circ$	0,900 $\angle 240^\circ$	1,0 $\angle 120^\circ$	2 ϕ - UV	0,9267
3	0,885 $\angle 0^\circ$	1,0 $\angle 240^\circ$	1,0 $\angle 120^\circ$	1 ϕ - UV	0,9615
4	1,0 $\angle 0^\circ$	1,0 $\angle 231,9^\circ$	1,0 $\angle 116,0^\circ$	2 ϕ - A	0,9983
5	1,0 $\angle 0^\circ$	1,0 $\angle 240^\circ$	1,0 $\angle 113,1^\circ$	1 ϕ - A	0,9984
6	1,125 $\angle 0^\circ$	1,0 $\angle 240^\circ$	1,0 $\angle 120^\circ$	1 ϕ - OV	1,0417
7	1,149 $\angle 0^\circ$	1,089 $\angle 240^\circ$	1,0 $\angle 120^\circ$	2 ϕ - OV	1,0792
8	1,167 $\angle 0^\circ$	1,10 $\angle 240^\circ$	1,016 $\angle 120^\circ$	3 ϕ - OV	1,0943

Tabela 5.3 - Tensões fase-neutro para um VUF de 6%.

Caso	Tensões da Rede de Alimentação			Causa do Desequilíbrio	Tensão de Sequência Positiva
	\dot{V}_{AN}	\dot{V}_{BN}	\dot{V}_{CN}		
1	0,813 $\angle 0^\circ$	0,844 $\angle 240^\circ$	0,984 $\angle 120^\circ$	3 ϕ - UV	0,8802
2	0,827 $\angle 0^\circ$	0,855 $\angle 240^\circ$	1 $\angle 120^\circ$	2 ϕ - UV	0,8940
3	0,829 $\angle 0^\circ$	1 $\angle 240^\circ$	1 $\angle 120^\circ$	1 ϕ - UV	0,9434
4	1 $\angle 0^\circ$	1 $\angle 227,7^\circ$	1 $\angle 113,9^\circ$	2 ϕ - A	0,9962
5	1 $\angle 0^\circ$	1 $\angle 240^\circ$	1 $\angle 109,7^\circ$	1 ϕ - A	0,9964
6	1,191 $\angle 0^\circ$	1 $\angle 240^\circ$	1 $\angle 120^\circ$	1 ϕ - OV	1,0638
7	1,232 $\angle 0^\circ$	1,139 $\angle 240^\circ$	1 $\angle 120^\circ$	2 ϕ - OV	1,1237
8	1,252 $\angle 0^\circ$	1,151 $\angle 240^\circ$	1,016 $\angle 120^\circ$	3 ϕ - OV	1,1395

onde:

- ❖ 1 ϕ - UV → queda de tensão monofásica;
- ❖ 2 ϕ - UV → queda de tensão em duas fases;
- ❖ 3 ϕ - UV → queda de tensão trifásica;
- ❖ 1 ϕ - OV → elevação de tensão em uma fase;
- ❖ 2 ϕ - OV → elevação de tensão em duas fases;
- ❖ 3 ϕ - OV → elevação de tensão nas três fases;
- ❖ 1 ϕ - A → defasamento desigual de um fase;
- ❖ 2 ϕ - A → defasamento desigual de duas fases.

A partir dos casos indicados nas tabelas 5.2 e 5.3, foram obtidas as figuras a seguir.

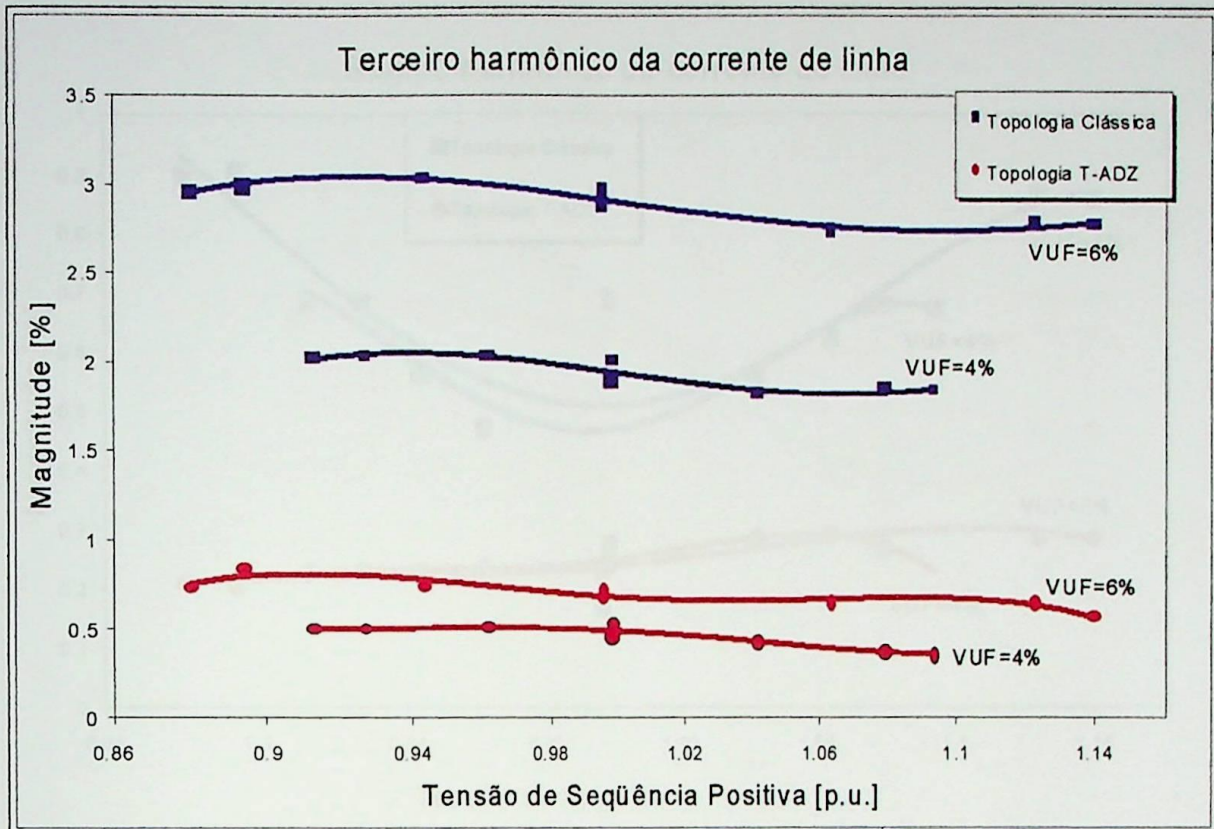


Figura 5.7 - Terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

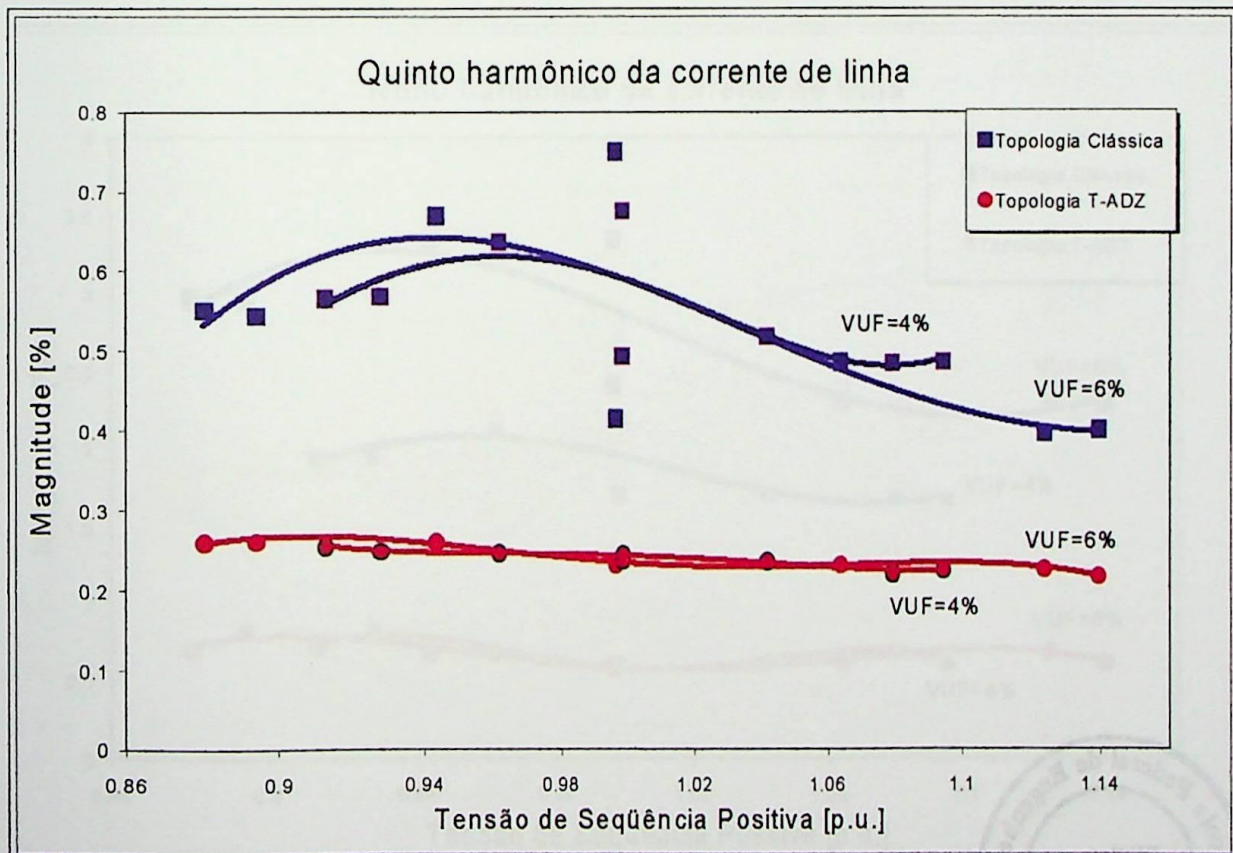


Figura 5.8 - Quinto harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

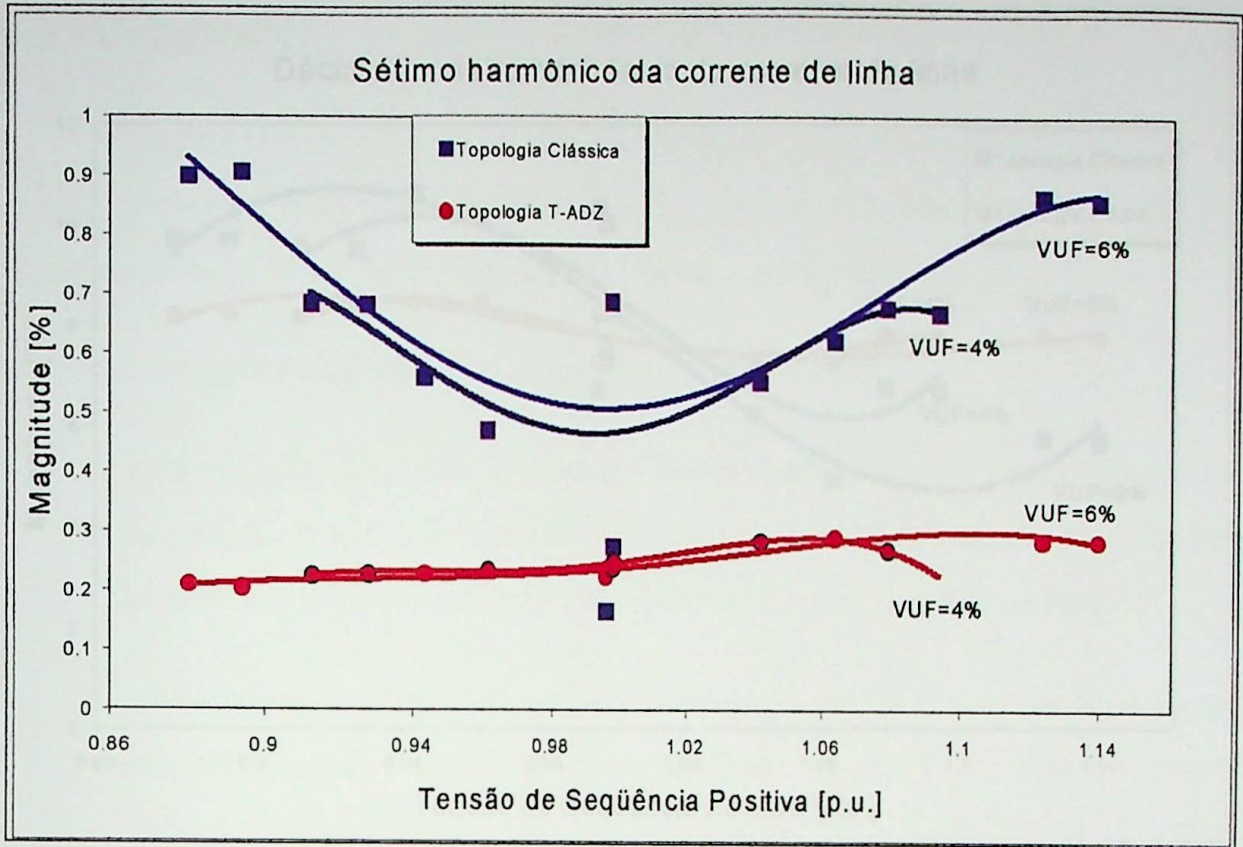


Figura 5.9 - Sétimo harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

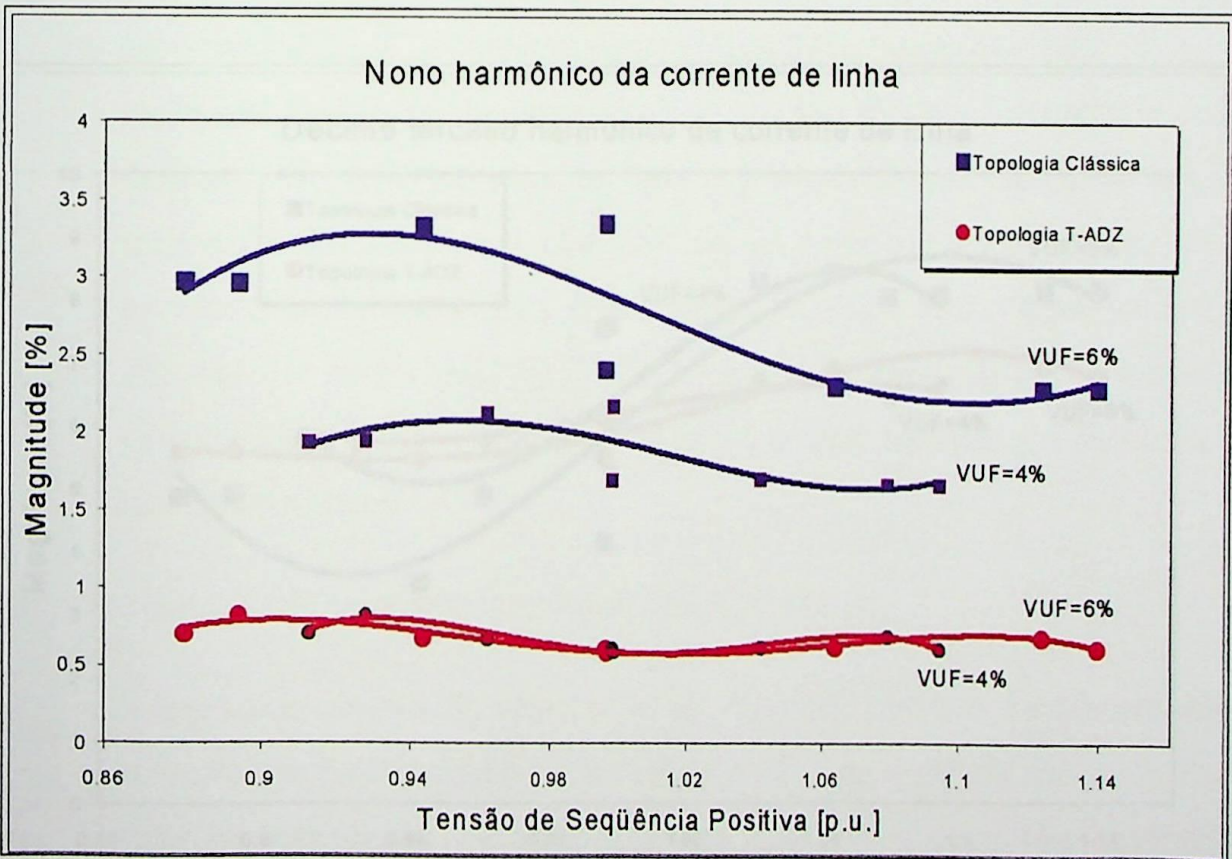


Figura 5.10 - Nono harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

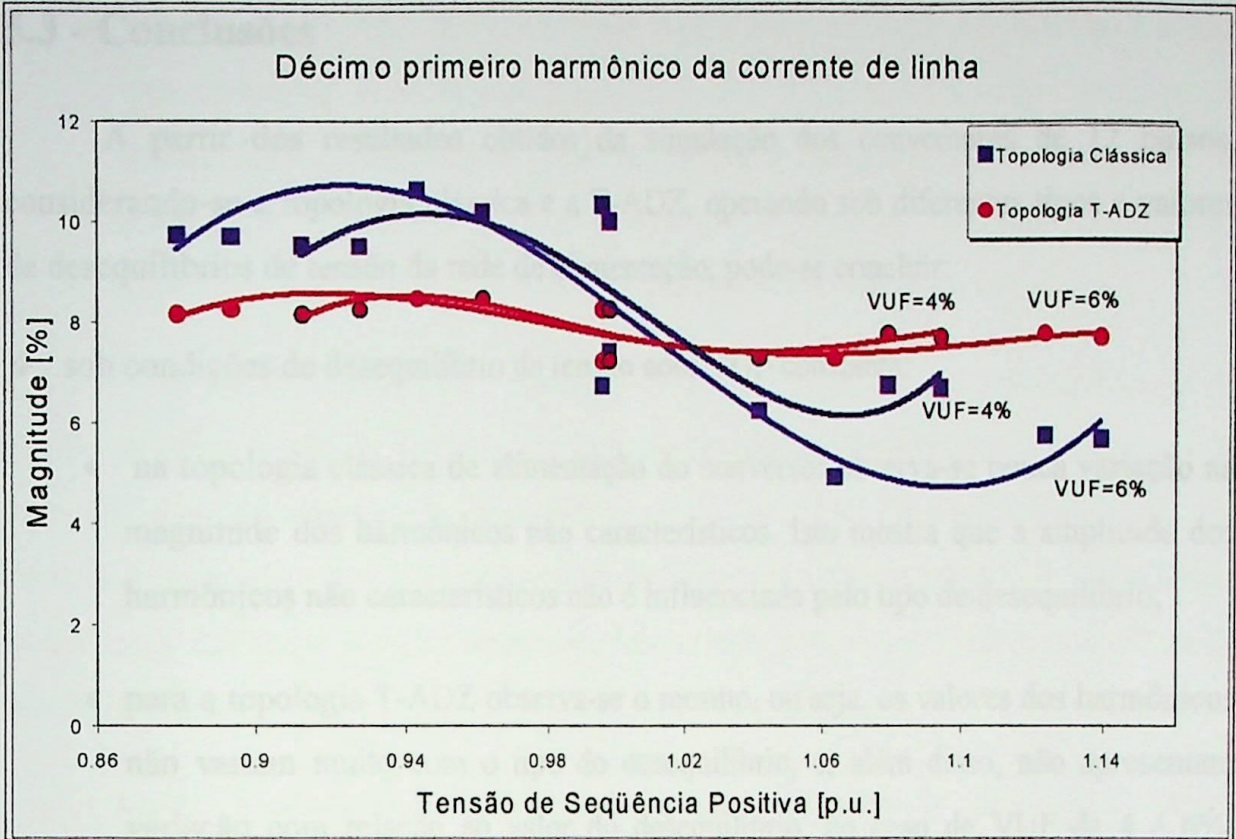


Figura 5.11 - Décimo primeiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

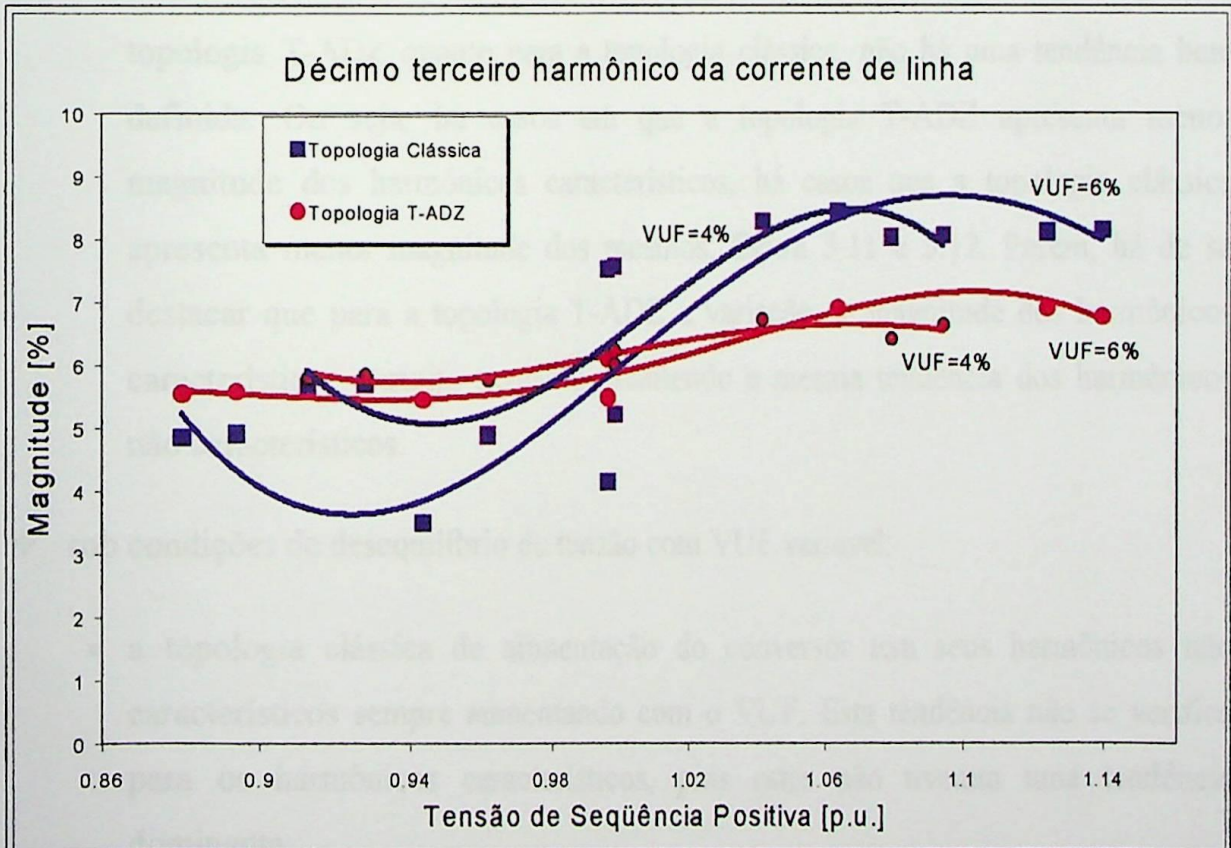


Figura 5.12 - Décimo terceiro harmônico da corrente de linha, topologias clássica e T-ADZ.

5.3 - Conclusões

A partir dos resultados obtidos da simulação dos conversores de 12 pulsos, considerando-se a topologia clássica e a T-ADZ, operando sob diferentes tipos e valores de desequilíbrios de tensão da rede de alimentação, pode-se concluir:

❖ sob condições de desequilíbrio de tensão com VUF constante:

- na topologia clássica de alimentação do conversor observa-se pouca variação na magnitude dos harmônicos não característicos. Isto mostra que a amplitude dos harmônicos não característicos não é influenciada pelo tipo de desequilíbrio;
- para a topologia T-ADZ observa-se o mesmo, ou seja, os valores dos harmônicos não variam muito com o tipo do desequilíbrio, e, além disso, não apresentam variação com relação ao valor do desequilíbrio, no caso de VUF de 4 e 6%, conforme figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10;
- com relação aos harmônicos característicos, observa-se que tanto para a topologia T-ADZ quanto para a topologia clássica, não há uma tendência bem definida. Ou seja, há casos em que a topologia T-ADZ apresenta menor magnitude dos harmônicos característicos, há casos que a topologia clássica apresenta menor magnitude dos mesmos, figura 5.11 e 5.12. Porém, há de se destacar que para a topologia T-ADZ a variação da magnitude dos harmônicos característicos é muito pequena, mantendo a mesma tendência dos harmônicos não característicos.

❖ sob condições de desequilíbrio de tensão com VUF variável:

- a topologia clássica de alimentação do conversor tem seus harmônicos não característicos sempre aumentando com o VUF. Esta tendência não se verifica para os harmônicos característicos, pois estes não tiveram uma tendência dominante;

- a topologia T-ADZ apresenta uma significativa redução dos harmônicos não característicos, conforme as figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, enquanto que para os harmônicos característicos tanto pode haver redução quando aumento da magnitude, figura 5.5 e 5.6. Porém, os harmônicos característicos já são esperados e já se tem soluções bem consolidadas no mercado.

Desta forma, tem-se que a aplicação do T-ADZ na correção de desequilíbrios de tensão na alimentação de sistemas conversores permite a mitigação dos harmônicos não característicos da corrente de linha, independente do valor e do tipo do desequilíbrio. No caso mais específico dos harmônicos homopolares, a redução da amplitude harmônica é ainda mais relevante e está diretamente relacionada com o valor do desequilíbrio de tensão associado.

Assim sendo, chega-se a conclusão que a utilização do T-ADZ reduz satisfatoriamente o conteúdo dos harmônicos não característicos da corrente de linha, levando o sistema conversor a se comportar como esperado, ou seja, gerando somente harmônicos característicos. E, sendo assim, a utilização de tal equipamento promove uma melhora relevante na qualidade da energia elétrica da rede.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As profundas transformações pelas quais o setor elétrico vem passando têm levado a uma busca incessante não somente pela disponibilidade de energia elétrica, mas também por uma energia elétrica de melhor qualidade. Dentre os diversos fatores envolvidos nesta questão, muitas vezes com interesses conflitantes, encontram-se as empresas de energia elétrica, os consumidores em geral, os fabricantes de equipamentos e o órgão regulador, bem como, mais recentemente, os agentes de comercialização.

Vale lembrar que esta temática engloba, atualmente, a discussão de novos conceitos e novas definições, a implantação de novas normalizações, a implementação de novos protocolos de medições, a compreensão de efeitos perniciosos em instalações e equipamentos e, indubitavelmente, a busca incessante por novas soluções. E, dentre os problemas associados à QEE, tem-se os desequilíbrios de tensão e os harmônicos.

Inserida neste contexto e a fim de atender esta última necessidade, esta Dissertação de Mestrado apresenta a implementação computacional de uma nova alternativa para se mitigar, inicialmente, os desequilíbrios de tensão na rede elétrica. Ademais, face à extensão da aplicação desta alternativa à alimentação de sistemas conversores, tem-se, como resultado final, a mitigação dos harmônicos não característicos produzidos por estes sistemas quando alimentados com tensões desequilibradas. Esta nova alternativa, denominada T-ADZ, é baseada, fundamentalmente, num dispositivo eletromagnético, um transformador especial denominado ADZ e na sua aplicação à correção de desequilíbrios de tensão, denominada LDUC.

Nesta implementação foi utilizada o pacote computacional EMTP, amplamente difundido e conhecido no meio técnico-científico, que forneceu subsídios para que uma

série de análises fossem conduzidas a fim de mostrar a potencial aplicação desta nova alternativa. Neste sentido, o trabalho concentrou-se na implementação de um modelo de um conversor de potência de 12 pulsos, alimentado com um transformador utilizando uma topologia convencional, e na implementação do mesmo conversor, contudo alimentado através do transformador T-ADZ.

Conforme foi demonstrado no capítulo 3, para obtenção dos parâmetros do T-ADZ foi utilizada, como ponto de partida, a concepção matemática da aplicação do ADZ na compensação de desequilíbrios e de quedas de tensão, denominado LDUC. Contudo, face as novas características do T-ADZ, destaca-se a necessidade de um procedimento iterativo para o cálculo de seus parâmetros. Este procedimento, cujo diagrama está disponível no Anexo I, foi implementado com o pacote computacional Matlab.

Assim sendo, esta dissertação apresentou o modelo e a implementação computacional da topologia T-ADZ, a qual é capaz de mitigar os harmônicos não característicos produzidos por conversores estáticos alimentados com tensões desequilibradas. E, a partir das simulações conduzidas no EMTP, utilizando-se as topologias T-ADZ em comparação com a topologia clássica de alimentação de conversores estáticos de 12 pulsos, sob desequilíbrios de tensão de diferentes origens e intensidade, observa-se:

- que a implementação computacional do T-ADZ foi bem sucedida;
- a viabilidade técnica do T-ADZ, fato este que pode ser comprovado a partir dos resultados obtidos no capítulo IV na simulação dos casos apresentados na tabela 4.1;
- a diminuição e a equalização dos harmônicos não característicos gerados pelo conversor de potência, estando o mesmo conectado a uma rede de alimentação desequilibrada, o que pode ser comprovado dos resultados obtidos;
- a potencial aplicação desta solução, o T-ADZ, para alimentar cargas do tipo motor de indução, seja em redes de distribuição em geral, onde estas cargas

estão presentes, seja em redes de distribuição industriais, onde, de acordo com o processo, esta é uma carga típica;

- a constatação anterior se dá pelo fato de que a diminuição dos harmônicos não característicos ocorreu devido, primeiramente, à mitigação do desequilíbrio;
- a geração harmônica não apresenta variação significativa em função do tipo de desequilíbrio de tensão. Contudo, esta se mostra extremamente sensível ao grau do desequilíbrio de tensão (VUF);
- na comparação entre as topologias T-ADZ e clássica, observa-se que na primeira tem-se uma melhora significativa na qualidade da tensão retificada, cujo *ripple* é menor, e uma redução na amplitude dos harmônicos não característicos gerados pelo conversor, principalmente dos homopolares.

Logo, verifica-se que o objetivo deste trabalho foi plenamente alcançado, constatação esta que é embasada nos resultados obtidos e que constituíram na base de todas as análises efetuadas ao longo do mesmo.

Mister se faz reconhecer que o tema Desequilíbrios de Tensão e Harmônicos possuem uma importância muito grande dentro do universo da Qualidade da Energia Elétrica, devido a sua interface com os demais fenômenos, suas causas, seus efeitos perniciosos e soluções que ainda estão por vir. Neste sentido, esta dissertação apresenta as seguintes sugestões para investigações futuras:

- o desenvolvimento e a implementação de um protótipo do T-ADZ;
- o desenvolvimento de um sistema eletrônico de comutação de tapes sob carga, a ser implementado no T-ADZ;
- a implementação do T-ADZ associado a um conversor de potência controlado, que contemple disparo não equidistante, implementado por Ngadui [Ng97] Desta maneira, o T-ADZ será utilizado como um ajuste “grosso” e o disparo não equidistante como ajuste “fino” na correção do desequilíbrio e dos harmônicos não característicos gerados pelo conversor;

- a análise do T-ADZ sob condições dinâmicas;
- a análise de outras topologias utilizadas na alimentação de conversores de potência;
- a análise da implementação da associação série/paralelo utilizando a topologia T-ADZ;
- a verificação da sensibilidade desta solução frente à ressonância gerada pelos harmônicos não característicos;
- a análise da restrição do indutor de alisamento (custo) devido à correção simultânea AC/CC;
- a análise da aplicação da topologia T-ADZ na alimentação de motores C.A.;
- a análise da aplicação da topologia T-ADZ na alimentação de motores C.C.

Por fim, apresenta-se a seguir, os trabalhos publicados resultantes desta Dissertação:

- Paulillo G., Abreu, J.P.G., Guimarães, C.A.M. and **Oliveira, R.A.**, “A Power Converter Transformer”, IEEE Induscon’2000, Porto Alegre, RS – Brazil, November, 2000.
- Paulillo, G., Abreu, J.P.G., Guimarães, C.A.M. e **Oliveira, R.A.**, “T-ADZ - A Novel Converter Transformer”, IEEE ICHQP’2000 - International Conference on Harmonics and Power of Quality, Orlando, USA , October, 2000;
- Paulillo G., Abreu, J.P.G., Guimarães, C.A.M. and **Oliveira, R.A.**, “Reducing Harmonics in Multiconverter Systems under Unbalanced Voltage Supply – A Novel Transformer Topology”, Proceedings of the IEEE Summer Meeting 2000, Seattle, WA – USA, July, 2000.
- Paulillo, G., Abreu, J.P.G., Guimarães, C.A.M. e **Oliveira, R.A.**, “A Power Converter Autotransformer”, Proceedings of the IEEE ICHQP’98 -

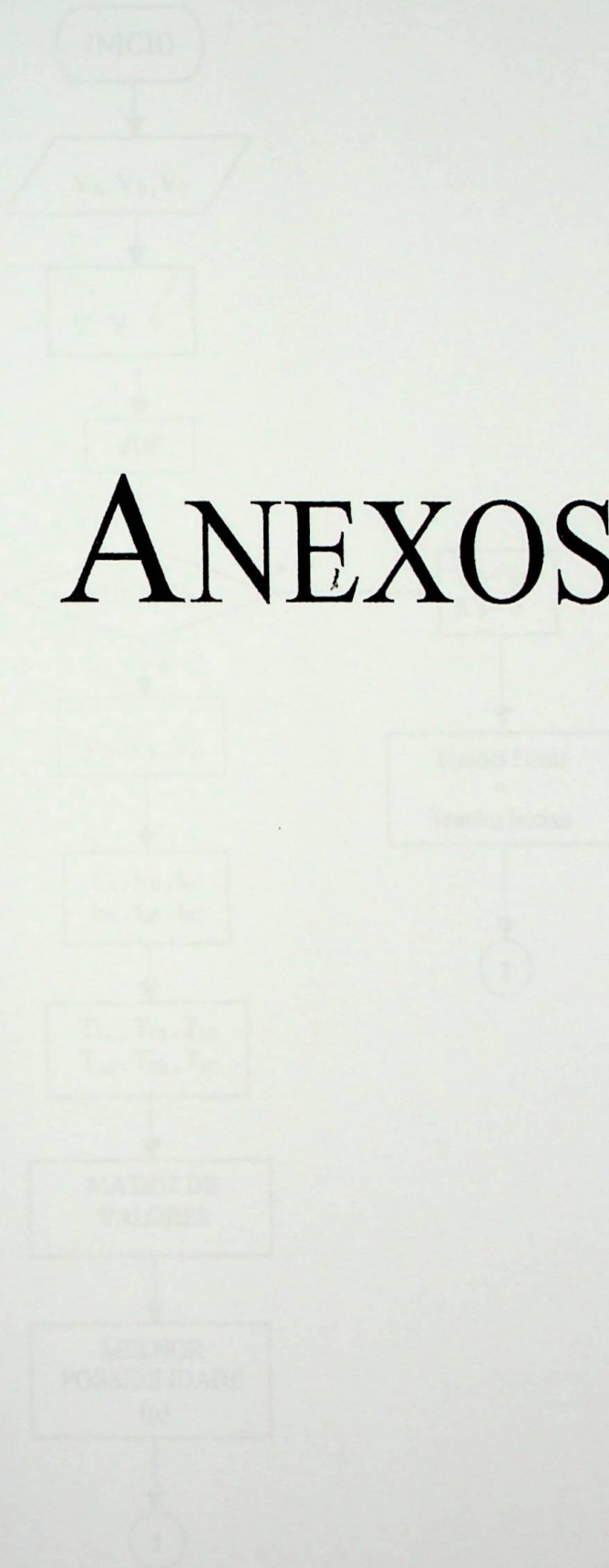
International Conference on Harmonics and Quality of Power, Greece,
October, 1998.

ANEXOS

ANEXO I

Fluxograma de Cálculo dos Tipos e Polaridades do T-ADZ

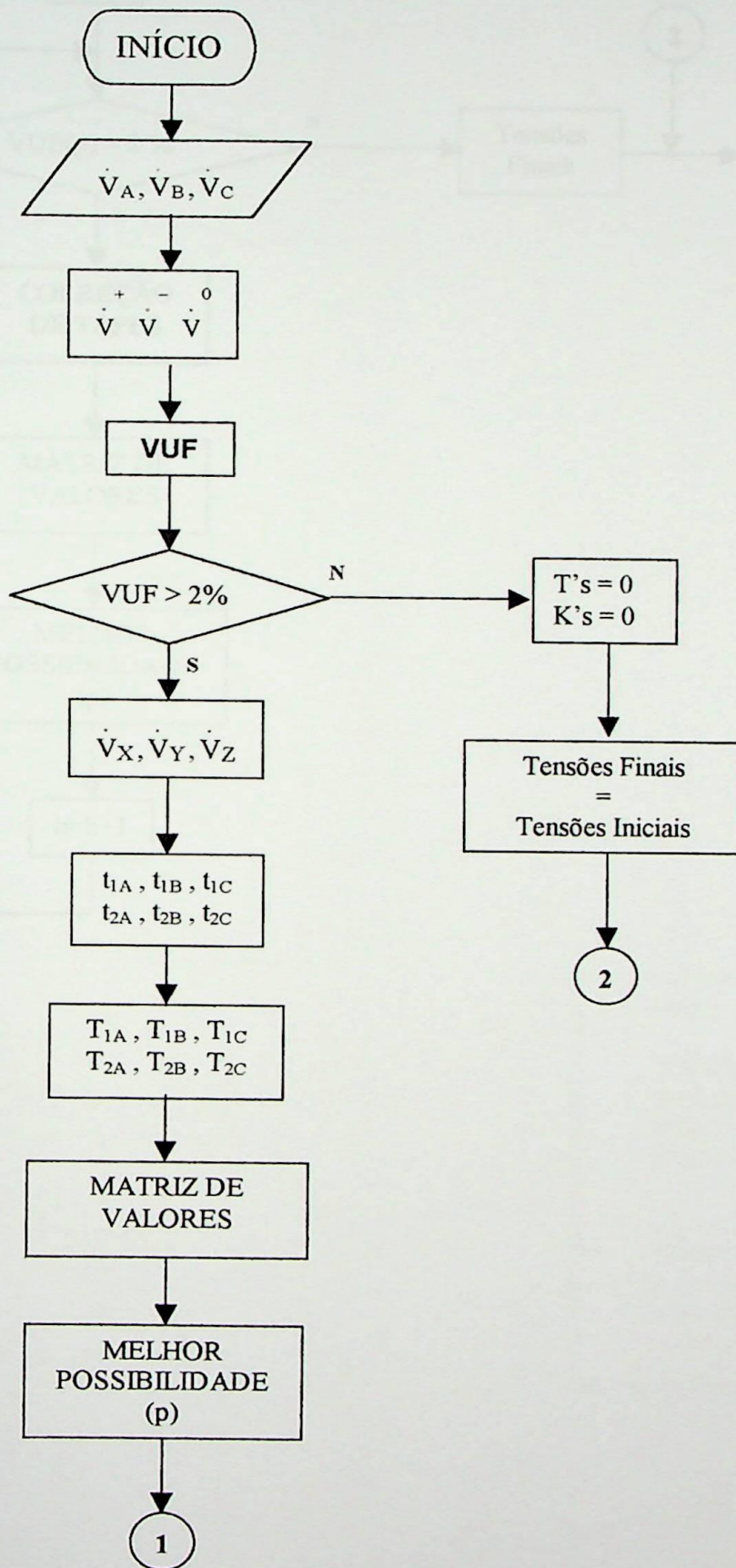
II - Programa Principal:



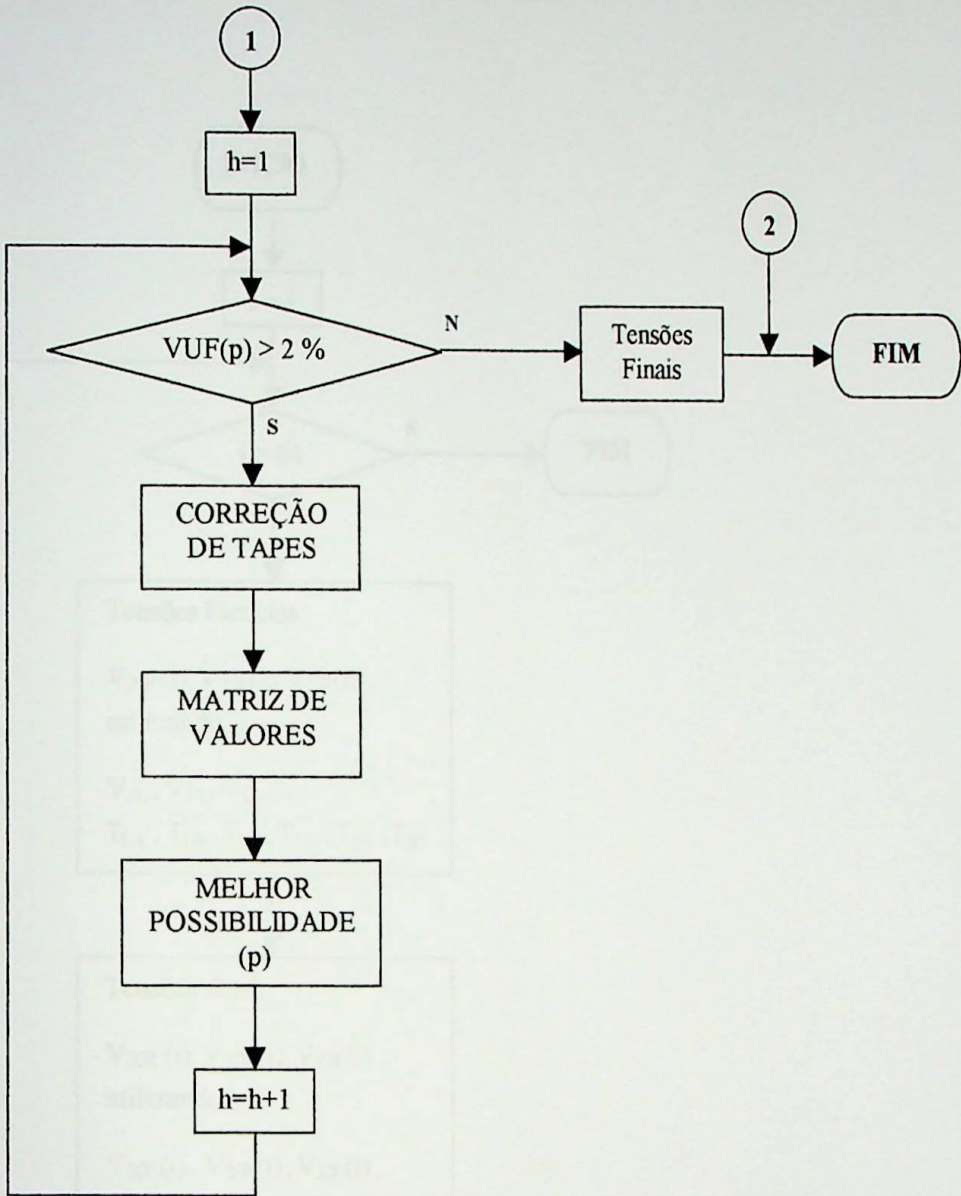
ANEXO I

Fluxograma de Cálculo dos Tapes e Polaridades do T-ADZ

I.1 - Programa Principal:



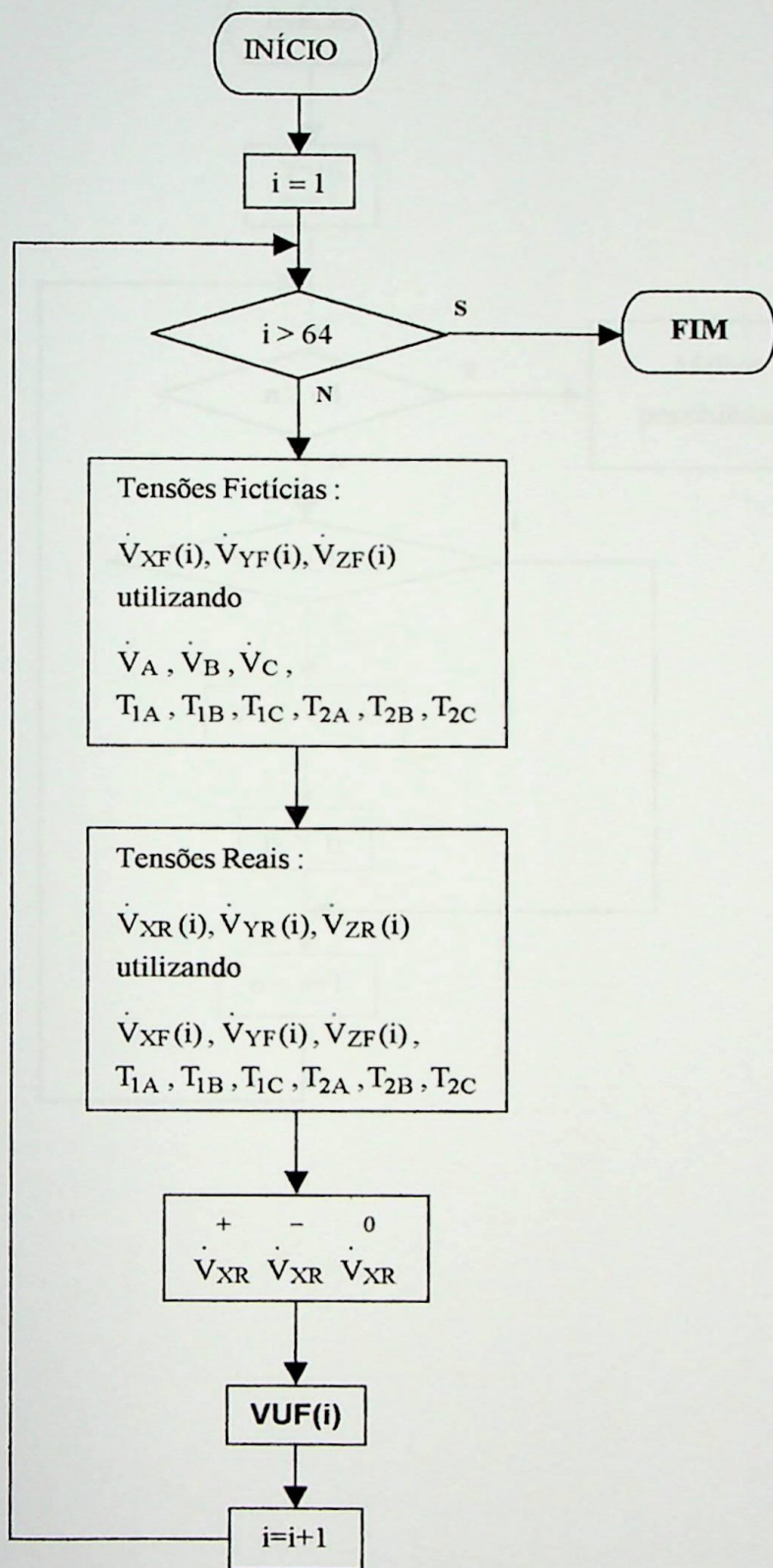
1.2 Sub-Rotina Matriz de Valores:



Legenda

- Tensões Finais: são as tensões que representam cada bobina em todas as posições do T-ADZ.
- Tensões Iniciais: são as tensões que possuem apenas um bobina, com sentido em bobinas próprias.

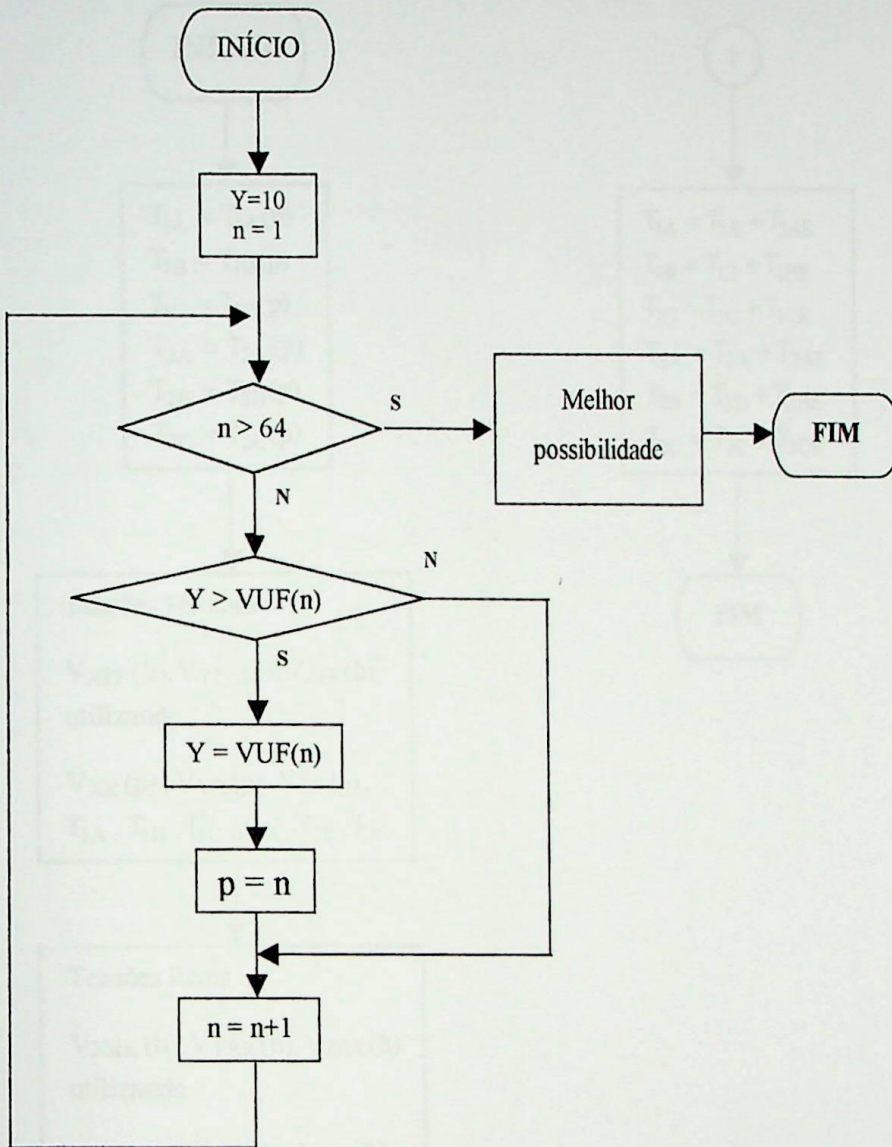
I.2 Sub-Rotina Matriz de Valores:



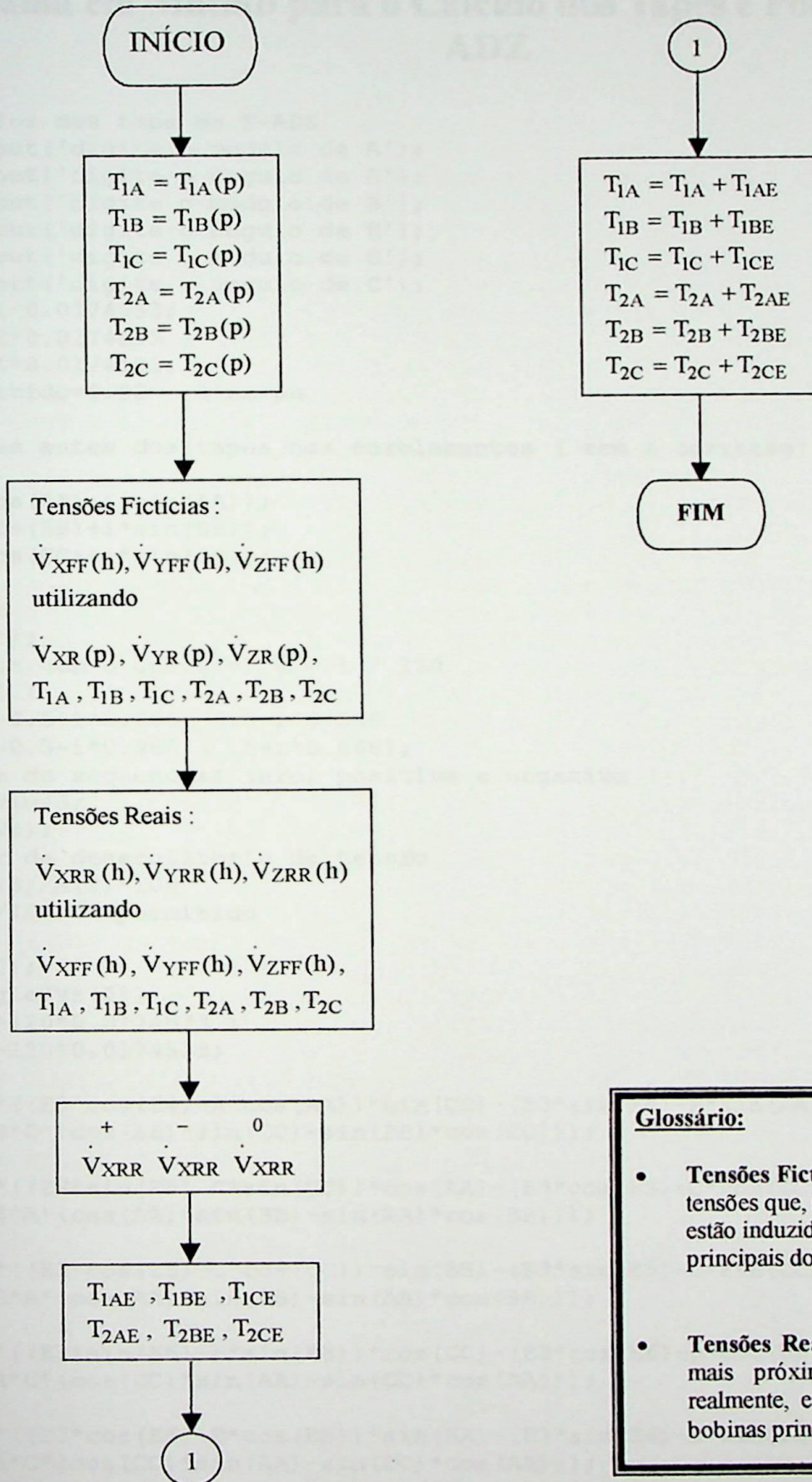
Glossário:

- **Tensões Fictícias:** são as tensões que, supostamente, estão induzidas nas bobinas principais do T-ADZ;
- **Tensões Reais:** são as tensões mais próximas àquelas que, realmente, estão induzidas nas bobinas principais

I.3 - Sub-Rotina Melhor Possibilidade (P):



I.4 - Sub-Rotina Correção de Tapes:



Glossário:

- **Tensões Fictícias:** são as tensões que, supostamente, estão induzidas nas bobinas principais do T-ADZ;
- **Tensões Reais:** são as tensões mais próximas àquelas que, realmente, estão induzidas nas bobinas principais

ANEXO II

Programa em Matlab para o Cálculo dos Tapes e Polaridades do T-ADZ

```

clear
% Cálculos dos taps do T-ADZ
A =input('digite o modulo de A');
AA1 =input('digite o angulo de A');
B =input('digite o modulo de B');
BB1 =input('digite o angulo de B');
C =input('digite o modulo de C');
CC1 =input('digite o angulo de C');
AA =AA1*0.0174533;
BB =BB1*0.0174533 ;
CC =CC1*0.0174533;
vufpermitido=0.02 % em pu

% tensoes antes dos tapes nos enrolamentos ( sem a correção)

va=A*[cos(AA)+i*sin(AA)];
vb=B*[cos(BB)+i*sin(BB)];
vc=C*[cos(CC)+i*sin(CC)];
Vin=[va
      vb
      vc];
% Matriz com o operador a = 1 / 120
A1=[1 1 1
     1 -0.5+i*0.866 -0.5-i*0.866
     1 -0.5-i*0.866 -0.5+i*0.866];
% Vetor de sequencias zero, positiva e negativa
Vs=A1*Vin/3;
M=abs(Vs);
% fator de desequilibrio de tensões
VUFi=M(3)/M(2)*100
if VUFi/100>vufpermitido

E3 =M(2);
E4 =angle(Vs(2))
E5 =E4+120*0.0174533 ;
E6 =E4-120*0.0174533;
%
T1B =C*((E3*cos(E4)-A*cos(AA))*sin(CC)-(E3*sin(E4)-A*sin(AA))*cos(CC))/...
      (B*C*(cos(BB)*sin(CC)-sin(BB)*cos(CC)));
%
T2B =A*((E3*sin(E5)-C*sin(CC))*cos(AA)-(E3*cos(E5)-C*cos(CC))*sin(AA))/...
      (B*A*(cos(AA)*sin(BB)-sin(AA)*cos(BB)));
%
T1A =B*((E3*cos(E5)-C*cos(CC))*sin(BB)-(E3*sin(E5)-C*sin(CC))*cos(BB))/...
      (B*A*(cos(AA)*sin(BB)-sin(AA)*cos(BB)));
%
T2A =C*((E3*sin(E6)-B*sin(BB))*cos(CC)-(E3*cos(E6)-B*cos(BB))*sin(CC))/...
      (A*C*(cos(CC)*sin(AA)-sin(CC)*cos(AA)));
%
T1C =A*((E3*cos(E6)-B*cos(BB))*sin(AA)-(E3*sin(E6)-B*sin(BB))*cos(AA))/...
      (A*C*(cos(CC)*sin(AA)-sin(CC)*cos(AA)));
T2C =B*((E3*sin(E4)-A*sin(AA))*cos(BB)-(E3*cos(E4)-A*cos(AA))*sin(BB))/...
      (B*C*(cos(BB)*sin(CC)-sin(BB)*cos(CC)));

```



```

t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,1) t2b(1,2) t1c(1,1) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,1) t2b(1,2) t1c(1,1) t2c(1,2)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,1) t2b(1,2) t1c(1,2) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,1) t2b(1,2) t1c(1,2) t2c(1,2)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,1) t1c(1,1) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,1) t1c(1,1) t2c(1,2)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,1) t1c(1,2) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,1) t1c(1,2) t2c(1,2)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,1) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,1) t2c(1,2)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,2) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,2) t2c(1,2)];

for j=1:64
    Val=va+combtap(j,3)*vb+combtap(j,6)*vc;
    Vb1=vb+combtap(j,5)*vc+combtap(j,2)*va;
    Vc1=vc+combtap(j,1)*va+combtap(j,4)*vb;

    Va=va+combtap(j,3)*Vb1+combtap(j,6)*Vc1;
    Vb=vb+combtap(j,5)*Vc1+combtap(j,2)*Val;
    Vc=vc+combtap(j,1)*Val+combtap(j,4)*Vb1;

    Vin=[Va
         Vb
         Vc];
    % Vetor de sequencias zero, positiva e negativa
    Vs=1/3*A1*Vin;
    M=abs(Vs);
    % fator de desequilibrio de tensões
    VUF(j)=M(3)/M(2);
end

y=10;
for i=1:64
    if y>VUF(i)
        y=VUF(i);
        p=i;
    end
end

VUFerrado=VUF(p)*100
Val2=va+combtap(p,3)*vb+combtap(p,6)*vc;
Vb12=vb+combtap(p,5)*vc+combtap(p,2)*va;
Vc12=vc+combtap(p,1)*va+combtap(p,4)*vb;

Vaant=va+combtap(p,3)*Vb12+combtap(p,6)*Vc12;
Vbant=vb+combtap(p,5)*Vc12+combtap(p,2)*Val2;
Vcant=vc+combtap(p,1)*Val2+combtap(p,4)*Vb12;

h=1;
while VUF(p)>vufpermitido

T1A=combtap(p,1);
T2A=combtap(p,2);
T1B=combtap(p,3);
T2B=combtap(p,4);
T1C=combtap(p,5);
T2C=combtap(p,6);
clear combtap

Va=va+T1B*vb+T2C*vc;

```

```

Vb=vb+T1C*vc+T2A*va;
Vc=vc+T1A*va+T2B*vb;

va1=va+T1B*Vb+T2C*Vc;
vb1=vb+T1C*Vc+T2A*Va;
vc1=vc+T1A*Va+T2B*Vb;
Vin3=[va1
      vb1
      vc1];
% Vetor de sequencias zero, positiva e negativa
Vs3=1/3*A1*Vin3;
M1=abs(Vs3);

E13 =M1(2);
E14 =angle(Vs3(2));
E15 =E14+120*0.0174533 ;
E16 =E14-120*0.0174533;

vv=abs([va1 vb1 vc1]);
aa=angle([va1 vb1 vc1]);

%
T1Be =vv(3)*((E13*cos(E14)-vv(1)*cos(aa(1)))*sin(aa(3))-(E13*sin(E14)-
vv(1)*sin(aa(1)))*cos(aa(3)))/...
      (vv(2)*vv(3)*(cos(aa(2))*sin(aa(3))-sin(aa(2))*cos(aa(3))));
%
T2Be =vv(1)*((E13*sin(E15)-vv(3)*sin(aa(3)))*cos(aa(1))-(E13*cos(E15)-
vv(3)*cos(aa(3)))*sin(aa(1)))/...
      (vv(2)*vv(1)*(cos(aa(1))*sin(aa(2))-sin(aa(1))*cos(aa(2))));
%
T1Ae =vv(2)*((E13*cos(E15)-vv(3)*cos(aa(3)))*sin(aa(2))-(E13*sin(E15)-
vv(3)*sin(aa(3)))*cos(aa(2)))/...
      (vv(2)*vv(1)*(cos(aa(1))*sin(aa(2))-sin(aa(1))*cos(aa(2))));
%
T2Ae =vv(3)*((E13*sin(E16)-vv(2)*sin(aa(2)))*cos(aa(3))-(E13*cos(E16)-
vv(2)*cos(aa(2)))*sin(aa(3)))/...
      (vv(1)*vv(3)*(cos(aa(3))*sin(aa(1))-sin(aa(3))*cos(aa(1))));
%
T1Ce =vv(1)*((E13*cos(E16)-vv(2)*cos(aa(2)))*sin(aa(1))-(E13*sin(E16)-
vv(2)*sin(aa(2)))*cos(aa(1)))/...
      (vv(1)*vv(3)*(cos(aa(3))*sin(aa(1))-sin(aa(3))*cos(aa(1))));
%
T2Ce =vv(2)*((E13*sin(E14)-vv(1)*sin(aa(1)))*cos(aa(2))-(E13*cos(E14)-
vv(1)*cos(aa(1)))*sin(aa(2)))/...
      (vv(2)*vv(3)*(cos(aa(2))*sin(aa(3))-sin(aa(2))*cos(aa(3))));

T1B =T1B+T1Be;
T2B =T2B+T2Be;
T1A =T1A+T1Ae;
T2A =T2A+T2Ae;
T1C =T1C+T1Ce;
T2C =T2C+T2Ce;
% inicio da escolha do melhor conjunto de tap's

t1a=[ceil(T1A*100) floor(T1A*100)]/100;
t1b=[ceil(T1B*100) floor(T1B*100)]/100;
t1c=[ceil(T1C*100) floor(T1C*100)]/100;
t2a=[ceil(T2A*100) floor(T2A*100)]/100;
t2b=[ceil(T2B*100) floor(T2B*100)]/100;
t2c=[ceil(T2C*100) floor(T2C*100)]/100;

```



```

t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,1) t2c(1,2)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,2) t2c(1,1)
t1a(1,2) t2a(1,2) t1b(1,2) t2b(1,2) t1c(1,2) t2c(1,2)];

for j=1:64
    Val=va+combtap(j,3)*vb+combtap(j,6)*vc;
    Vbl=vb+combtap(j,5)*vc+combtap(j,2)*va;
    Vcl=vc+combtap(j,1)*va+combtap(j,4)*vb;

    Va=va+combtap(j,3)*Vbl+combtap(j,6)*Vcl;
    Vb=vb+combtap(j,5)*Vcl+combtap(j,2)*Val;
    Vc=vc+combtap(j,1)*Val+combtap(j,4)*Vbl;
    Vin=[Va
         Vb
         Vc];
    % Vetor de sequencias zero, positiva e negativa
    Vs=1/3*A1*Vin;
    M=abs(Vs);
    % fator de desequilibrio de tensões
    VUF(j)=M(3)/M(2);
end
y=10;
for i=1:64
    if y>VUF(i)
        y=VUF(i);
        p=i;
    end
end
iteracao=h
h=h+1;
end
Val=va+combtap(p,3)*vb+combtap(p,6)*vc;
Vbl=vb+combtap(p,5)*vc+combtap(p,2)*va;
Vcl=vc+combtap(p,1)*va+combtap(p,4)*vb;

Vaf=va+combtap(p,3)*Vbl+combtap(p,6)*Vcl;
Vbf=vb+combtap(p,5)*Vcl+combtap(p,2)*Val;
Vcf=vc+combtap(p,1)*Val+combtap(p,4)*Vbl;

tensoes=abs([Vaant Vbant Vcant
             Vaf Vbf Vcf])
angulos=angle([Vaant Vbant Vcant
               Vaf Vbf Vcf])*180/pi
taps=([combtap(p,1) combtap(p,2)
       combtap(p,3) combtap(p,4)
       combtap(p,5) combtap(p,6)])*100
VUFf=VUF(p)*100

else
    "desequilibrio menor que vufpermitido"
    taps=([0 0
           0 0
           0 0])
end

```

ANEXO III

Estrutura Detalhada de Programação do EMTP

III.1 - Estrutura Geral do EMTP

Na criação de um arquivo EMTP, para um determinado circuito elétrico, a ordem da estrutura a seguir (conhecida como os cartões do EMTP) deve ser seguida impreterivelmente, sendo que alguns dos cartões podem ser omitidos caso não sejam necessários.

BEGIN NEW DATA CASE

Miscellaneous data cards and extensions

TACS HYBRID ou TACS STAND ALONE ou MODELS

BLANK cartão que termina todos os dados do TACS

Cartão para ramos lineares e não lineares, transformadores e linhas de transmissão

BLANK cartão que termina esse grupo

Cartão para chaves do sistema elétrico

BLANK cartão que termina todos os cartões de chaves

Cartão para fontes do sistema elétrico

BLANK cartão que termina todas as fontes

Cartão para fluxo de carga

BLANK cartão que termina todos os fluxos de cargas

Cartão para sobrepor condições iniciais

BLANK cartão que termina todas as condições iniciais.

Cartão para especificar variáveis de saída

BLANK cartão que termina com todas as variáveis de saída.

Cartão para especificar funções ponto a ponto

Cartão do modo de plotagem

BLANK cartão que termina com todos os modos de plotagem

BLANK

III.2 - Cartões para iniciar um novo “Data Case”.

Estão incluídos o cartão “*Begin New Data Case*”, cartões de pedidos especiais de vários tipos, e finalmente, o cartão “*Miscellaneous Data*” e suas extensões. Assim, como se segue:

a) *Miscellaneous Data Cards*

O primeiro cartão, que não seja de comentários, será reconhecido como um *floating point miscellaneous data card* e é obrigatório em todos os casos de transitórios. Tem o seguinte formato:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
E8.0								E8.0								E8.0								E8.0								E8.0								E8.0																																																	
DELTAT								TMAX								XOPT								COPT								EPSILIN								TOLMAT																																																	

Figura 1 – Formato do *Miscellaneous Data Cards*.

onde:

- **DELTAT** (col. 1-8): tamanho do passo de tempo da integração numérica (em segundos).
- **TMAX** (col. 9-16): o instante final de análise em segundos.
- **XOPT** (col. 17-24): valor que indica se o dado é uma indutância em mH ou reatância indutiva em ohms. Desta forma:
 - XOPT=0 indica indutâncias em milihenries;
 - XOPT>0 indica valores em ohms na frequência XOPT em hertz.
- **COPT** (col.25-32): valor que indica se o dado é uma capacitância em microfarads ou reatância capacitiva em micromhos. Assim:
 - COPT=0 indica capacitâncias em microfarads;
 - COPT>0 indica valores em micromhos na frequência COPT em hertz.
- **EPSILN** (col. 33-40): corresponde à tolerância que é usada para testar a singularidade da matriz de coeficientes reais e seu valor é próximo de zero.
- **TOLMAT** (col. 41-48): corresponde à tolerância que é usada para testar a singularidade da matriz complexa de admitâncias e seu valor é próximo de zero.

b) Integer Miscellaneous Card:

O cartão descrito anteriormente deve ser seguido pelo *integer miscellaneous card* que é mostrado a seguir:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
18								18								18								18								18								18								18								18																																	
IOUT								IPLLOT								IDOUBL								KSSOUT								MAXOUT								IPUN								MEMSAV								ICAT								NERERG								IPRSUP																	

Figura 2 – Formato do *Integer miscellaneous Card*.

Onde:

- **IOUT** (col. 1-8): indica a freqüência da saída impressa (LUNIT6) dentro do loop de integração, isto é, um valor 3 indica que cada terceiro passo será impresso. Um valor zero ou nulo é convertido em 1.
- **IPLLOT** (col. 9-16): indica a freqüência de amostragem e salvamento dos pontos da solução com o propósito de impressão posterior.
- **IDOUBL** (col.17-24): controla a saída LUNIT6 de uma tabela de conexões da rede. Um valor zero ou nulo suprime esta saída, e um valor unitário a produz.
- **KSSOUT** (col. 25-32): controla a impressão dos fasores de solução no regime permanente:
 - 0: sem impressão de saída;
 - 1: imprime a solução no regime permanente completa: fluxo nos ramos, fluxo nas chaves e injeção de fontes;
 - 2: imprime fluxo nas chaves e injeção de fontes;
 - 3: imprime fluxo nos ramos requisitados na coluna 80, fluxo nas chaves e injeção de fontes.
- **MAXOUT** (col. 33-40): controla a impressão do *extrema* na conclusão da simulação. Um valor zero ou nulo suprime esta saída.

- **IPUN** (col. 41-48): é usado para requisitar a inserção de um cartão extra para variar a frequência de impressão. Um valor -1 requisita o cartão, caso contrário zero ou nulo.
- **MEMSAV** (col. 49-56): controla o armazenamento da memória do EMTP em disco rígido no fim da simulação para uma posterior requisição “Start Again”. O valor 1 indica a requisição de salvamento, caso contrário digite zero ou nulo.
- **ICAT** (col. 57-64): deve ser deixado em branco se nenhum salvamento permanente de dados brutos de pontos de gráficos é desejado, caso contrário deve ter um valor positivo:
 - 1: salva os pontos e ignora qualquer “*batch mode plot cards*”;
 - 2: salva os pontos e considera qualquer “*batch mode plot cards*”.
- **NENERG** (col. 65-72): para simulações determinísticas deve ser deixado em branco ou zero, para data cases “STATISTIC” ou “SYSTEMATIC” este campo deve conter o número total de energizações.
- **IPRSUP** (col. 73-80): normalmente é deixado em branco, mas se for um valor positivo, será o controle de impressão de diagnóstico.

III.3 - Cartões que definem qualquer modelo TACS

O nome TACS é derivado de “Transient Analysis of Control Systems”, sendo ele utilizado para simular sistemas de controle dinâmico. Contém as seguintes características:

- Funções de transferência;
- Somadores;
- Operações lógicas;
- Operações algébricas;
- Limitadores, etc...

III.4 - Cartões para ramos lineares e não lineares, transformadores e linhas de transmissão;

a) Cartões para ramos R-L-C série

Estes cartões são utilizados para representar o seguinte tipo de ramo não acoplados e, é claro, vale qualquer combinação entre eles (entre R, L e C):

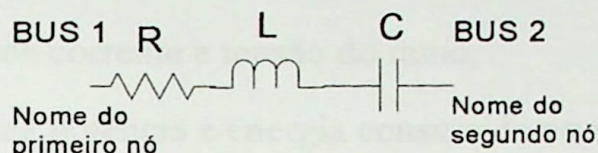


Figura 3 – Ramo RLC.

Formato do cartão:

1		2				3				4				5				6				7				8			
Nome Nós		Nós referência				R (ohm)	L (ohm ou wL)	C (ohm ou wC)																					
Bus1	Bus2	Bus3	Bus4																										
A6	A6	A6	A6					E6	E6	E6																			

Figura 4 – Formato do Cartão RLC.

Que deve ser preenchido da seguinte maneira:

- Digite, nas colunas 1-2, o número zero ou deixe em branco;
- especifique o nome dos nós dos terminais do ramo RLC, sendo que o nome deve ter no máximo seis caracteres alfanuméricos. Utilize os campos BUS1 e BUS2 das colunas 3-14. Um dos nós do ramo pode ser aterrado deixando o campo de seu nome em branco;
- pelo menos um dos valores R, L ou C deve ser diferente de zero;
- quando o ramo não possui R ou L então indique $R = 0$ ou $L = 0$, quando não possuir nenhum valor para C ($C = 0$), o programa entenderá $1/\omega C = 0$;

- os valores numéricos dos parâmetros R, L, C se encontram nas unidades estabelecidas pelas variáveis “XOPT” e “COPT” descritas anteriormente:
- opções de saída para plotagem:
 - 1 na coluna 80 indica corrente no ramo;
 - 2 na coluna 80 indica tensão do ramo;
 - 3 na coluna 80 indica corrente e tensão do ramo;
 - 4 na coluna 80 indica potência e energia consumida no ramo.

b) Cartão de Transformadores

Transformadores monofásicos com ‘n’ enrolamentos, são modelados no EMTP conforme a figura 5 a seguir. Onde cada enrolamento está associado a uma impedância, caracterizada por uma resistência R e uma indutância L. Todas as resistências e indutâncias podem ser zero exceto L1. A relação de transformação é sempre em relação ao primeiro enrolamento, ou seja, os enrolamentos 2, 3, ... , N terão suas relações de transformação em relação ao enrolamento 1.

Saturação e os efeitos da corrente de magnetização estão limitados ao primeiro enrolamento. Perdas no núcleo estão confinadas a resistência linear Rmag, a qual está em paralelo como o ramo de saturação.

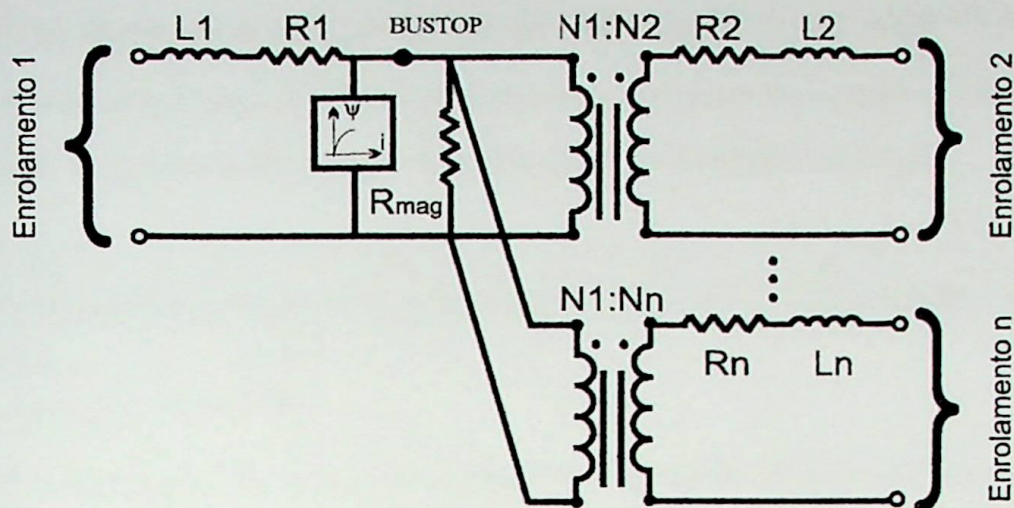


Figura 5 – Modelo de Transformador Monofásico para o EMTP.

Para se usar este modelo de transformador, a seguinte seqüência de cartões deve ser inserida.

b.1 - Cartão de requisição especial:

Este cartão indica que o próximo elemento do sistema a ser simulado é um transformador, como mostra a figura 6 que se segue .

		1		2		3		4		5		6		7		8																																																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Transformer				E6.2		E6.2		A6		E6.2																																																											
				i		flux		Bustop		Rmag																																																											

Figura 6 – Formato do cartão de requisição de um transformador Monofásico.

Onde:

- TRANSFORMER : palavra reservada para especificar que é um transformador;
- i e flux: par de corrente e fluxo que representa a indutância linear de magnetização do transformador;
- Bustop : nome interno do primeiro enrolamento usado para representar a ramo de magnetização;
- Rmag : resistência linear que representa as perdas no núcleo.

- VRAT → relação de tensão do enrolamento 'K' com o primeiro enrolamento.

III.5 - Cartões para chaves de redes elétricas, diodos e tiristores;

a) Chaves comuns:

São chaves para as quais a queda de tensão é zero quando fechadas, e a corrente é nula quando abertas. Estas chaves correspondem ao código *ITYPE* = 0 (col. 1 - 2 do cartão).

Um tipo de chave comum, que não seja diodo ou válvula, é o *MEASURING switch*, que são chaves que se encontram permanentemente fechadas por definição. Elas são usadas para a monitoração de corrente ou potência e energia em locais em que não haja outra forma de fazê-lo. Para isto deve-se digitar o nome *MEASURING* nas colunas 55-64 do cartão.

Observações :

- nenhuma chave é permitida entre duas fontes de tensão, ou entre uma fonte de tensão e o terra;
- se uma chave conectar uma fonte de tensão a uma fonte de corrente, então a fonte de corrente é ignorada sempre que a chave estiver fechada.
- as opções de sinais de saída obtém-se com os números abaixo na coluna 80:
 - 1: corrente;
 - 2: tensão;
 - 3: tensão e corrente;
 - 4: potência e energia.

b) Chaves controladas por TACS:

Esta chave tem seu STATUS controlado por sinais TACS e correspondem aos códigos ITYPE = 11, 12 ou 13 (col. 1-2 do cartão).

ITYPE = 11 : é usado para simular chaves que, enquanto seguem a simples regra de abertura/fechamento de um diodo standard, pode simultaneamente ser controlada por qualquer variável TACS indicada como:

- um sinal de GRID;
- um sinal OPEN/CLOSE sobreposto;
- ou ainda, uma combinação dos três modos acima.

b.1) Sinal TACS de GRID ou OPEN/CLOSE:

Se nada for especificado nestes campos, então a chave funciona como um diodo, ou seja, começa a conduzir quando a tensão direta em seus terminais se torna maior que a tensão mínima de ignição V_{ig} (default = 0), e cessa a condução assim que a corrente direta se torne menor que a mínima corrente de manutenção I_{HOLD} (default = 0).

Se o sinal GRID for especificado (col. 65-70), então a chave é uma válvula que segue as regras de abertura e fechamento do diodo, exceto que ao operação de condução, ou fechamento, só se realiza quando o sinal GRID se torna maior que zero.

Se o sinal OPEN/CLOSE for especificado (col. 71-76) as regras de operação do diodo ou da válvula são sobrepostas assim que o sinal se torne diferente de zero:

- se positivo, a chave se fecha imediatamente e permanece fechada enquanto o sinal for positivo;
- se negativo, a chave se abre imediatamente e permanece aberta enquanto o sinal for negativo;
- se zero, a chave retorna ao seu funcionamento normal de válvula ou diodo.

Para um atraso no início de qualquer função de fonte, deve-se digitar um valor positivo para TSTART (col. 61-70). Por definição, a função terá valor zero antes deste tempo e será igual à função $f(t-TSTART)$ para os demais tempos t maiores que o tempo inicial TSTART.

Para se anular uma fonte a partir de um determinado tempo, deve-se digitar este valor no campo de dados TSTOP (col. 71-80). Então, por definição, a função terá valor zero a partir deste tempo.

O campo de dados IV (col. 9-10) é usado para selecionar se a fonte é uma fonte de tensão ou de corrente. Para selecionar uma fonte de tensão deve-se deixar, este campo, em branco ou zero e, para selecionar uma fonte de corrente deve-se digitar um valor negativo neste campo, normalmente '-1' indica uma fonte de corrente.

A seguir encontra-se alguns tipos de fontes cujos tipos correspondem às colunas 1-2 do cartão de dados:

- tipo 11: função degrau que se inicia no primeiro passo de tempo. Seu valor no tempo zero é zero, e sua amplitude para os tempos positivos deve ser digitada nas colunas 11-20.
- tipo 14: função senoidal cujo valor de pico é a AMPLITUDE e a frequência é FREQUENC. A fase pode ser especificada tanto em ângulo como em tempo:

$A1 = 0$: $f(t) = AMPLITUDE * \cos (ANG)$ onde $ANG = 2 * \pi * FREQUENCY * (t + TIME-0)$ onde "TIME-0" é o ângulo de fase em graus;

$A1 > 0$: $f(t) = AMPLITUDE * \cos (ANG)$ onde $ANG = 2 * \pi * FREQUENCY * (t + TIME-0)$ onde "TIME-0" é o ângulo de fase em segundos.

III.7 - Cartões de "Load Flow";

Este cartão é usado para se colocar dados para a análise de fluxo de potência na rede elétrica. Porém, nesta tese não se utilizou tal análise e, desta forma, não será abordado.

1			2			3			4			5			6			7			8		
NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME	NOME
A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6	A6

Figura 11 – Formato do Cartão de variáveis selecionadas para a saída no programa.

Onde:

- NOME refere-se ao nome do nó ou do ponto do circuito do qual se deseja ter informações na saída do programa.

III.10 - Cartões para especificar fontes com funções ponto a ponto.

Quando se tem fontes de excitação especiais nas quais se quer definir a sua função ponto a ponto deve-se usar este cartão para tal. Porém nesta tese não se faz uso de tal recurso.

iii.11 – Informações Complementares

Os grupos de dados descritos acima devem ser sempre terminados, em seqüência, por uma linha em branco (cartão BLANK).

ANEXO IV

Modelo de um Programa em EMTP do T-ADZ com Conversor de 12 Pulsos

```

C INICIO
C PROGRAMA CONVERSOR DOZE PULSOS COM TRAF0 T-ADZ
C
BEGIN NEW DATA CASE
C DELTT<> TMAX ><XOPT ><COPT >
  1.E-6 30.E-3
C
C IOUT ><IPL0T ><ID0UBL> < ICAT >
  15000 50 1 1
C CARTAO DE TRANSFORMADORES
C
C T-ADZ
C < CODIGO > <PTS1><PTS2><NOIN><RMAG>
TRANSFORMER T1A 1.E3
C ISAT >< FLUXO >
  9999
C 9999 DEVE VIR NAS COLUNAS DE 13 A 16
C < NO1><NO2 > < R >< L >< RT >
01 T1PA .060 .010 100.
02T1AX12T1AX11 .003 .001 2.
03T2AX12T2AX11 .003 .001 9.
04 VASE NT .040 .010 100.0
05 VASD VBSD .040 .010 173.4
C
C ENROLAMENTO FASE B
C <CODIGO ><T.RE> <NOIN>
TRANSFORMER T1A T2B
C < NO1><NO2 > < R >< L >< RT >
01 T1PB .060 .010 100.
02T1BX11T1BX12 .003 .001 10.
03T2BX12T2BX11 .003 .001 2.
04 VBSE NT .040 .010 100.0
05 VBSD VCS D .040 .010 173.4
C
C ENROLAMENTO FASE C
C <CODIGO ><T.RE> <NOIN>
TRANSFORMER T1A T3C 1.E3
C < NO1><NO2 > < R >< L >< RT >
01 T1PC .060 .010 100.
02T1CX12T1CX11 .003 .001 9.
03T2CX11T2CX12 .003 .001 9.
04 VCSE NT .040 .010 100.
05 VCS D VAS D .040 .010 173.4
C
C FIM DOS TRAFOS
C
C RESISTENCIAS PARA A CONEXAO DOS ENROLAMENTOS PRIMARIOS DO T-ADZ
C <NO1 ><NO2 > < R >< L >< C >
00 VA1T2CX11 1.E-4
00T2CX12T1BX11 1.E-4
00T1BX12 T1PA 1.E-4
00 VB1T2AX11 1.E-4
00T2AX12T1CX11 1.E-4
00T1CX12 T1PB 1.E-4

```

```

00 VC1T2BX11          1.E-4
00T2BX12T1AX11      1.E-4
00T1AX12 T1PC       1.E-4
C
C CARTAO DE R, L, C'S.
C <NO1 ><NO2 >          < R >< L >< C >
00 CI2 ND            3.E0          1
00 NE PD            1.E-5
00 CI1 CI2          1.E3          3
00 CI1 CI2          200.
00 CI1 CI3          50.
00 PE ND            1.E5          2
00 PE CI1          1.E-4          1
C
C IMPEDANCIA DA REDE
C <no-1><no-2><ref1><ref2><Rohm><L-mH><C-uF>
00 VA1 VA            .01          1
00 VB1 VB            .01          1
00 VC1 VC            .01          1
C
C ***** AS RESISTENCIAS EM SERIE COM OS SEMI-CONDUTORES *****
C PRIMEIRA PONTE
C <no-1><no-2><ref1><ref2><Rohm><L-mH><C-uF>
00 PE1 PE            1.E-3
00 PE2 PE PE1 PE
00 PE3 PE PE1 PE
00 NE NE1 PE1 PE
00 NE NE2 PE1 PE
00 NE NE3 PE1 PE
C SEGUNDA PONTE
00 PD1 PD PE1 PE
00 PD2 PD PE1 PE
00 PD3 PD PE1 PE
00 ND ND1 PE1 PE
00 ND ND2 PE1 PE
00 ND ND3 PE1 PE
C
C ***** OS SNUBBERS *****
C <no-1><no-2><ref1><ref2><Rohm><L-mH><C-uF>
00 PE VASE          50.E0 1.E+1
00 PE VBSE PE VASE
00 PE VCSE PE VASE
00 NE VASE PE VASE
00 NE VBSE PE VASE
00 NE VCSE PE VASE
C
00 PD VASD PE VASE
00 PD VBSD PE VASE
00 PD VCSD PE VASE
00 ND VASD PE VASE
00 ND VBSD PE VASE
00 ND VCSD PE VASE
C
BLANK
C
C DIODO DA CONDICAO INICIAL DO INDUTOR DA CARGA
11 CI2 CI3
C
C PONTE DE DIODOS CONECTADA A ESTRELA
C <NO1 ><NO2 >
11 VASE PE1

```

Anexo IV – Modelo de um Programa em EMTP do T-ADZ com Conversor de 12 Pulsos

```

11 VBSE PE2
11 VCSE PE3
11 NE1 VASE
11 NE2 VBSE
11 NE3 VCSE
C
C PONTE DE DIODOS CONECTADA AO DELTA
C <NO1 ><NO2 >
11 VASD PD1
11 VBSD PD2
11 VCSD PD3
11 ND1 VASD
11 ND2 VBSD
11 ND3 VCSD
C
BLANK
C CARTAO DE FONTES
C <NOME><><AMPLITUD><FREGUENC><DEFASAGE> < TSTART >< TSTOP >
14 VA 50.81 60. 0.00 -1. 1.
14 VB 61.20 60. 240.00 -1. 1.
14 VC 57.74 60. 120.00 -1. 1.
C FIM DAS FONTES
BLANK
C CONDICAO INICIAL DO INDUTOR DA CARGA
C <NO1 ><NO2 ><VALOR I INICI>
03 CI1 CI2 52.0
C TENSOES DE SAIDA NO GRAFICO
C <VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR ><VAR >
VA VC VB VA2 VB2 VC2 T1PA T1PB T1PC NT
BLANK
C FIM DAS VARIAVEIS DE TENSÃO A SEREM PLOTADAS
BLANK

```

BIBLIOGRAFIA

- [Ab91] ABREU, J. P. G., “Desenvolvimento e Implementação de um Transformador com Relação de Transformação Complexa Variável – *Phasor Controller*”, Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, Brasil, 1991.
- [Ab96] ABREU, J. P. G., “Reflexões Sobre A Qualidade Da Energia”, Anais I SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, UFU – Uberlândia, pp. 01-05, Junho, 1996.
- [Al97] ALVES, G. M. e SOUZA, C. A., “Controle de Qualidade de Energia”, III Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Campos do Jordão, pp. 756 – 760, November, 1997.
- [An98] ANDRADE, M. T. O. e SÁSSI JR., P. M., “A Evolução da Regulamentação do Setor Elétrico Nacional”, Anais III Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, pp. 295 – 300, São Paulo, Junho 1998.
- [Ar00] ARRILLAGA, J., WATSON, N. R. and CHEN, S., “Power System Quality Assessment”, J. Wiley sons LTD., 2000.
- [Ba92] BALDA, J. C., “Harmonic Analysis of Converter-Fed DC Systems Under Unbalanced and Harmonic Supply Voltages”, Electric Power Systems Research, 23, pp. 233 – 237, 1992.
- [Be98] BESTER, D. D., MOUTON, H. T. and ENSLIN, J. H. R., “A 2 MVA Universal Power Quality Conditioner”, 98th International Power Quality Applications Conference, Session 7b, 9-11 november, Cape Town, South Africa, 1998.
- [Ca97a] CARVALHO FILHO, J. M., - “Qualidade Da Energia Elétrica I”, Estudo Dirigido II, Disciplina de Doutorado ECD-97, Itajubá, 1997.
- [Ca97b] CARVALHO, P. L., “Uma Contribuição ao Estudo Da Depressão de Tensão”, Dissertação de Mestrado, EFEI, 1997.

- [Ca98] CASADEI, D., SERRA, G. and TANI, A. "Reduction Of The Input Current Harmonic Content In Matrix Converters Under Input/Output Unbalance", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 3, pp. 401 – 411, June, 1998.
- [Du96] DUGAN, R. C., MC GRANAGHAN, M.F. and BEATY, H.W., "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [El76] ELGERD, O. L., "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1976.
- [En90] ENJETI, P. N. and ZIOGAS, P. D., "Analysis of a Static Power Converter Under Unbalance: A Novel Approach", Letters to the Editor, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 1, pp. 91 – 93, February 1990.
- [Gu98] GUIMARÃES, C. A. M., "Apostila Sobre Harmônicos", Disciplina ECM94, Mestrado, EFEI, 1998.
- [Gu95] GUIMARÃES, C. A. M., "Convertisseurs Spéciaux Utilisant une connexion Série Inhabituelle de Transformateurs", Tese de Doutorado, Universidade de Montreal, Canada, 1995.
- [Ie87] "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications – IEEE Orange Book", ANSI/IEEE – Standard 446, 1987.
- [Kn85] KNESCHKE, T. A., "Control of utility System unbalanced Caused by Single-phase Electric Traction", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, nº 6, pp. 1559-1569, November/December 1985.
- [Le98] LEE, C. Y., CHEN, B. K., LEE, W. J. and HSU, Y. F., "Effects of Various Unbalanced Voltages on the Operation Performance of an Induction Motor under the same Voltage Unbalance Factor Condition", Electric power Systems Research, Vol. 47, pp. 153-163, 1998.

- [Li98] LIND, R., “Power Quality Improvement by dynamic voltage Regulator”, 98th International Power Quality Applications Conference, Session 6b, 9-11 november, Cape Town, South Africa, 1998.
- [Ng97] NGANDUI, É., OLIVER, G., APRIL, G. É. and GUIMARÃES, C. “DC Harmonic Distortion Minimization Of Thyristor Converters Under Unbalanced Voltage Supply Using Asymmetrical Firing Angle”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp. 332 – 342, March 1997.
- [OI97] OLIVER, G., APRIL, G. É., EL KAHEL, M. e GUIMARÃES, C. “Transformadores Tri-Pentafásicos para Conversores Estáticos de Potência”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp. 332 – 342, March 1997.
- [Pa96] PAULILLO, G. “Um Compensador Eletromagnético de Desequilíbrio de Tensão”, Dissertação de Mestrado, EFEI, 1996.
- [Pa01] PAULILLO, G. “Proposta de um Mitigador de Harmônicos Não-Characterísticos através da Compensação de Desequilíbrios de Tensão”, Tese de Doutorado, EFEI, 2001.
- [Pe97] PEREIRA, F. C., de OLIVEIRA, J. C. e SOUTO, O. C. N. – “Uma Abordagem à Questão os Custos Associados à Perda de Qualidade da Energia Elétrica”, III Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Campos do Jordão, pp. 766–771, Novembro, 1997.
- [Ra88] RASHID, M. H. and MASWOOD, A. I., “Analysis Of Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions”, IEEE Transaction on Industrial Applications, Vol. 24, No. 3, pp. 449 – 455, May/June, 1988.
- [Ra98] RAMOS, A. J. P., LIRA, D. P. C. P. e VASCONCELOS, L. F., “Efeitos do Carregamento do Sistema de Transmissão sobre a Qualidade da Energia Elétrica na Subtransmissão e na Distribuição”, Anais III CONLADIS – Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, Escola Politécnica da USP, pp. 105 - 109, Setembro, 1998.

- [So97] SOUTO, O. C. N., VILELA, J. H., de OLIVEIRA, J. C. e MARTINS NETO, L. "Efeitos da Qualidade da Energia Elétrica sobre a Operação de Motores Trifásicos", II SBQEE – Seminário Brasileiro Sobre a Qualidade da Energia Elétrica, São Lorenço, Novembro, 1997.
- [St98] STEGMANN, I and COWAN, P., "Harmonic Cancellation Via Higher Pulse Number Converters", Proceeding 8th International Power Quality Applications Conference, Session 5, 3^o paper, Cape Town, South Africa, November, 1998
- [Ya80] YACAMINI, R. and de OLIVEIRA, J. C., "Harmonics In Multiple Converter Systems: A Generalised Approach", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, N° 2, pp. 96 – 106, March, 1980.
- [Wa94] WASYNEZUK, O., "Analysis Of Line-Commutated Converters During Unbalanced Operating Conditions", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp. 420 – 426, June, 1994.
- [We65] "Distribution Systems – Electric Utility Engineering Reference Book", Westinghouse Electric Corporation, First Edition, Sixth Printing, USA, 1965.
- [Wh98] WHISENANT, S. G. and PEEL, M. K., "Incorporating Series Connected Custom Power Devices into Service Offerings for a Competitive Retail Marketplace", 98th International Power Quality Applications Conference, Session 2a, 9-11 november, Cape Town, South Africa, 1998.

