



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

**“Classificação, Metodologia de Projeto e Aplicação de
Retificadores Multipulsos com Conexão Diferencial de
Transformador”**

Priscila da Silva Oliveira

Orientador: Falcondes José Mendes de Seixas.

Tese submetida à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – FEIS/UNESP – como parte dos
requisitos exigidos para o Exame de defesa de
Doutorado.

Área de conhecimento: Automação.

Ilha Solteira (SP)

Novembro de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- | | |
|------|--|
| O48c | <p>Oliveira, Priscila da Silva.</p> <p>Classificação, metodologia de projeto e aplicação de retificadores multipulsos com conexão diferencial de transformador / Priscila da Silva Oliveira. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011</p> <p>190 f. : il.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2011</p> <p>Orientador: Falcondes José Mendes de Seixas</p> <p>Inclui bibliografia</p> <p>1. Retificadores multipulsos. 2. Conexões diferenciais. 3. Correção do fator de potência. 4. Distorção harmônica total. 5. <i>Retrofit</i>. 6. Eletrônica de potência.</p> |
|------|--|

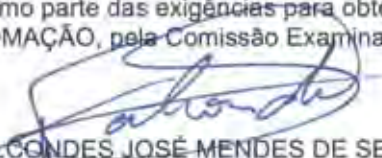
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Classificação, Metodologia de Projeto e Aplicação de Retificadores Multipulsos com Conexão Diferencial de Transformador

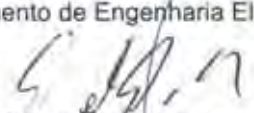
AUTOR: PRISCILA DA SILVA OLIVEIRA

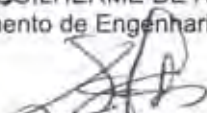
ORIENTADOR: Prof. Dr. FALCONDES JOSÉ MENDES DE SEIXAS

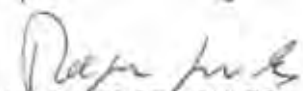
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. FALCONDES JOSÉ MENDES DE SEIXAS
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GUILHERME DE AZEVEDO E MELO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Uberlândia


Prof. Dr. ROGER GULES
Departamento de Engenharia Elétrica / UTFPR- Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Data da realização: 17 de novembro de 2011.

À Deus e a minha família, em especial a minha
mãe que sempre acreditou em minha
capacidade.
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Falcondes José Mendes de Seixas pela orientação, mas principalmente pela dedicação, confiança e amizade dedicadas nestes quatro anos de trabalho.

Agradeço a meus pais Osmar Batista de Oliveira e Ângela Maria Alves da Silva Oliveira pela força e incentivo dados nos momentos difíceis e pelo tempo que abdicaram de minha companhia para que este trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço também a minha irmã Merielen da Silva Oliveira por sempre me ouvir, mesmo não entendendo nada do assunto me incentivava.

Aos professores Luiz Carlos Gomes de Freitas, Roger Gules, Dionízio Paschoareli Jr. e Guilherme de Azevedo e Melo por participarem da banca examinadora e deixarem suas contribuições para a melhora do trabalho.

Aos meus colegas e amigos do laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) que me ajudaram no desenvolvimento experimental do trabalho, em especial ao amigo Engenheiro Luciano de Souza da Costa e Silva que participou diretamente da construção e ensaio dos protótipos.

Ao aluno de graduação Calu E. de C. Santos pela colaboração no desenvolvimento do programa MultiTrafo.

Aos técnicos da universidade que me auxiliaram também na parte experimental deste trabalho sendo sempre muito prestativos.

A todos os funcionários e professores da pós-graduação que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira por me acolher

Agradecimento especial a agência de fomento FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro dado ao projeto 2007/04294-8.

RESUMO

Os conversores ou retificadores multipulsos se apresentam como uma técnica passiva para melhorar a qualidade de energia na rede elétrica. Eles proporcionam baixa Distorção Harmônica Total de corrente (DHT_i), resultando um elevado Fator de Potência (FP) e baixa ondulação na tensão de saída. Neste contexto apresenta-se um abrangente levantamento bibliográfico, com o intuito de classificar as inúmeras topologias CA-CC trifásicas. As topologias retificadoras CA-CC estudadas nesta tese utilizam transformadores não-isolados, ou autotransformadores, cujas conexões são denominadas de Estrela e Delta-diferenciais, que resultam em retificadores multipulsos. Como atrativo essas topologias apresentam baixas taxas kVA (parcela de potência processada pelos núcleos), o que leva a reduzidos peso e volume. São estruturas confiáveis e robustas, apresentam baixa complexidade de construção e produzem pequena interferência eletromagnética. Outra grande vantagem destas estruturas é a possibilidade de obter qualquer valor de tensão de saída para qualquer nível de tensão de entrada. Como contribuição deste trabalho, análises matemáticas e fasoriais foram realizadas para cada uma das configurações com topologias Delta e Estrela, obtendo expressões generalizadas com relação ao número de pulsos do retificador para cada uma delas. A partir deste equacionamento foi possível obter expressões unificadas para duas das configurações de diferentes topologias (denominadas de A e C). A análise unificada foi realizada tanto para tensão como para corrente, resultando no equacionamento utilizado no desenvolvimento de uma nova ferramenta de simulação e projeto para os retificadores com essas duas configurações. A partir da análise matemática de cada configuração foi possível desenvolver uma nova metodologia de projeto através da análise de gráficos que relacionam peso do cobre e do ferro em função das relações de tensão. Para validar todo o estudo desenvolvido, dois protótipos foram construídos e aplicados a diferentes inversores comerciais de frequências. Ambos os protótipos apresentam 18 pulsos, 220 V de entrada (linha), 315 V como tensão média nas saídas retificadas e 2,5 kW de potência. Estes retificadores substituíram as pontes retificadoras dos inversores comerciais - técnica chamada de *retrofit*. Resultados como formas de onda de tensão e corrente na entrada da rede elétrica e análises harmônicas para diferentes casos são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Retificadores multipulsos. Conexões diferenciais. Correção do fator de potência. Distorção harmônica total. *Retrofit*.

ABSTRACT

Nowadays the theme of Power Quality has been one of the most discussed topics. Several techniques for power factor correction are presented in the literature. The multipulse converters or rectifiers resurge as a passive technique to improve the power quality in the mains. They provide low Total Harmonic Distortion of current (THD_i), high Power Factor (PF) and low ripple on the output voltage. This thesis shows a comprehensive bibliographic research with the purpose of classifying the several AC-DC three-phase topologies that improve the power quality in the mains. The topologies studied in this thesis use non-isolated transformers and are called as generalized Wye and Delta-differential connections. These connections show an advantage of low kVA-rating (power processed by the core), reducing weight and volume of these rectifier structures. The multipulse rectifiers are reliable and robust, they show low complexity construction and low electromagnetic interference. Another advantage for these connections is the possibility to choose any value of the output voltage for any level of input voltage. Several configurations for Wye and Delta topologies are presented. One of the contributions of this thesis were the mathematical and fasorial analysis made for all configurations in order to obtain generalized expressions related to the pulse numbers for each configuration. From this equation was possible to obtain unified expressions for two configurations of different topologies (denominated A and C). The analysis was realized for voltage and current, result in an equation used in the development of a new simulation tool and designed for the rectifiers with this two configurations. Through the mathematical analysis it was possible to realize a study connecting the rectifier average output voltage and the weight of the multipulse structures for different size core and power. Graphics show the weight for the cooper windings and the iron core as a function of the input and output voltages. To validate the study developed, two prototypes were designed and applied in different commercial frequency inverters. The prototypes operate with 18 pulses, 220 V of input line voltage, 315 V of DC output voltage and 2.5 kW. The rectifiers were designed to replace the conventional six-pulse rectifiers by the commercial frequency inverters, - technique called retrofit. Experimental results for voltage and current waveforms and harmonics analysis for the different conditions are showed and discussed.

Keywords: Multipulse rectifiers. Differential connections. Power factor correction. Total harmonic distortion. Retrofit.

SUMÁRIO

Capítulo 1 Introdução	10
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
1.2 TÉCNICAS PARA CORREÇÃO DO FP E REDUÇÃO DA DHT_1	13
1.3 CONVERSORES CA-CC TRIFÁSICOS COM ELEVADO FP	19
<i>1.3.1 Retificador de 18 - pulsos com conexão Estrela - diferencial e isolamento em alta frequência</i>	<i>19</i>
<i>1.3.2 Retificador de 18 - pulsos com conexão Estrela - diferencial e regulação da tensão de saída</i>	<i>21</i>
<i>1.3.3 Retificadores multipulsos com modulação ativa da corrente de entrada</i>	<i>22</i>
<i>1.3.4 Conversor isolado com conexão Scott e correção do FP</i>	<i>23</i>
<i>1.3.5 Conversores híbridos</i>	<i>24</i>
1.4 CONCLUSÕES	26
Capítulo 2 Retificadores trifásicos multipulsos	28
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
2.2 CONVERSORES MULTIPULSOS	28
<i>2.2.1 Conversores de 12 pulso</i>	<i>29</i>
<i>2.2.2 Conversores de 18 pulsos</i>	<i>34</i>
<i>2.2.3 Conversores de 24 pulsos</i>	<i>38</i>
<i>2.2.4 Conversores de 30 ou mais pulsos</i>	<i>41</i>
2.3 CONVERSORES MULTIFASES	43
<i>2.3.1 Conversores de nove fases</i>	<i>43</i>
2.4 CONCLUSÕES	44
Capítulo 3 Estudo das conexões diferenciais generalizadas de transformador	46
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
3.2 TOPOLOGIA ESTRELA	46
<i>3.2.1 Análise para configuração A</i>	<i>47</i>
<i>3.2.2 Análise para configuração B</i>	<i>51</i>
<i>3.2.3 Enrolamentos auxiliares para o retificador de 18 pulsos</i>	<i>53</i>
<i>3.2.4 Relações de espiras</i>	<i>53</i>
<i>3.2.5 Conexões particulares</i>	<i>54</i>
<i>3.2.6 Análise das correntes</i>	<i>55</i>

3.3	TOPOLOGIAS DELTA	62
3.3.1	<i>Análise para a configuração C</i>	63
3.3.2	<i>Análise para a configuração D</i>	67
3.3.3	<i>Análise para a configuração E</i>	68
3.3.4	<i>Enrolamentos adicionais para conversores de 18 pulsos</i>	69
3.3.5	<i>Relações de espiras</i>	70
3.3.6	<i>Conexões particulares</i>	71
3.3.7	<i>Análises das correntes</i>	72
3.4	CONCLUSÕES	77
	Capítulo 4 Unificação das topologias estrela e delta	78
4.1	Considerações iniciais	78
4.2	Generalização das expressões	79
4.2.1	<i>Unificação das topologias Estrela (A) e Delta (C)</i>	79
4.2.2	<i>Enrolamentos adicionais para o Retificador de 18 pulsos</i>	82
4.2.3	<i>Relações de espiras generalizadas</i>	82
4.2.4	<i>Generalização das Correntes</i>	83
4.3	Programa MultiTrafo	86
4.4	Conclusões	92
	Capítulo 5 Metodologia de projeto para redução de peso e volume	93
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	93
5.2	ESCOLHA DA TOPOLOGIA E CONFIGURAÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR	93
5.3	ESCOLHA DO MATERIAL DO NÚCLEO	98
5.4	ANÁLISES DO PESO DO NÚCLEO E DO COBRE	100
5.4.1	<i>Retificadores de 12 pulsos</i>	102
5.4.2	<i>Retificadores de 18 pulsos</i>	111
5.5	ANÁLISE DA TAXA KVA	119
5.6	ANÁLISE PARA IPTS	120
5.7	CONCLUSÕES	122
	Capítulo 6 Especificações de projeto e resultados de simulação	123
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	123
6.2	ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	123
6.2.1	<i>Retificador de 18 pulsos com conexão Delta</i>	123

6.2.2 <i>Retificador de 18 pulsos com conexão Estrela</i>	127
6.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - CARGAS INDEPENDENTES	130
6.3.1 <i>Topologia Delta</i>	130
6.3.2 <i>Topologia Estrela</i>	132
6.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - ÚNICA CARGA	134
6.4.1 <i>Topologia Delta</i>	134
6.4.2 <i>Topologia Estrela</i>	136
6.5 CONCLUSÕES	138
Capítulo 7 Especificações de componentes e resultados experimentais	140
7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	140
7.2 DADOS DE PROJETO	140
7.3 PROJETOS DO NÚCLEO E DOS ENROLAMENTOS	141
7.3.1 <i>Dimensionamento do núcleo e enrolamentos</i>	142
7.4 RESULTADOS DO ENSAIO COM CARGAS INDEPENDENTES	146
7.4.1 <i>Topologia Delta</i>	146
7.4.2 <i>Topologia Estrela</i>	149
7.5 RESULTADOS DE ENSAIO COM CARGA ÚNICA	152
7.5.1 <i>Topologia Delta</i>	152
7.5.2 <i>Topologia Estrela</i>	155
7.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS INVERSORES COMERCIAIS	158
7.6.1 <i>Ensaio inversor 1</i>	158
7.6.2 <i>Ensaio inversor 1 com reatância de entrada</i>	160
7.6.3 <i>Ensaio para o inversor 1: aplicação para retrofit</i>	163
7.6.4 <i>Ensaio inversor 2: aplicação para retrofit</i>	168
7.6.5 <i>Ensaio inversor 3: aplicação para retrofit</i>	172
7.7 CONCLUSÕES	176
Capítulo 8 Conclusões gerais	178
8.1 CONCLUSÕES	178
8.2 TRABALHOS FUTUROS	181
REFERÊNCIAS	183

Capítulo 1

Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O propósito desta tese é apresentar um estudo inédito com relação aos retificadores multipulsos com conexões diferenciais de transformador, sob o ponto de vista de redução de peso e volume destas estruturas retificadoras. O estudo abrange a classificação de algumas topologias multipulsos, apresenta uma nova metodologia de projeto para retificadores multipulsos com conexões diferenciais, e para finalizar e confirmar os benefícios que este estudo acarreta, os retificadores estudados e projetados foram aplicados como *retrofit* em inversores de frequência de diferentes marcas e modelos.

Retificadores convencionais (pontes de *Graetz*) são muito utilizados como interface CA-CC para alimentar circuitos CC. Estes retificadores são encontrados nas mais diversas aplicações como: em dispositivos de ajuste de velocidade (*Adjustable Speed drives*), aplicações com elevadas tensões (*HVDC*), em fontes para telecomunicação, em fontes ininterruptas de energia (*UPSs*), em sistemas conversores para aeronaves entre outras. Na maioria dessas aplicações, são utilizados conversores trifásicos, controlados ou não, sem nenhuma técnica para correção do fator de potência (FP) ou para redução de componentes harmônicas. Estes conversores injetam elevado conteúdo harmônico de corrente na rede, logo, apresentam baixo FP, além de elevada ondulação de tensão na saída.

Elevados conteúdos harmônicos de corrente podem ocasionar o mau funcionamento de equipamentos ou até mesmo danificá-los. Devido a elevada DHT_i na rede elétrica, normas foram estabelecidas, limitando principalmente os harmônicos de corrente na rede. As principais normas são: IEC-61000-3-2 e 61000-3-4 (*International Electrotechnical Commission*) para harmônicos individuais de corrente em equipamentos e a norma IEEE 519 (1992) que limita níveis de distorção harmônica na tensão em função dos níveis da corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) [1, 2]. No Brasil não existe ainda uma norma que limite os componentes harmônicos individuais de corrente na rede. Existe apenas, uma regulamentação com relação ao fator de potência e ao consumo de reativos e um módulo da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que limita distorções totais de tensão e corrente na rede de alimentação [3].

Em resposta a esta situação, inúmeros trabalhos que buscam uma melhoria na qualidade de energia elétrica vêm sendo publicados. Trabalhos com diferentes propostas, porém, com um objetivo comum, obter baixa injeção de conteúdo harmônico na rede e fator de potência próximo da unidade. Técnicas ativas, passivas e híbridas vêm sendo largamente exploradas.

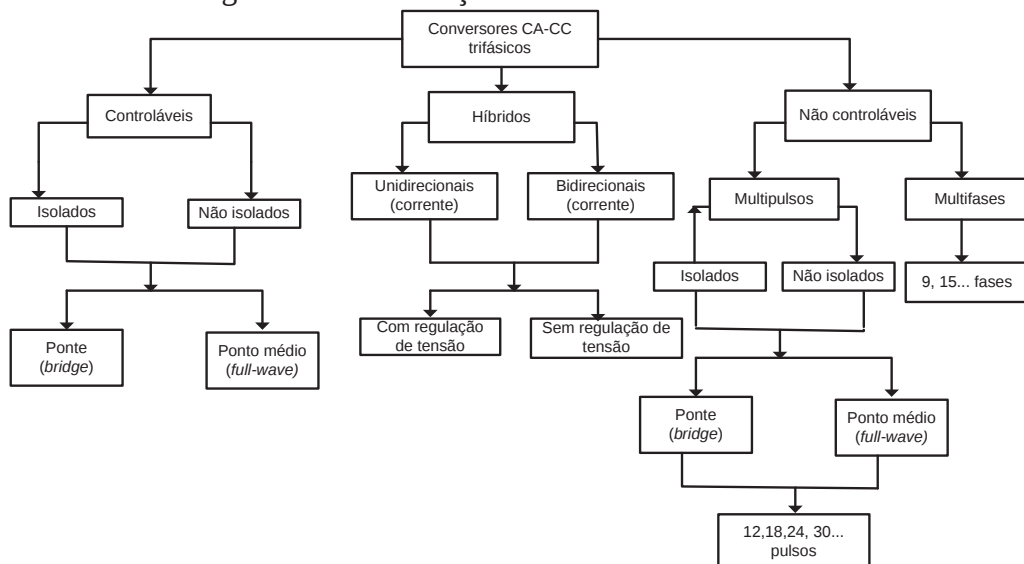
Retificadores trifásicos passivos, quando associados em paralelo a estágios reguladores CC-CC, como estágios *Boost* ou *SEPIC* (*Single Ended Primary Inductor Converter*), resultam em conversores híbridos [4-10]. Conversores com correção ativa do fator de potência *PFC* (*Power Factor Corrector*) reduzem significativamente as correntes harmônicas produzidas em retificadores trifásicos de seis pulsos corrigindo o fator de potência na entrada da rede [11-20]. Além disso, estes conversores híbridos e ativos possuem adaptabilidade a diferentes tensões de linha devido à possibilidade de se aplicar técnicas de controle de tensão e corrente. Muitas vezes técnicas de controle sofisticadas e de difícil implementação devem ser aplicadas a estes conversores podendo elevar o custo dos mesmos. O controle destes conversores muitas vezes é complexo, gerando custos elevados de implementação.

Conversores CA-CC trifásicos podem ser classificados em ativos, híbridos ou passivos[21-30]. Dentre os conversores CA-CC trifásicos ativos os retificadores multipulsos controláveis (fluxo de potência bidirecional) utilizam elementos como tiristores em sua estrutura retificadora (ponte trifásica completa) [21]. Conversores híbridos reúnem elementos da correção ativa e passiva, são formados basicamente por pontes retificadoras a diodo associadas a um estágio CC-CC que pode ser uma topologia *Boost*, ou então a topologia *SEPIC* [4 -7]. Técnicas de comutação suave e estratégias de controle digital também são apresentadas de forma a se obter baixas perdas e elevado fator de potência em estágios CA-CC. Por fim, como técnica passiva destaca-se os retificadores multipulsos CA-CC trifásicos que utilizam elementos passivos (diodos) em sua estrutura retificadora (ponte de *Graetz*).

A Figura 1 Apresenta um diagrama para a classificação geral das estruturas conversoras trifásicas CA-CC. Uma maneira inicial de classificar os conversores multipulsos trifásicos é separando-os em duas grandes famílias, como apresentado em [21]: 1) Unidirecionais: os conversores que tem o fluxo de potência apenas da rede para a carga e em geral utilizam componentes não-controlados, como diodos e transformadores e 2) Bidirecionais: aqueles que têm o fluxo de potência controlável. Normalmente, esses conversores empregam componentes controlados, como tiristores e IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Dentro destas duas grandes famílias, os conversores podem ainda ser classificados como isolados ou não-isolados, e também separados de acordo com o número de pulsos, como 6, 12, 18, 24, etc. Além disso, os conversores (ou retificadores) multipulsos são ainda classificados quanto à topologia aplicada ao estágio retificador, podendo ser de onda completa (*full-wave*) ou em ponte (*bridge*). Existem também os conversores multifases. Estes conversores também geram múltiplos pulsos na corrente de entrada e tensão de saída de baixa ondulação, porém, o conversor consiste na utilização de uma ponte única de diodos, alimentada por um sistema simétrico de tensões, com múltiplas fases e igualmente defasadas. A ponte de diodos possui um braço (dois diodos) por fase gerada a partir de transformadores defasadores.

Figura 1 - Classificação de Conversores trifásicos CA-CC.



Fonte: Dados do autor.

Retificadores multipulsos reaparecem como uma técnica passiva para correção do FP. É uma técnica bem aceita como se apresenta em [21], pois promove baixa ondulação na tensão de saída e uma redução na taxa de distorção harmônica total (DHT_i) da corrente de entrada.

Este capítulo apresenta algumas topologias conversoras trifásicas CA-CC, além de um breve estudo sobre filtros. No capítulo 2 é apresentada algumas estruturas multipulsos. O principal objetivo do capítulo 3 é estudar as conexões generalizadas Estrela (Y) e Delta (Δ)-diferenciais de transformador, que compõem os retificadores multipulsos. O estudo detalhado destas conexões é imprescindível para que critérios sólidos possam ser estabelecidos na escolha da conexão diferencial mais adequada a ser utilizada, que minimizem o peso e volume da estrutura retificadora. As contribuições da tese estão nos capítulos 4 e 5. No capítulo 4 são

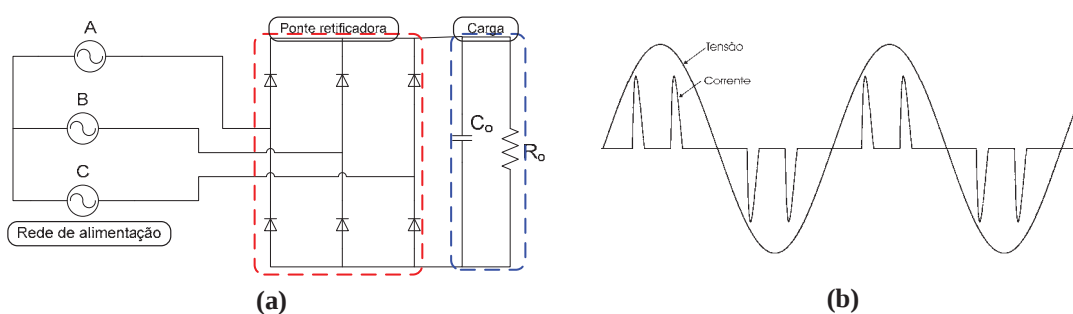
apresentadas expressões generalizadas para corrente e tensão que representam uma família de retificadores com conexões Estrela e Delta diferenciais para 12 ou 18 pulsos. Este equacionamento é visto como uma forma de dinamizar o procedimento de projeto. Resultados com relação ao peso e volume dos elementos magnéticos que constituem os retificadores multipulsos são apresentados no capítulo 5. Estes resultados levam a uma metodologia de projeto a ser aplicada na escolha da melhor topologia e configuração de transformador a ser empregada. Os capítulos 6 e 7 apresentam resultados de projeto, de simulação e experimentais para dois retificadores de 18 pulsos, um com topologia Estrela e outro com topologia Delta. Uma tensão adequada na saída foi escolhida para que o retificador projetado pudesse ser empregado como *retrofit* em inversores de frequências comerciais, ou seja, substituir o retificador convencional trifásico, que constitui o estágio CA-CC do inversor pelos retificadores multipulsos propostos. O objetivo é melhorar a qualidade de energia na rede, uma vez que, é sabido que retificadores trifásicos convencionais apresentam elevado conteúdo harmônico e baixo fator de potência.

1.2 TÉCNICAS PARA CORREÇÃO DO FP E REDUÇÃO DA DHT_i

Nesta seção, serão apresentadas algumas técnicas empregadas para a correção do fator de potência e redução da DHT_i em conversores trifásicos CA-CC.

O circuito retificador trifásico básico com ponte de diodos (ponte de Graetz) e filtro capacitivo de saída, empregado em inversores, é mostrado na Figura 2 (a). A Figura 2 (b) apresenta corrente na rede para este retificador, neste caso a taxa de distorção harmônica chega a 150%, resultando em um fator de potência (relação entre potência ativa e aparente) de apenas 0,55.

Figura 2 - Retificador convencional com filtro capacitivo
(a) ponte de Graetz, (b) tensão e corrente na rede.



Fonte: Seixas (2001).

- **Filtros passivos, ativos e híbridos.**

Uma solução passiva, simples e de baixo custo consiste na introdução de indutores em série com as linhas de alimentação. A adição das indutâncias em série com a linha de alimentação, apesar de aumentar o deslocamento angular entre tensão e corrente, promove uma diminuição da DHT_i que pode chegar a 20 %. É importante dizer que, a adição de filtros ao sistema pode acarretar alguns problemas de ressonância, além de apresentarem elevado peso e volume. Outra forma de minimizar os harmônicos injetados na rede seria utilizar um indutor de filtragem na saída do retificador, no barramento CC. Porém, este indutor de filtragem deve ser bastante volumoso, para que suporte a máxima corrente de carga sem que haja a saturação do núcleo. Para este caso, a DHT_i é no mínimo de 30%, mas o fator de potência pode chegar a 0,95.

A filtragem passiva também inclui filtros sintonizados. Normalmente, utilizam-se estes filtros para mitigação de harmônicas de baixa ordem, como 5ª e 7ª.

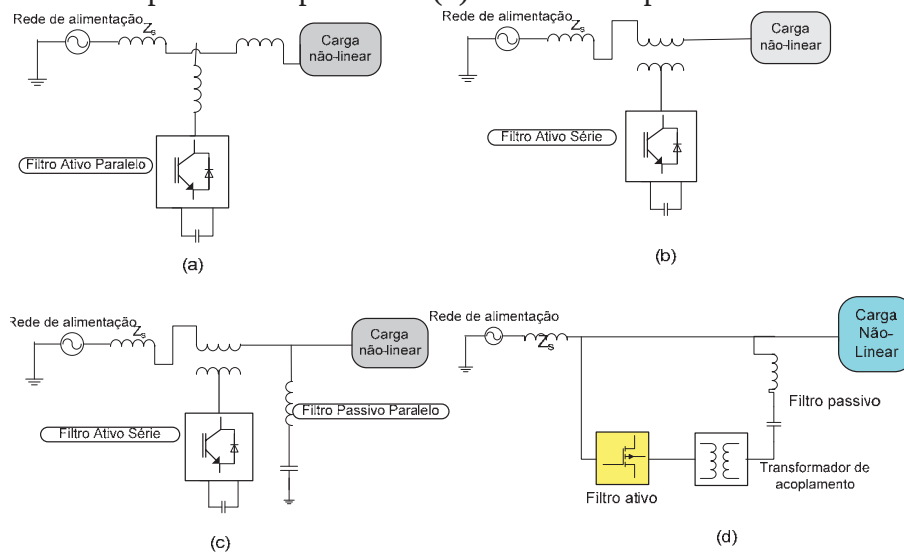
A tecnologia que abrange filtros ativos vem sendo desenvolvida há algum tempo. Filtros ativos são obtidos a partir de conversores *VSI* (*Voltage Source Inverter*) ou *CSI* (*Current Source Inverter*). Eles podem ser classificados com relação a sua topologia série, em derivação (*shunt*) ou híbrida sendo esta última uma combinação de filtros ativos e passivos. A Figura 3 apresenta estas três topologias de forma esquemática.

A topologia em derivação de filtros ativos, Figura 3 (a) realiza a compensação harmônica injetando correntes harmônicas de mesmo valor, porém, com fases opostas, de forma que ocorra o cancelamento das mesmas [25-27].

Os filtros ativos série, Figura 3 (b) operam na rede como reguladores de tensão e isoladores de harmônicas. São recomendados especialmente para compensação de tensões desbalanceadas e distorções de tensão e são conectados em série com a rede, geralmente através de um transformador de acoplamento [28].

Filtros ativos podem ser usados como mitigadores de harmônicas em sistemas elétricos de potência de aeronaves como apresentado em [29]. Comumente a mitigação de harmônicas nestes sistemas se dá através do uso de filtros passivos sintonizados. Porém, este método gera muitos problemas como ressonâncias no sistema. Além disso, nos filtros passivos a compensação harmônica é fixa.

Figura 3 - Filtros ativos e híbridos;
 (a) Filtro ativo em paralelo, (b) filtro ativo série, (c) Filtro híbrido com filtro ativo em série e passivo em paralelo e (d) filtro ativo e passivo em série.



Fonte: Dados do autor.

Filtros híbridos são associações de filtros ativos e filtros passivos. Esta associação permite que apenas parte da potência seja processada pelo filtro ativo, assim a parte ativa atua apenas nas componentes não corrigidas pela parte passiva.

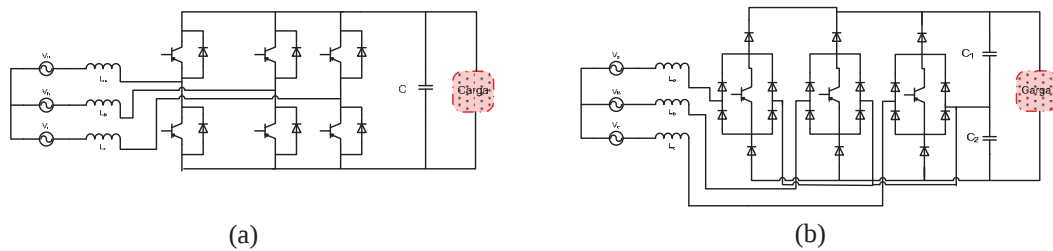
A Figura 3 (c) apresenta uma topologia de filtro híbrido composta por um filtro ativo conectado em série com a rede de alimentação e um filtro passivo em derivação. Neste arranjo, o filtro ativo constitui uma impedância elevada para frequências harmônicas, enquanto que o filtro passivo propicia um caminho de menor impedância às correntes harmônicas.

Outra topologia híbrida seria conectar filtros passivos em série com o filtro ativo através de transformadores de acoplamento, como mostra a Figura 4 (d) [30].

- **Conversores ativos PFCs.**

Os conversores ativos podem ser classificados de acordo com sua topologia conversora, como por exemplo, conversores *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost* etc. A Figura 4 (a) apresenta um conversor *PFC* com topologia *Boost* clássico, já a Figura 4 (b) uma modificação do *Boost* clássico chamado de retificador *Vienna*. Outras topologias conversoras podem ser usadas para a correção ativa do FP como, *Buck*, *Buck-Boost* entre outras.

Figura 4 - Conversores ativos (a) Bosst clássico e (b) retificador *Vienna*.



Fonte: Singh (2004).

- **Conversores híbridos.**

Conversores híbridos são formados basicamente por um retificador de seis pulsos não-controlado e topologias conversoras chaveadas, associadas em paralelo ao retificador. Neste arranjo, o estágio não controlado processa a maior parte da potência ativa total requerida pela carga. Assim, o estágio controlado opera em alta frequência e processa a fração restante da potência ativa [4-10].

Nestes conversores uma corrente é imposta de maneira que, quando combinada com as correntes de entrada típicas de um retificador trifásico de seis pulsos, se obtenha uma corrente de linha com baixa DHT_i e elevado FP.

Os conversores híbridos são estruturas que se mostram versáteis, pois, diferentes formas de onda de corrente na entrada podem ser obtidas alterando a corrente de referência imposta, porém, isto pode implicar em maior complexidade da estrutura com relação ao controle e modulação.

- **Retificadores multipulsos.**

Os retificadores multipulsos se apresentam como uma correção passiva do FP e mitigação de harmônicos injetados na rede. São conversores com mais de seis pulsos na corrente drenada da rede. Constituídos por um transformador especial, isolado ou não, e por pontes retificadoras trifásicas (pontes de *Graetz*), podem apresentar 12, 18, 24 ou mais pulsos, geralmente múltiplos de seis [20-24, 31-71].

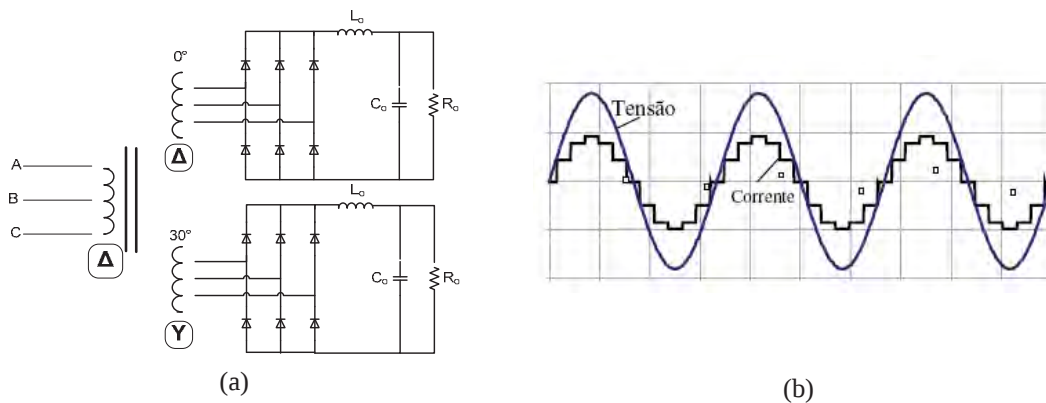
Uma maneira clássica de se obter um retificador de 12 pulsos é utilizando as conexões: primário em Delta (Δ) e secundários em Delta (Δ) e Estrela (Y), obtendo assim, a defasagem natural de 30° entre os sistemas de tensões secundárias Delta e Estrela. A Figura 5 (a) apresenta o conversor de 12 pulsos com conexão Δ / Δ -Y. Conversores de 12 pulsos também podem ser obtidos utilizando conexões especiais de transformador como, conexões zigzag e polígono. Estas conexões permitem o isolamento em baixa frequência, porém,

apresentam elevados peso e volume [22-25]. Na Figura 5 (b) observa-se a tensão e a corrente em uma das fases da rede, esta corrente é característica de um retificador de 12 pulsos.

A Figura 6 (a), (b) e (c) apresenta retificadores com conexões polígono ziguezague e conexão Delta-diferencial não-isolada, respectivamente. Nestes casos se obtêm um sistema defasado de $+15^\circ$ e outro de -15° com relação à tensão de referência (rede), obtendo os 30° entre os sistemas secundários.

Figura 5 - Retificador de 12 pulsos

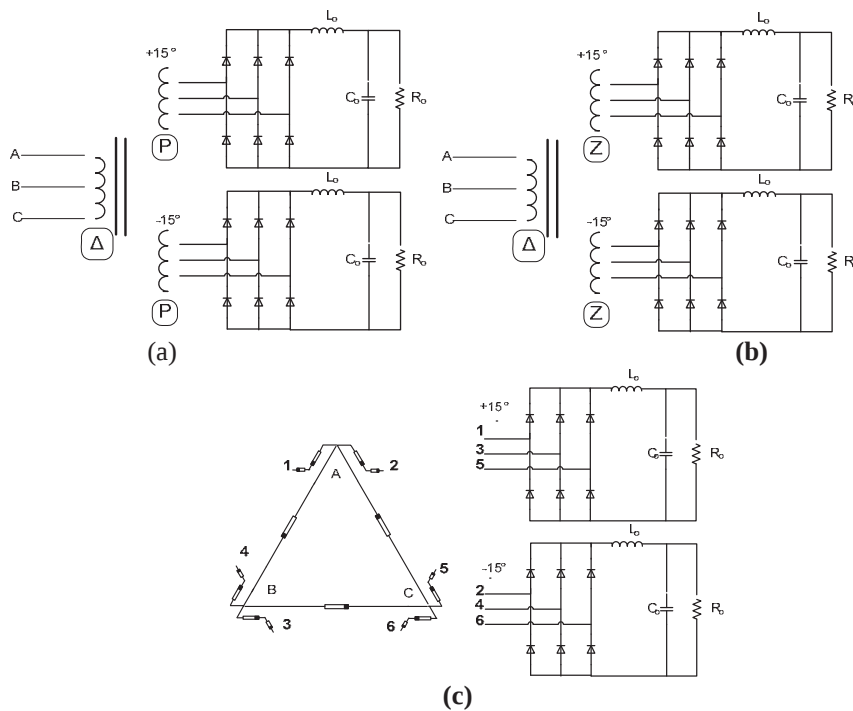
(a) Conexão Δ / Δ -Y, (b) forma de onda da corrente típica.



Fonte: Fernandes (2009).

Figura 6 - Retificadores de 12 pulsos

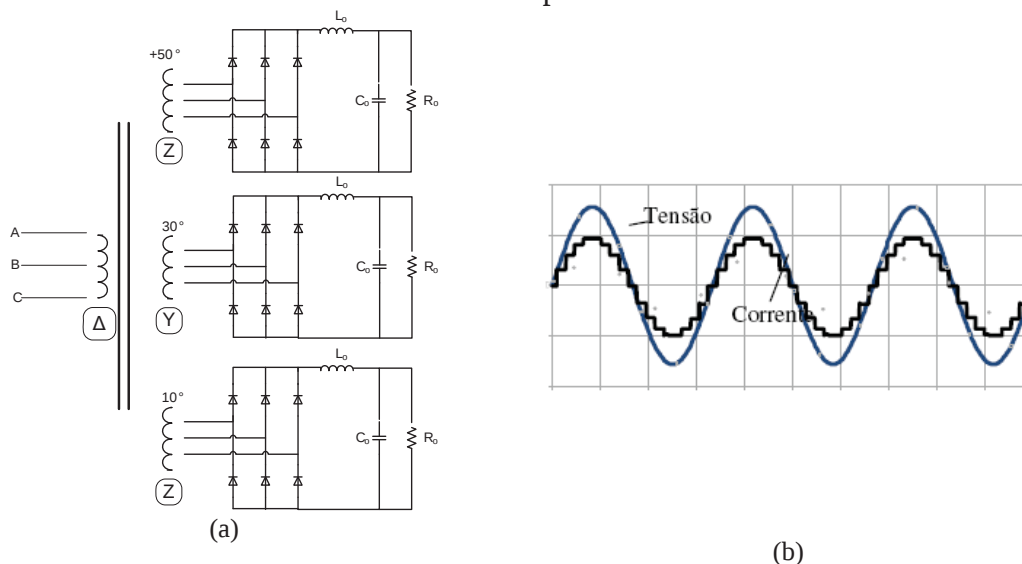
(a) conexão Polígono, (b) conexão Ziguezague, (c) conexão delta diferencial.



Fonte: Dados do autor.

A defasagem requerida pelos retificadores multipulsos é dada pela expressão $60^\circ/n$ sendo 'n' o número de pontes retificadoras. Assim, para um retificador de 18 pulsos a defasagem é $60/3$, ou seja, igual a 20° . A Figura 7 apresenta uma conexão isolada para um retificador de 18 pulsos.

Figura 7 - Retificador de 18 pulsos, (a) Conexão Δ / Z -Y-Z, (b) forma de onda da corrente típica.



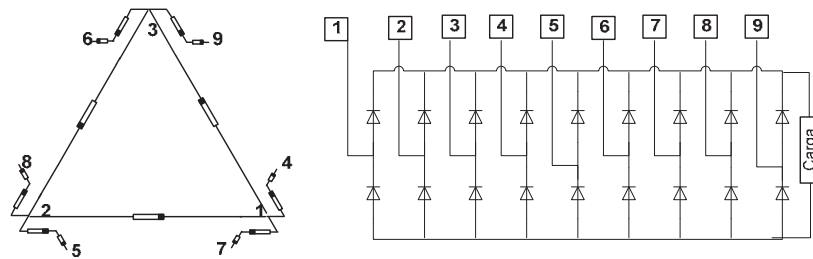
Fonte: Fernandes (2009).

- **Retificadores multifases.**

Retificadores multifases são obtidos através de conexões especiais de transformadores. Neste caso, as tensões secundárias geradas devem ter o mesmo defasamento entre as tensões secundárias. Por exemplo, para um retificador de 18 pulsos devem ser geradas nove tensões secundárias defasadas de 40° entre si, ou seja, para retificadores multifases o defasamento entre as tensões secundárias geradas deve seguir a expressão, $360^\circ/n^\circ$ sendo n° o número de tensões geradas. Neste método, não se obtém três sistemas trifásicos, cada um defasado entre si de $+20^\circ$ ou -20° , e sim nove fases defasadas entre si de 40° . Este retificador, não apresenta três pontes de seis pulsos e sim apenas uma ponte com nove braços, logo se torna dispensável o uso de IPT (*Interphase Transformer* - Indutores de Interfase). Genericamente, um conversor de p pulsos requer $p/2$ fases defasadas de $360^\circ/(p/2)$ graus.

A Figura 8 apresenta um conversor multifase de 18 pulsos com conexão Delta diferencial.

Figura 8 - Retificador Multifase de 18 pulsos.



Fonte: Dados do autor.

1.3 CONVERSORES CA-CC TRIFÁSICOS COM ELEVADO FP

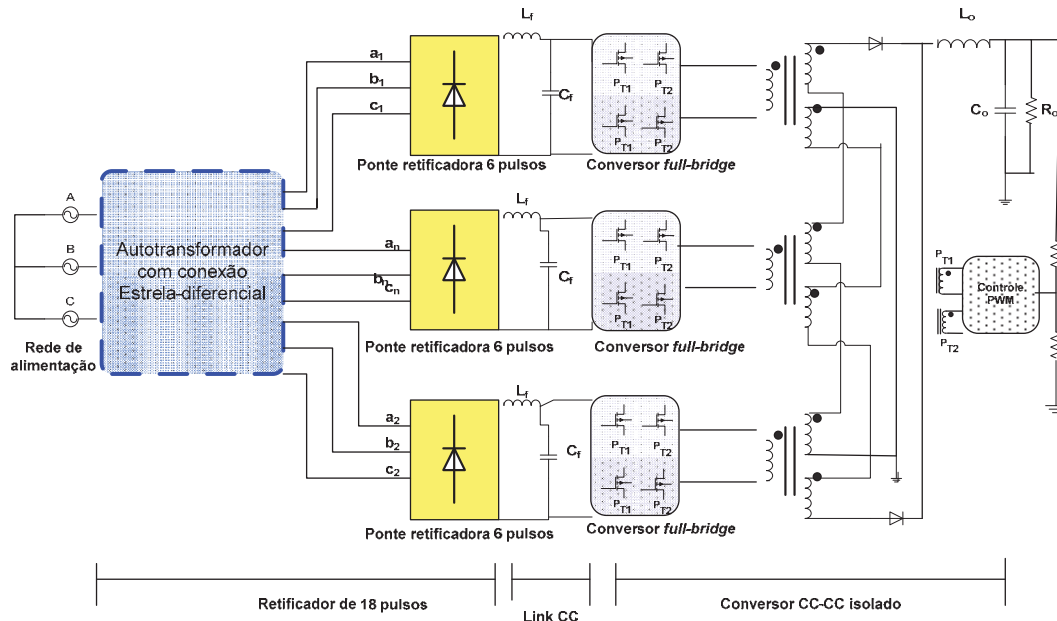
Nesta seção serão apresentados alguns conversores trifásicos com elevado FP e baixa taxa de distorção harmônica de corrente encontrados na literatura.

1.3.1 Retificador de 18 pulsos com conexão Estrela-diferencial e isolamento em alta frequência [31-35]

- **Três estágios *full-bridge*.**

É apresentado por Seixas e Barbi em [32] um conversor que agrega as qualidades dos retificadores multipulsos e as vantagens dos conversores CC-CC isolados. Este conversor além de promover a isolamento permite a regulação de tensão no lado CC do retificador de 18 pulsos. A Figura 9 mostra o retificador apresentado por Seixas e Barbi em [32]. Ele é composto por um retificador trifásico CA-CC de 18 pulsos com topologia Y-diferencial de transformador e três conversores *full-bridge* associados às saídas retificadoras. Filtros LC são conectados entre a ponte trifásica (diodo) e o conversor *full-bridge*. Estes filtros operam em alta frequência, logo possuem volume e peso reduzidos.

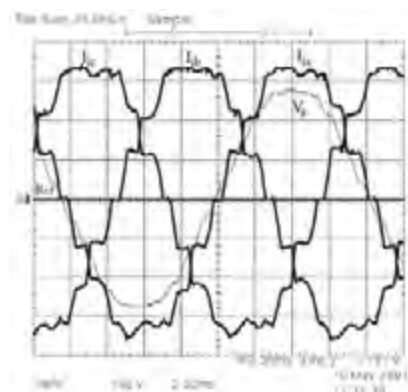
Figura 9 - Conversor trifásico com isolamento em alta frequência.



Fonte: Seixas (2004).

O conversor chaveado apresenta apenas uma malha de tensão, na qual é aplicado o controle clássico de modulação por largura de pulso PWM com deslocamento de fase (*phase-shift*). Ele é de simples construção, possui grande robustez e pode ser construído para potências de alguns kW. Um protótipo é apresentado por Seixas e Barbi [32] para 12 kW, 60 V/200 A. Como resultados o conversor apresentou FP de 0,99 e DHT_i de 8.6 %. Alguns pontos positivos apresentados para este conversor foram: não precisar de sensor de corrente, o circuito de comando das chaves é simples, IPTs são eliminados, o conversor apresentou eficiência maior que 90 % entre outras. A Figura 10 apresenta a corrente na rede com reduzida DHT_i .

Figura 10 - Conversor de 18 pulsos com estágio CC na saída, correntes na rede de alimentação, escalas 2 ms/div., 100 V/div. 10 A/ div.



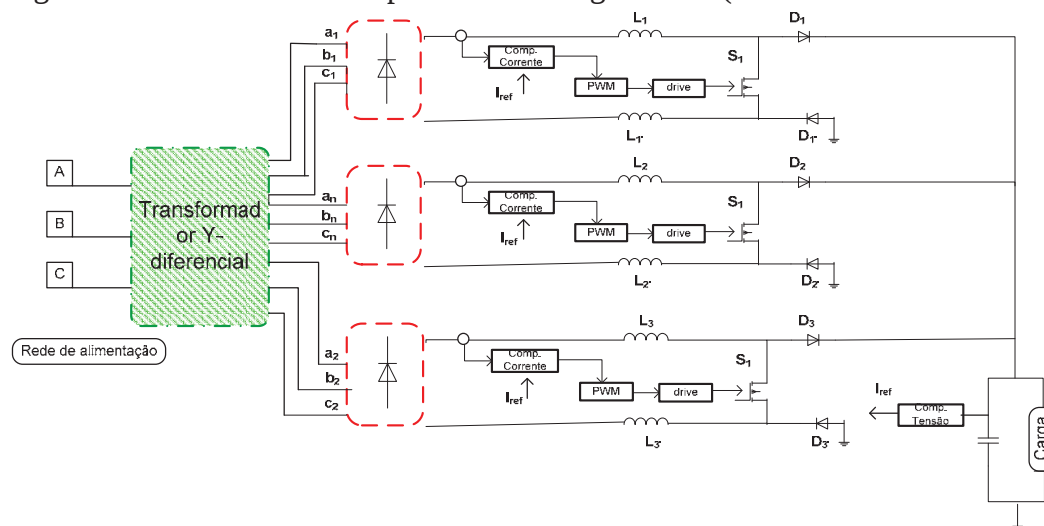
Fonte: Seixas (2004).

Outras topologias isoladas podem ser usadas para substituir a topologia *full-bridge*, como a topologia *push-pull* apresentada por Seixas em [34]. A topologia *push - pull* possui a vantagem de utilizar um menor número de elementos chaveados com relação à *full - bridge*, porém, os interruptores devem possuir maior capacidade de bloqueio em tensão.

1.3.2 Retificador de 18 pulsos com conexão Estrela-diferencial e regulação da tensão de saída [35]

Quando a isolamento não é necessária, uma proposta apresentada por Seixas e Barbi em [35]. São conectadas as saídas retificadoras apenas conversores CC-CC não-isolados, promovendo a regulação de tensão e eliminando os IPTs. A Figura 11 apresenta um retificador CA-CC de 18 pulsos com conexão Y-diferencial e um segundo estágio CC-CC com conversores do tipo *Boost* conectados a cada uma das pontes retificadoras trifásicas de seis pulsos, promovendo a regulação de tensão na saída e a conexão das saídas retificadoras em paralelo, e sem a utilização de IPTs.

Figura 11 - Retificador de 18 pulsos com estágio Boost.(autotransformador mudar na fig.).



Fonte: Fernandes (2009).

Uma das vantagens desta estrutura é com relação ao peso e volume do autotransformador utilizado. A conexão Y-diferencial utilizada nesta estrutura processa apenas 22% da potência total entregue a carga, portanto, possui peso e volume reduzidos.

A compensação de corrente, o modulador *PWM* e o circuito de comando da chave (*IGBT*) foram nesse trabalho realizados simultaneamente com o circuito integrado LM 3524. A regulação de tensão de saída é realizada por um compensador único para os três estágios

elevadores de tensão (*boost*). Os três estágios operam independentes, logo, as frequências de chaveamento das chaves não requerem sincronismo. A corrente de referencia, usada para a compensação de corrente, é a mesma para os três estágios elevadores de tensão, e provém do compensador de tensão. Esta estrutura apresentou um rendimento global de acordo com Seixas e Barbi em [35] de 94% a plena carga, FP de 0,99 e DHT_i de 8,8%.

1.3.3 Retificadores multipulsos com modulação ativa da corrente de entrada

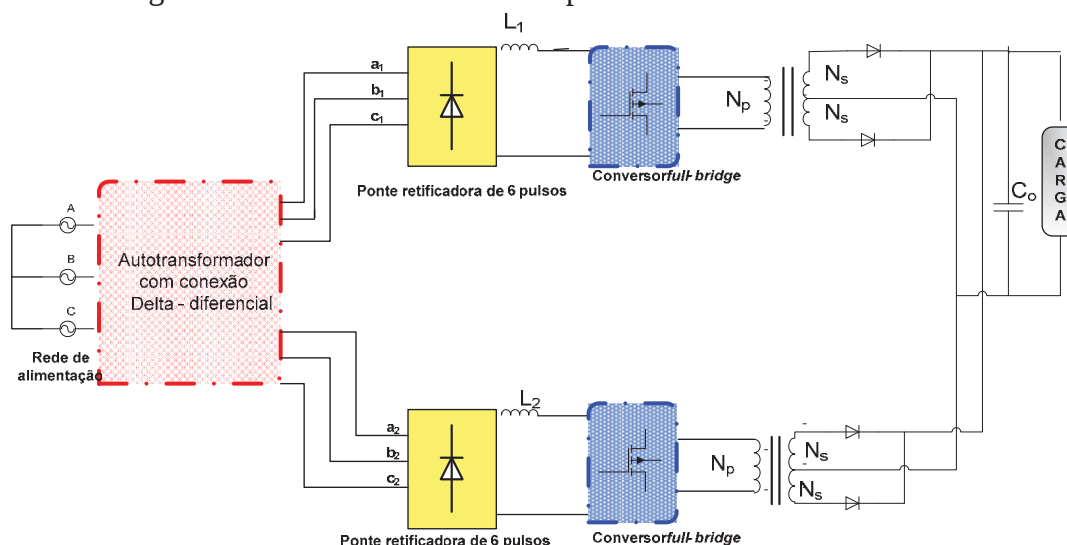
- **Topologias *full-bridge* entrada em corrente.**

Esta proposta foi baseada em um conversor não-isolado de 12 pulsos com conexão Delta-diferencial aliado a técnica de *waveshaping*, apresentado por Choi e Bae em [15], resultando em uma corrente na rede próxima da senóide com FP unitário. O conversor apresenta elevada eficiência e um número reduzido de filtros de entrada. Proporciona isolamento e tensão regulada, além disso, o conversor pode ser aplicado em potências elevadas. A Figura 12 apresenta a configuração para o conversor proposto por Choi e Bae em [15]. Também é apresentado por Choi em [16] um conversor de 12 pulsos não-isolado com conexão Delta-diferencial, que também utiliza a técnica de modulação da forma de onda, porém, o conversor CC-CC utilizado nas saídas retificadoras não é isolado.

Uma das grandes vantagens da utilização de conversores multipulsos não-isolados é a redução no peso e volume da estrutura retificadora, como exemplo o autotransformador com conexão Delta-diferencial utilizado por Choi em [15, 16] possui uma taxa kVA (processamento de energia) de 0,24 contra uma taxa de 1,035 para conversores convencionais com conexão Delta / Delta-Estrela de transformador.

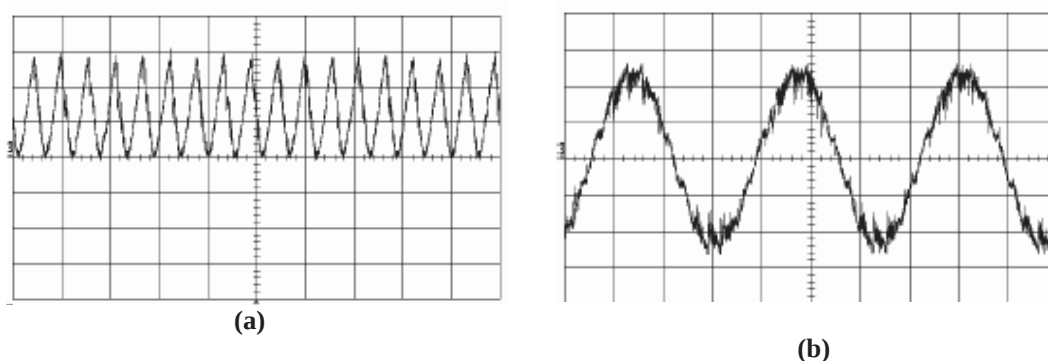
A Figura 13 apresenta alguns resultados para a estrutura proposta por Choi e Bae em [15]. Através do controle das correntes nos indutores, a corrente na entrada da rede pode resultar em uma forma de onda senoidal com FP unitário e baixa DHT_i . Os conversores *full-bridge* operam em modo de condução contínua, modulando a corrente nos indutores L_1 e L_2 de forma a se obter uma corrente senoidal na entrada da rede de alimentação.

Figura 12 - Conversor trifásico 12 pulsos com conversor isolado na saída.



Fonte: Choi (2005).

Figura 13 - Correntes (a) Corrente modulada no indutor i_{L1}
(b) Corrente na entrada (rede) fase A.



Fonte: Choi (2005).

1.3.4 Conversor isolado com conexão Scott e correção do FP

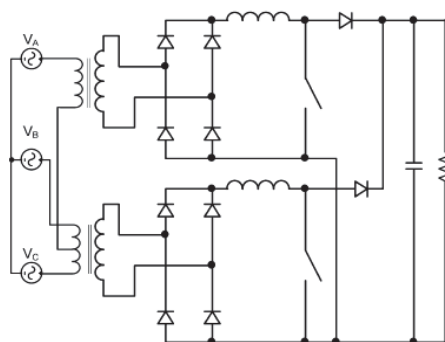
Um retificador trifásico com correção de FP é apresentado por Badin e Barbi em [36]. O conversor utiliza a conexão isolada com transformador Scott, gerando um sistema bifásico que é conectado a duas pontes retificadoras monofásicas, por sua vez as saídas destas pontes são conectadas a dois conversores CC-CC do tipo *Boost*.

Usando apenas duas chaves ativas o retificador é capaz de gerar correntes simétricas e tensão de saída balanceada. A Figura 14 apresenta o conversor trifásico com conexão Scott.

O estágio CC-CC é utilizado na correção do FP. A corrente nos indutores é forçada a seguir a forma de onda da tensão retificada no secundário do transformador Scott.

Existe uma malha de corrente para cada estágio *Boost* e uma malha para a regulação da tensão que também garante o equilíbrio das tensões de saída em relação ao ponto de referencia (ponto médio). Resultados experimentais mostram uma DHT_i de cerca de 4,5% e fator de potência 0,99.

Figura 14 - Conversor trifásico isolado com conexão Scott.



Fonte: Badin (2008).

1.3.5 Conversores híbridos

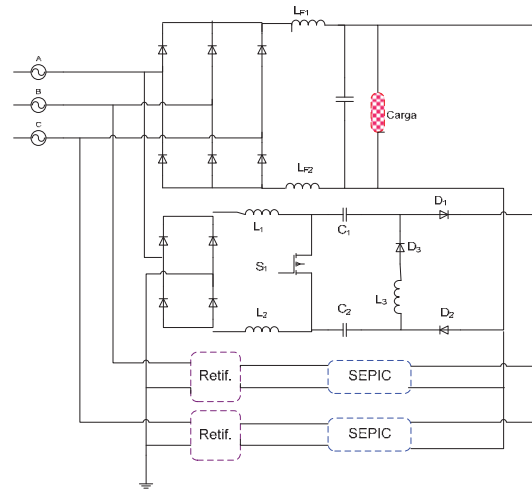
Conversores híbridos são formados basicamente por um retificador trifásico a diodo associado em paralelo com topologias chaveadas em alta frequência como topologias *Boost*, *SEPIC*, *Cúk* entre outras.

- **Conversor híbrido utilizando conversores *SEPIC*.**

O conversor híbrido apresentado na Figura 15 emprega três módulos *SEPIC* conectados a cada um dos braços de uma ponte retificadora trifásica (ponte de *Graetz*). Observa-se na estrutura que algumas modificações foram feitas no estágio *SEPIC* para que operassem de forma independente, como por exemplo, a divisão do indutor de entrada do estágio *SEPIC* em dois indutores com metade da indutância total, e também há a necessidade de diodos adicionais [4-7].

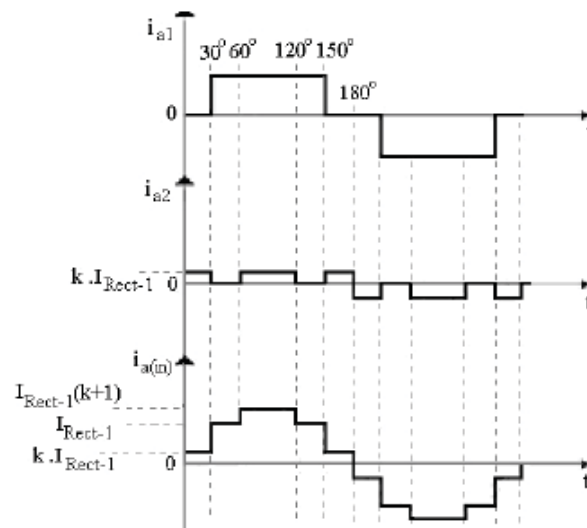
A corrente drenada para a rede é a soma instantânea da corrente que flui pela ponte trifásica e por uma corrente imposta pelo conversor *SEPIC*. Esta corrente é programável, assim, a corrente de entrada pode chegar a baixos níveis de harmônicos. De acordo com Freitas em [4], uma maneira de se obter uma corrente de entrada com 12 pulsos é somar as correntes $i_{a1}(\omega t)$ e $i_{a2}(\omega t)$, para obter a corrente de entrada na fase A da rede $i_{a(in)}(\omega t)$ como mostra a Figura 16.

Figura 15 - Conversor híbrido com conversores CC-CC SEPIC [4-7].



Fonte: Freitas (2006).

Figura 16 - Correntes para obtenção de 12 pulsos na corrente de entrada.



Fonte: Freitas (2006).

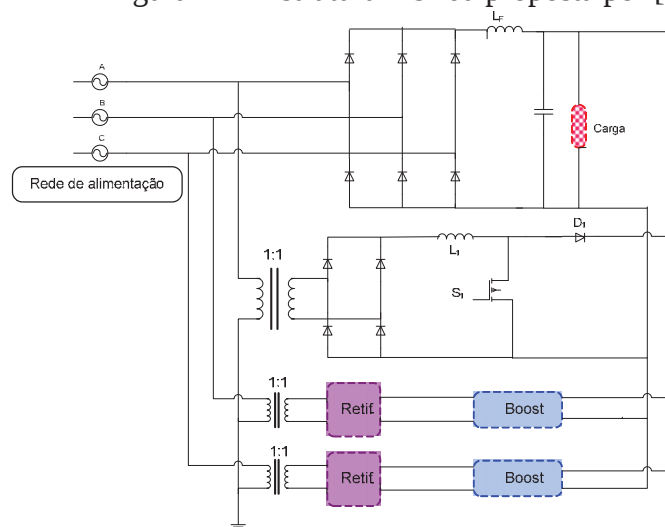
O conversor apresentado por [4-7] apresenta características de um retificador de 12 pulsos com DHT_i de corrente de 14,7 % e FP de 0,989.

É apresentado um conversor híbrido (topologia *SEPIC*) com controle digital, através de *FPGA* (*Field Programmable Gate Array*) por Freitas em [6], para gerar a corrente de referência para os conversores CC-CC, facilitando a obtenção de uma corrente senoidal na entrada da rede.

- **Conversor híbrido com topologia *Boost***

Neste caso são utilizados conversores com topologia elevadora de tensão (*Boost*). Os conversores *Boost* são alimentados por transformadores monofásicos isolando-os do sistema de potência. A potência total processada pelos conversores *Boost* é apenas uma fração da potência total, pode variar de 20 a 33%. A Figura 17 apresenta a estrutura proposta por Freitas [8].

Figura 17 – Estrutura híbrida proposta por [8].



Fonte: Freitas (2006).

Alguns resultados apresentados mostram que quando o conversor da Figura 1.24 opera como um retificador de 12 pulsos, a forma de onda a ser imposta, afim de se obter 12 pulsos na corrente de entrada, é a mesma da Figura 1.22. Obteve-se neste caso uma DHT_i de aproximadamente 14% para uma potência processada pelos conversores *Boost* de 19,2%.

Outra proposta de conversor híbrido utilizando conversores CC-CC elevadores de tensão é discutida por Font em [10]. Neste caso o estágio CC-CC elevador de tensão (*Boost*) é incorporado ao retificador trifásico não - controlado, permitindo a regulação de tensão na saída. Resultados obtidos por Font em [10] mostram que para uma potência nominal processada pela ponte retificadora de 50% e os 50 % restantes divididos entre os estágios CC-CC obtendo-se a mínima DHT_i de aproximadamente 3%.

1.4 CONCLUSÕES

Conversores multipulsos passivos vêm sendo cada vez mais explorados como uma técnica para redução do conteúdo harmônico de correntes na rede e correção do FP. Estes

conversores podem ser associados a estágios conversores CC-CC, a fim de promover a regulação da tensão e isolamento em altas frequências. Porém retificadores com duplo estágio podem elevar o nível de complexidade do sistema, além de, reduzir o rendimento global, elevando o custo do conversor. Esta técnica pode ser dita menos confiável, pois, problemas como elevadas interferências eletromagnéticas, devido o chaveamento em frequências elevadas podem ocorrer.

Retificadores multipulsos são estruturas robustas com relação a sua confiabilidade. Em aplicações onde a isolamento não é necessária a melhor opção é a utilização de conversores multipulsos não - isolados. As conexões Estrela ou Delta-diferenciais generalizadas são uma ótima opção, pois, além da vantagem do peso e volume reduzidos existe a possibilidade de escolha da tensão secundária resultante, uma vez que a tensão média é 2,34 vezes da tensão eficaz secundária de fase, possibilitando a escolha da tensão média na carga. Nestas topologias generalizadas é possível escolher qualquer valor de tensão secundária para qualquer valor de tensão de entrada. Esta é uma grande vantagem quando se pensa na utilização dos conversores multipulsos como aplicações de *retrofit*.

Capítulo 2

Retificadores trifásicos multipulsos

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas algumas estruturas multipulsos. Será dada uma atenção especial aos retificadores multipulsos não-isolados, pelo fato de ser o principal objeto de estudo desta tese.

A busca por técnicas que melhorem a eficiência de equipamentos que geram elevado conteúdo harmônico vem crescendo. Muitos métodos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos com o objetivo de melhorar a qualidade da energia na rede elétrica. Retificadores multipulsos apresentam características próprias, que proporcionam uma considerável melhoria na qualidade da energia.

Um levantamento bibliográfico bastante abrangente foi realizado, a fim de apresentar algumas das inúmeras estruturas multipulsos encontradas na literatura. Retificadores multipulsos apresentam uma significativa redução harmônica na corrente da rede promovendo um elevado FP. Além disso, apresentam baixa ondulação na tensão retificada e baixo peso e volume, quando compostos por autotransformadores (retificadores não-isolados em baixa frequência).

2.2 CONVERSORES MULTIPULSOS

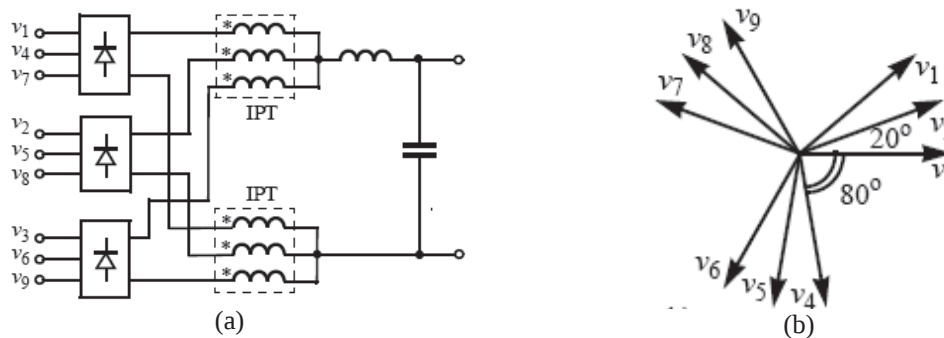
Os conversores classificados como multipulsos utilizam em sua configuração retificadora pontes trifásicas de seis pulsos. As múltiplas fases que alimentam as pontes retificadoras são balanceadas, porém com defasamento assimétrico. A Figura 18 apresenta um exemplo da configuração ponte para um conversor de 18 pulsos, observa-se que as tensões secundárias geradas nesta topologia são assimétricas, para que as pontes retificadoras operem de maneira adequada, quando conectadas em paralelo, é necessário o emprego de Indutores de Interfase (IPTs) nas saídas positivas e negativas das pontes retificadoras para conversores com topologia de transformador não-isolado. Para topologias isoladas os IPTs são necessários apenas em uma das saídas das pontes.

As principais técnicas de conversores multipulsos baseiam-se estritamente em elementos passivos, através de transformadores, autotransformadores, filtros indutivos e/ou

capacitivos, retificadores a diodos, de onda completa (*full-wave*) ou em ponte (*bridge*) e elementos adicionais chamados, transformadores ou reatores de interfase (*IPT-Interphase Transformer* ou *IPR- Interphase Reactor*). Os IPTs são usados para a conexão em paralelo das pontes retificadoras a fim de alimentar uma única carga. Estes elementos se fazem necessários para absorver as diferenças instantâneas de tensão que existem entre as pontes retificadoras, devido à defasagem existente entre as tensões secundárias. [48-52].

Conversores multipulsos são gerados a partir de grupos de conversores de seis pulsos, adequadamente defasados entre si. A defasagem dos grupos deve ser de $(60^\circ/\text{número de grupos})$, sendo que o número de pulsos destes conversores é dado por seis vezes o número de grupos. Existem ainda os dobradores de pulsos, que utilizam transformadores de interfase associados a diodos, para produzir, por exemplo, 24 pulsos a partir de uma configuração de 12 pulsos [48 - 50].

Figura 18 - Configuração da estrutura retificadora para 18 pulsos, tensões assimétrica [53].



Fonte: Sun (2008).

Para cada sistema gerado (V_1, V_4, V_7), (V_2, V_5, V_8) e (V_3, V_6, V_9) é mantida a simetria de 120° .

2.2.1 Conversores de 12 pulsos.

Os conversores de 12 pulsos podem ser isolados ou não. Quando a isolação não se faz necessária os conversores não-isolados são uma melhor opção, pois, apresentam menor peso, tamanho, volume e conseqüentemente um menor custo. Estas reduções de peso e volume se devem ao fato destes conversores usarem na sua construção autotransformadores, que processam apenas parte da potência entregue a carga reduzindo, assim, seus elementos magnéticos. Os conversores CA-CC de 12 pulsos utilizam duas pontes retificadoras de seis pulsos, que podem ser independentes, conectadas em paralelo ou em série. As pontes devem

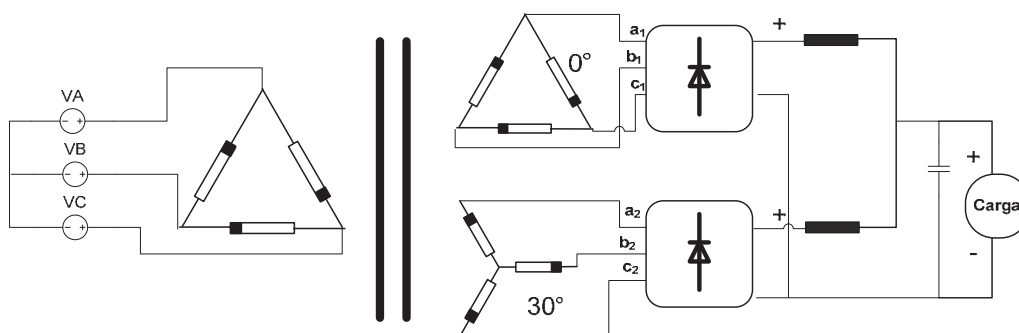
estar defasadas de 30° entre si, sendo que esta defasagem é obtida empregando diferentes conexões de transformador ou autotransformador. Conversores de 12 pulsos eliminam todos os harmônicos pares e os ímpares, exceto das ordens $J.12 \pm 1$ ($J=1, 2, 3\dots$). Conversores de 12 pulsos apresentam em geral FP de 0,98 e DHT_i de aproximadamente 14 %.

- **Isolados.**

Conversores de 12 pulsos formados pelas conexões de transformadores Estrela/Delta-Estrela ou Delta/Delta-Estrela e duas pontes completas de seis pulsos são comumente utilizado por serem de fácil construção, por este motivo são chamados de convencionais.

A Figura 19 apresenta o conversor convencional de 12 pulsos com conexão Delta/Delta-Estrela e saídas em paralelo. Este conversor apresenta uma taxa kVA (relação entre potência aparente total e potência média) de 1,03% [41]. Uma das vantagens dos conversores isolados é um menor número de IPTs.

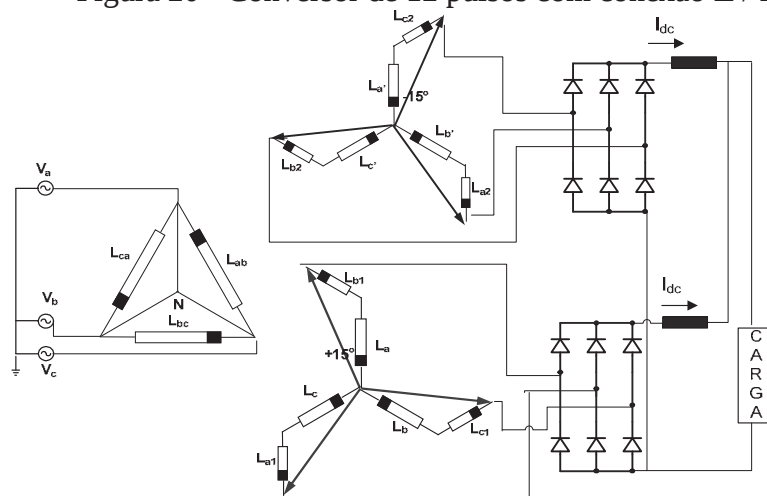
Figura 19 - Conversor de 12 pulsos convencional.



Fonte: Choi (1996).

Na Figura 20 tem-se um conversor de 12 pulsos isolado com conexão Ziguezague (Z) de transformador. O conversor possui um primário conectado em delta e secundários em Z ($\Delta / Z-Z$). Assim, têm-se dois grupos trifásicos de tensões secundárias, um defasado de $+15^\circ$ e outro de -15° com relação à tensão de fase primária. Cada um dos grupos alimenta uma ponte, logo, tem-se uma defasagem de 30° entre as tensões retificadas. A conexão Z pode ser substituída pela conexão Polígono (P).

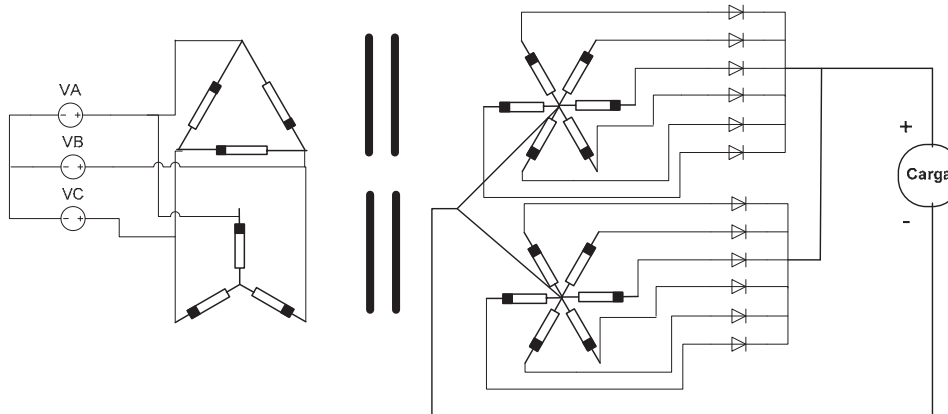
Figura 20 - Conversor de 12 pulsos com conexão Δ / Z -Z.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 21 apresenta um conversor de 12 pulsos a ponto médio (*full-wave*) este conversor apresentado por Singh e Gairola em [21] é formado por dois primários, um em Delta e outro em Estrela e dois secundários em dupla Estrela.

Figura 21 - Conversor de 12 pulsos com conexão Estrela/ dupla Estrela e Delta/ dupla Estrela.



Fonte: Singh (2004).

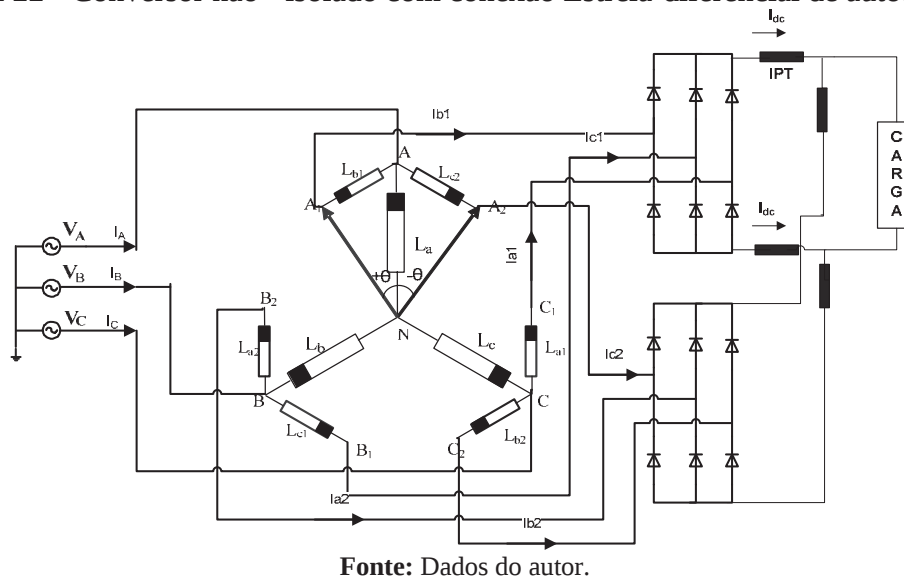
- **Não-isolados.**

Uma atenção especial deve ser dada aos conversores com topologia não isolada de transformador, estes conversores utilizam na sua construção autotransformadores, que por sua vez chegam a processar menos de 20% (taxa kVA de 0,20) da potência entregue à carga, resultando em uma diminuição no peso, volume, tamanho e custo do conversor.

A Figura 22 apresenta um conversor não - isolado de 12 pulsos com conexão Estrela-diferencial chamada de abaixadora de tensão [34, 53-55]. Existe também a conexão Estrela-diferencial elevadora de tensão. Em termos de qualidade de energia os conversores com

conexões elevadora ou abaixadora de tensão apresentam resultados semelhantes, porém a taxa kVA dos autotransformadores é diferente, 25% contra 21,3% respectivamente.

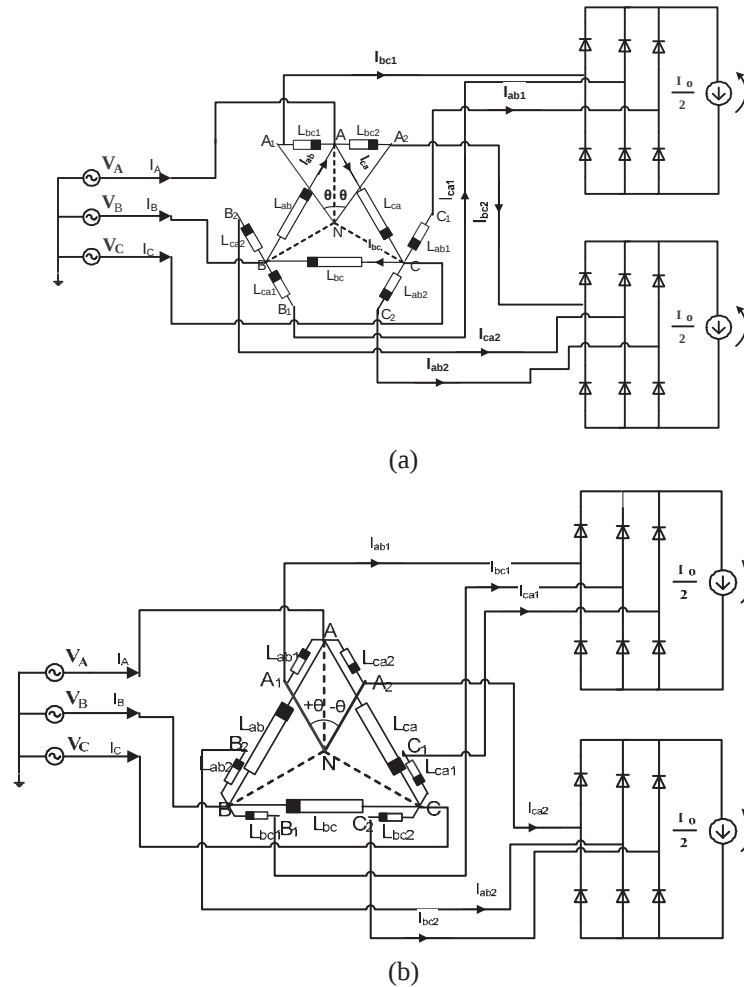
Figura 22 - Conversor não - isolado com conexão Estrela-diferencial de autotransformador.



A Figura 23 apresenta conversores não - isolados de 12 pulsos com conexões Delta - diferenciais de autotransformador [19, 38, 53]. Na Figura 23 (a) é apresentada a conexão Delta-diferencial (plana ou estendida), na qual os enrolamentos auxiliares são paralelos as respectivas bases, este autotransformador possui uma taxa kVA de 18,4%. Já na Figura 23 (b) tem-se o retificador de 12 pulsos com conexão Delta-diferencial abaixador de tensão. Nesta conexão a tensão gerada nos secundários é menor que a tensão da fonte de alimentação, neste caso a taxa kVA é de 46,4 %. Além destas duas conexões é possível obter um retificador utilizando a conexão Delta-diferencial elevadora de tensão. Neste caso os enrolamentos auxiliares são o prolongamento de seus respectivos enrolamentos primários. A taxa kVA encontrada para este autotransformador é de 52,6%.

Para que as pontes sejam conectadas em paralelo indutores de interfase devem ser conectados aos dois terminais de saída das pontes retificadoras. Estes indutores têm a função de absorver a diferença de tensão instantânea que existe devido à defasagem entre as tensões retificadas, garantindo assim, o funcionamento adequado do conversor. Os IPTs utilizados comumente são elementos passivos, porém, Lee e Enjeti em [49] apresentam um IPT ativo. Este IPT nada mais é que um estágio CC-CC acoplado às saídas retificadoras. Este indutor de interfase apresenta taxa kVA de 2%, ou seja, a potência sobre este indutor é apenas dois por cento da potência na carga.

Figura 23 - Conversores não-isolados com conexão Delta-diferencial
(a) conexão plana, (b) conexão abaixadora de tensão.

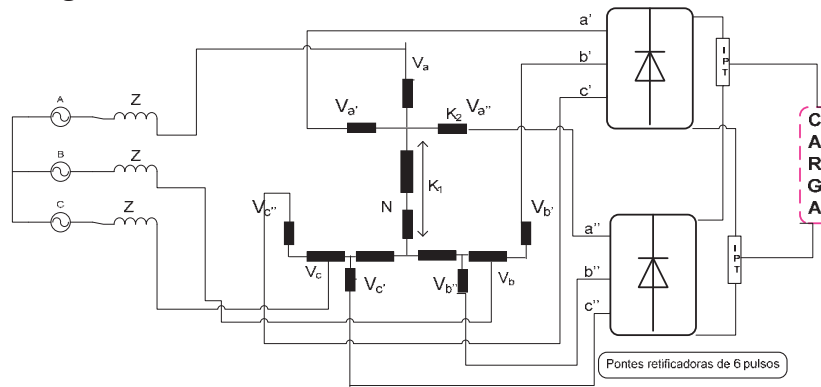


Fonte: Dados do autor.

Os componentes deste conversor possuem ótimas taxas kVA, além disso, produzem uma DHT_i menor que 1%. Logo, o conversor apresentado pode ser uma ótima interface para vários sistemas elétricos de potência.

A conexão T não isolada também pode ser utilizada na obtenção de conversores multipulsos. A Figura 24 apresenta um conversor CA-CC de 12 pulsos com a conexão T de autotransformador, este conversor apresenta duas pontes retificadoras ligadas em paralelo através de IPTs. A carga a ser alimentada pela tensão de saída do conversor é um motor VCIMD (*Vector Controlled Induction Motor Drives*) [43, 44]. De acordo com Singh e Garg em [44] a DHT_i para este conversor é de 10,8% quando em plena carga e FP de 0,985, a taxa kVA dos elementos magnéticos que constituem este conversor é de 28,3%. Em um caso mais crítico, para 20% da carga total, o conversor com conexão T apresenta DHT_i de 17%.

Figura 24 - Conversor não-isolado com conexão T de autotransformador.

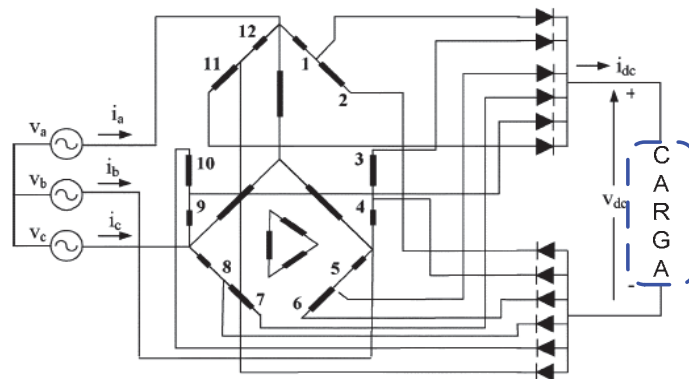


Fonte: Singh (2007).

Além da topologia conversora em ponte tem-se a topologia a ponto médio (*full-wave*), para o conversor CA-CC de 12 pulsos deve ser gerada doze tensões secundárias igualmente defasadas para alimentar os 12 diodos.

A Figura 25 apresenta um conversor a ponto médio com conexão Estrela-diferencial de autotransformador [21].

Figura 25 - Conversor não-isolado com conexão Estrela-diferencial de autotransformador a ponto médio.



Fonte: Singh (2008).

2.2.2 Conversores de 18 pulsos

Os conversores CA-CC de 18 pulsos são formados por elementos magnéticos (transformadores e IPTs) e por três pontes retificadoras trifásicas de seis pulsos (*bridge*), ou por retificação a ponto médio (*full-wave*). A defasagem entre as tensões secundárias geradas para o conversor de 18 pulsos é de 20° , caso os sistemas trifásicos gerados sejam assimétricos

(multipulsos), ou de 40° no caso dos sistemas trifásicos gerados serem simétricos (multifases) [19-21, 31-35, 42-48, 54-56].

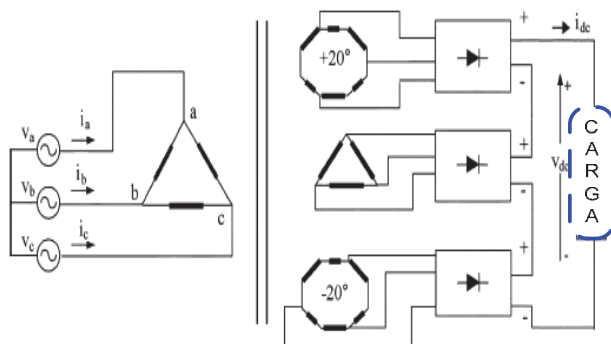
Nos casos em que os limites exigidos para DHT_i e FP são mais rigorosos o conversor de 18 pulsos é uma opção atrativa, pois apresenta melhores resultados que o de 12 pulsos e menores custo e complexidade que o de 24 pulsos [57-59].

Conversores de 18 pulsos apresentam DHT_i de 9,5 % e FP de 0,99 como valores teóricos característicos.

- **Isolados.**

A Figura 26 apresenta um conversor de 18 pulsos isolado com um primário e três secundários. O primário é conectado em Delta enquanto os secundários, adequadamente defasados entre si, apresentam duas conexões polígono (P) e uma conexão Delta com cargas associadas em série. Como resultado são produzidos 18 pulsos de tensão na saída e na corrente de entrada da rede. Além da configuração da Figura 26, outras configurações podem ser obtidas, por exemplo, conectando-se o primário em Estrela (Estrela / P-Delta-P) e/ou substituindo a conexão Polígono pela conexão Ziguezague (Z) [19-21, 22-24, 54].

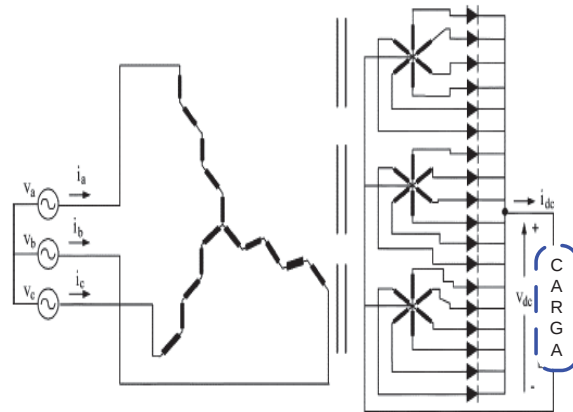
Figura 26 - Conversor de 18 pulsos isolado com conexão Δ / P- Δ -P.



Fonte: Singh (2008).

Na Figura 27 tem-se um conversor de 18 pulsos com estágio retificador em ponto médio. O conversor apresenta o primário conectado em Z e três secundários conectados em dupla Estrela, cada uma das fases dos secundários em dupla Estrela é conectada a um diodo, somando um total de 18 diodos [60].

Figura 27 - Conversor de 18 pulsos isolado com conexão Z/dupla Estrela.

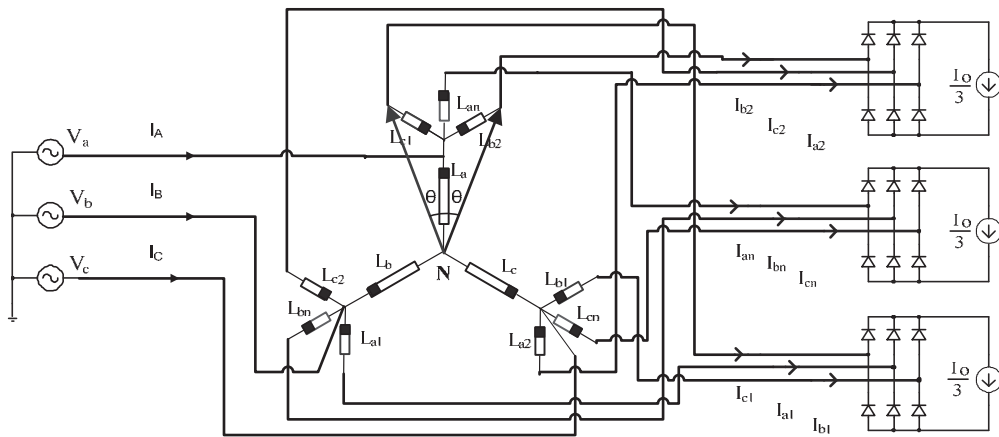


Fonte: Singh (2008).

- **Não-isolados** [34, 45, 47].

A Figura 28 apresenta um conversor de 18 pulsos com conexão de autotransformador Estrela-diferencial elevadora de tensão, ou seja, a tensão secundária é maior que a tensão da fonte de alimentação, é possível gerar também tensões secundárias com valores menores que a tensão da fonte mudando apenas as conexões dos enrolamentos. O retificador da Figura 28, apresenta taxa kVA de 33,2%. [54-57].

Figura 28 - Conversor de 18 pulsos não - isolado com conexão Estrela - diferencial elevadora de tensão.

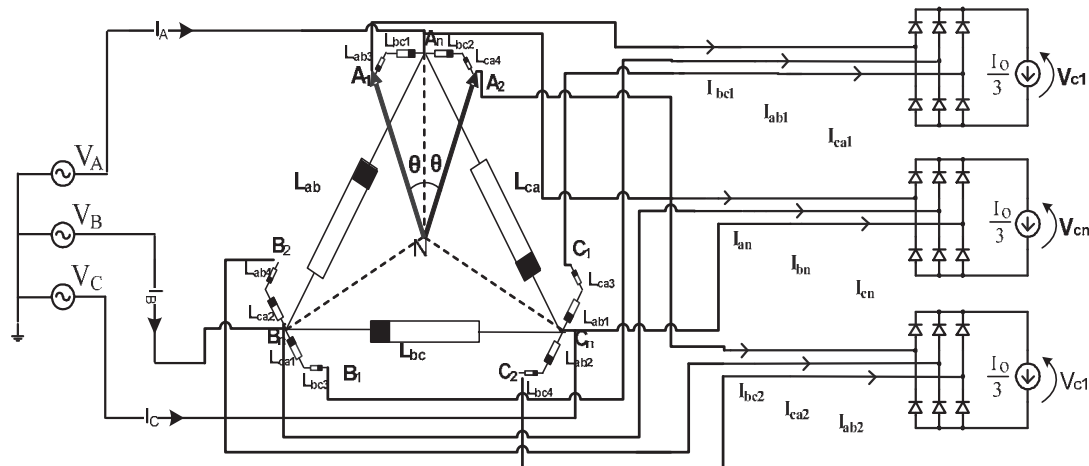


Fonte: Falcondes (2001).

A Figura 29 apresenta um conversor com conexão de autotransformador Delta-diferencial de 18 pulsos com cargas independentes. Este conversor apresenta tensões secundárias iguais à tensão da fonte de alimentação, é importante dizer que é possível obter tensões maiores ou menores que a de alimentação utilizando a conexão Delta-Diferencial

generalizada apresentada no próximo capítulo em maiores detalhes [54-58]. O retificador apresentado na Figura 29 apresenta taxa kVA de 16,9 %.

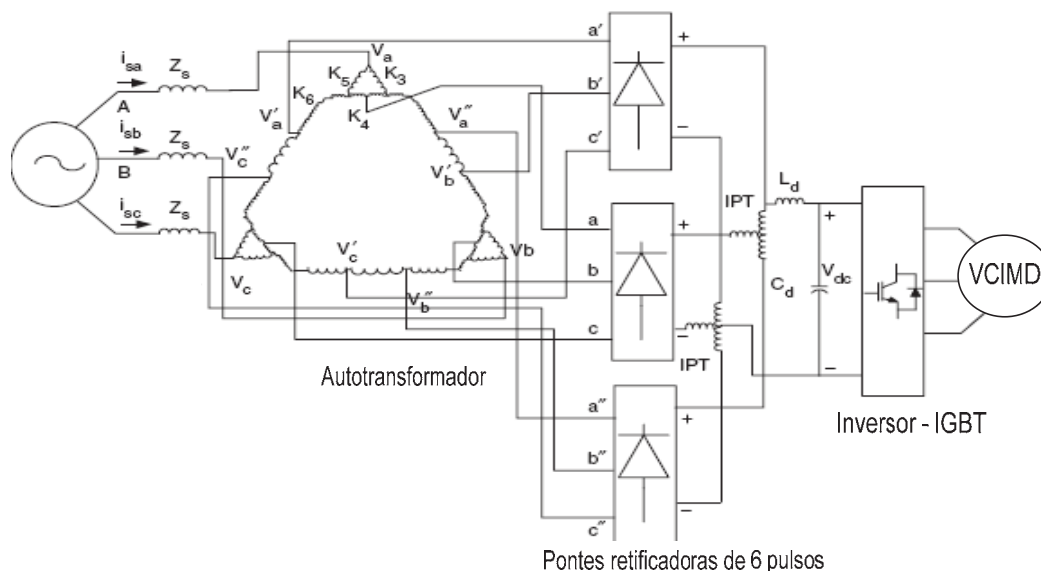
Figura 29 - Conversor de 18 pulsos não - isolado com conexão Delta-diferencial.



Fonte: Dados do autor.

Na Figura 30 é apresentada a conexão polígono não isolada [42, 59]. Este conversor pode ser utilizado como uma solução de *retrofit*, pois sua estrutura foi adaptada para este propósito segundo Singh e Bhuvaneswari [42]. O conversor apresenta taxa kVA de 27,2 %.

Figura 30 - Conversor de 18 pulsos com conexão P de autotransformador.

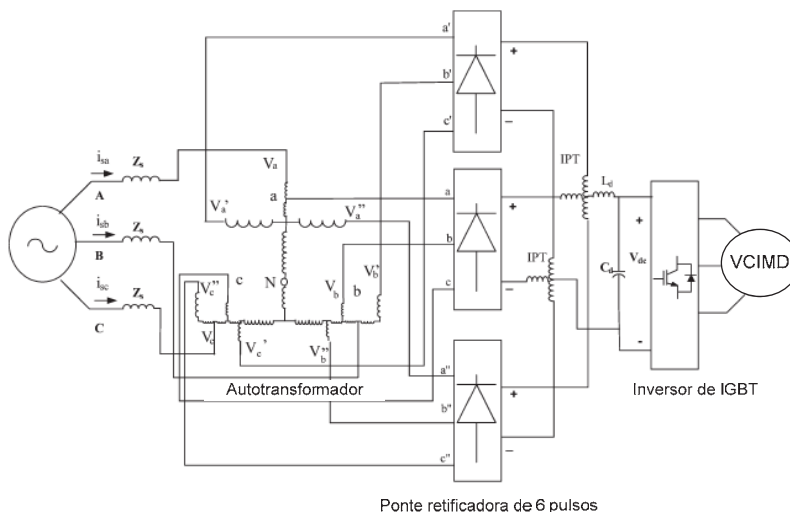


Fonte: Singh (2007).

A conexão T é mais uma das inúmeras possibilidades de topologias de autotransformadores para compor conversores multipulsos. A Figura 31 apresenta um

conversor de 18 pulsos com conexão T de autotransformador. O conversor apresenta taxa kVA de 34,3% [44].

Figura 31 - Conversor com conexão T de autotransformador.



Fonte: Singh (2007).

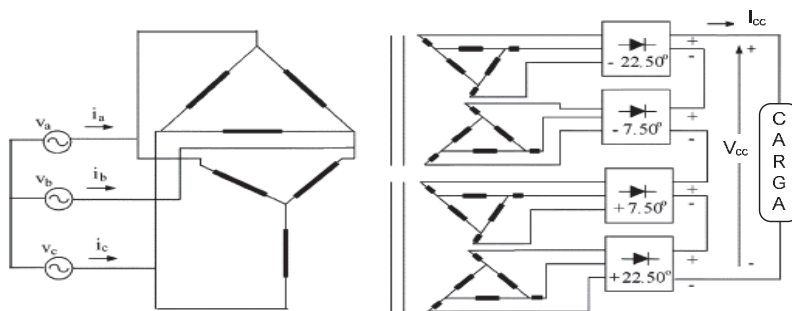
2.2.3 Conversores de 24 pulsos

Conversores de 24 pulsos são formados basicamente por quatro pontes retificadoras de seis pulsos defasadas de 15° entre si [21, 60-65]. Estes conversores apresentam DHT_1 menores que os conversores de 18 pulsos, além de gerar baixíssima ondulação na tensão de saída, porém, são de custos mais elevados recomendados em aplicações que exijam um cumprimento mais rigoroso da norma, com relação a geração de harmônicos de corrente.

- **Isolados.**

A Figura 32 apresenta um conversor isolado de 24 pulsos com dois primários, um conectado em Delta e outro em Estrela e secundários com conexão delta estendidos. As cargas são conectadas em série. São gerados quatro grupos de tensões trifásicas que alimentaram as pontes retificadoras.

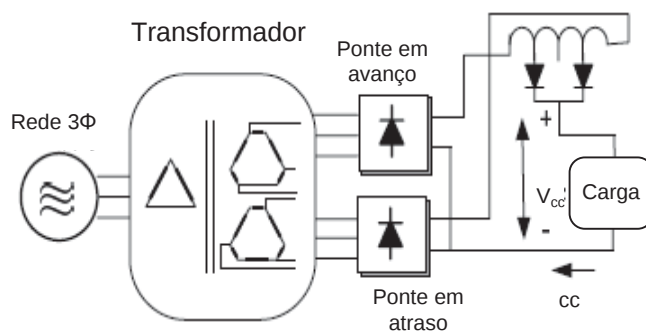
Figura - 32 Conversor de 24 pulsos isolado com conexão Delta-Estrela / Delta estendido.



Fonte: Singh (2008).

A Figura 33 apresenta um conversor de 24 pulsos, porém, utiliza-se a técnica de multiplicação de pulsos para se obter os 24 pulsos na tensão de saída e na corrente de entrada. O conversor é formado por um primário em Delta, dois secundários conectados em Polígono e duas pontes retificadoras de seis pulsos. Para a obtenção dos 24 pulsos, adiciona-se a estrutura um transformador ou indutor de interfase e dois diodos. Além da conexão P é possível construir este conversor a partir de outras topologias de 12 pulsos, como: Z, Delta estendido ou até mesmo a conexão convencional Delta / Delta-Estrela [40, 60].

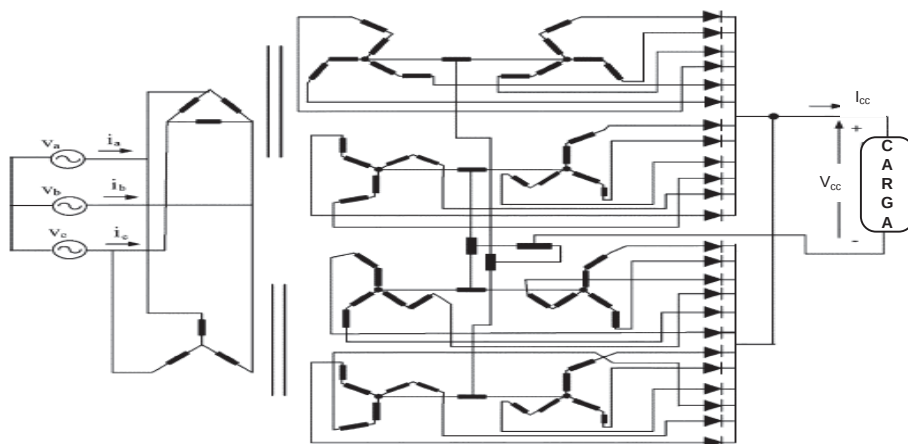
Figura 33 - Conversor de 24 pulsos isolado com conexão Delta / Delta estendido e circuito multiplicador de pulsos.



Fonte: Singh (2007).

A Figura 34 apresenta um conversor isolado de 24 pulsos com retificação a ponto médio (*full-wave*). A estrutura do conversor é composta por dois primários, sendo um conectado em Delta e o outro em Estrela, quatro secundários conectados em dupla Estrela e 24 diodos [21].

Figura 34 - Conversor isolado de 24 pulsos com conexão Delta-Estrela / Dupla Estrela.

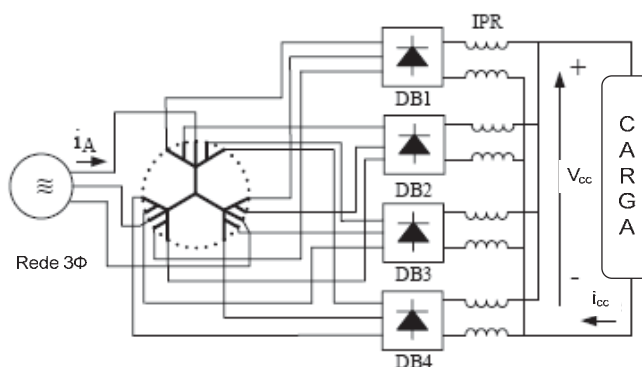


Fonte: Singh (2008).

- **Não-isolados.**

O conversor da Figura 35 é formado por um autotransformador, quatro pontes retificadoras de seis pulsos e oito indutores de interfase, também chamados de IPRs (reatores de interfase). O autotransformador gera quatro grupos de tensões trifásicas defasadas de 15° entre si. Dois destes grupos são defasados de $\pm 7,5^\circ$ com relação à tensão de entrada e os outros dois grupos são defasados de $\pm 22,5^\circ$, ou seja, entre os sistemas a defasagem é de 15° [62].

Figura 35 - Conversor de 24 pulsos não-isolado com conexão Estrela.

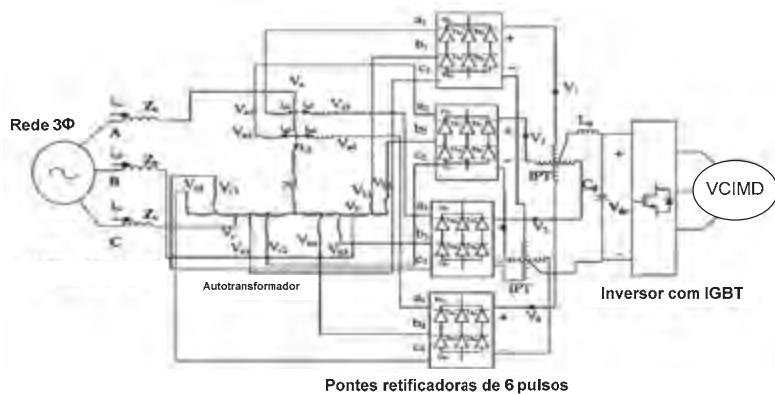


Fonte: Lee (1996).

O autotransformador utilizado neste conversor possui uma taxa kVA de 49,2%, os IPRs possuem uma taxa de 7,36%, assim a taxa dos elementos magnéticos deste conversor é de 56,56%. Além da conexão Estrela, é possível obter um conversor de 24 pulsos através de outras conexões como a Scott, Polígono, Delta entre outras [63, 64-67].

O conversor de 24 pulsos da Figura 36 utiliza a conexão T para gerar os quatro sistemas trifásicos que alimentam as pontes retificadoras e apresenta taxa kVA de 37,4% [63].

Figura 36 - Conversor de 24 pulsos não-isolado com conexão T.



Fonte: Singh (2006).

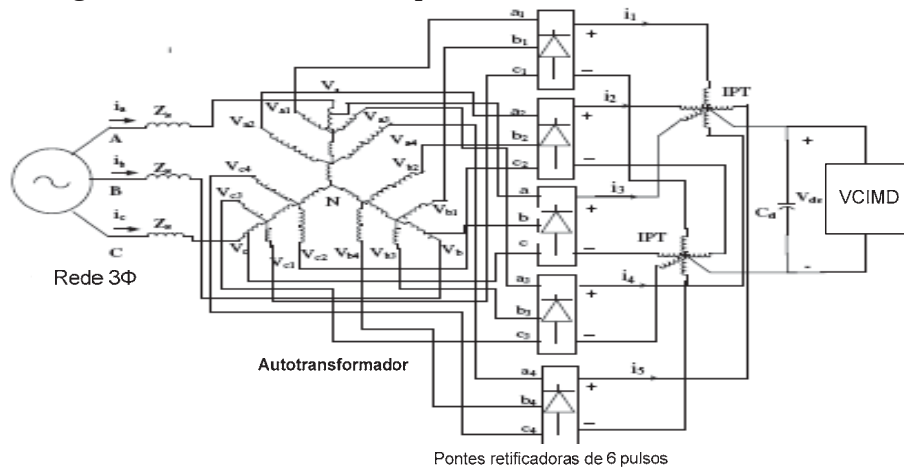
Assim, como foi apresentada para a conexão de transformador isolada, a técnica de multiplicação de pulsos também pode ser usada em conversores com topologias de transformadores não-isolados.

2.2.4 Conversores de 30 ou mais pulsos

Os conversores com 30 pulsos apresentam significativa melhoria com relação à qualidade da energia, porém, possuem circuitos mais complexos. Devido ao elevado número de pulsos, existe um considerável aumento do número de elementos, este fator se torna uma grande desvantagem quando se leva em consideração peso, volume, processo de fabricação e custos do conversor.

O conversor não-isolado de 30 pulsos apresentado na Figura 37 é formado por um autotransformador, responsável por gerar cinco conjuntos de tensões trifásicas balanceadas e defasadas de 12° entre si. Estas tensões alimentam as cinco pontes retificadoras de seis pulsos que compõe o conversor. As pontes são conectadas em paralelo através de IPTs. Os IPTs são responsáveis por garantir a independência no funcionamento das pontes proporcionando a igual divisão entre as correntes de saída. O autotransformador da Figura 37 apresenta taxa kVA de 56,2% [21, 69, 70].

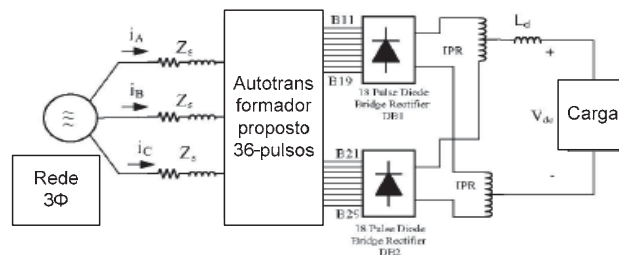
Figura 37 - Conversor de 30 pulsos não-isolado com conexão Estrela.



Fonte: Singh (2006).

A Figura 38 apresenta o esquema de um conversor isolado de 36 pulsos. O primário deste transformador é conectado em Delta e o secundário em Estrela ramificado [21, 71]. O conversor da Figura 38 é obtido através da conexão paralela de dois grupos retificadores de 18 pulsos.

Figura 38 - Conversor isolado de 36 pulsos.

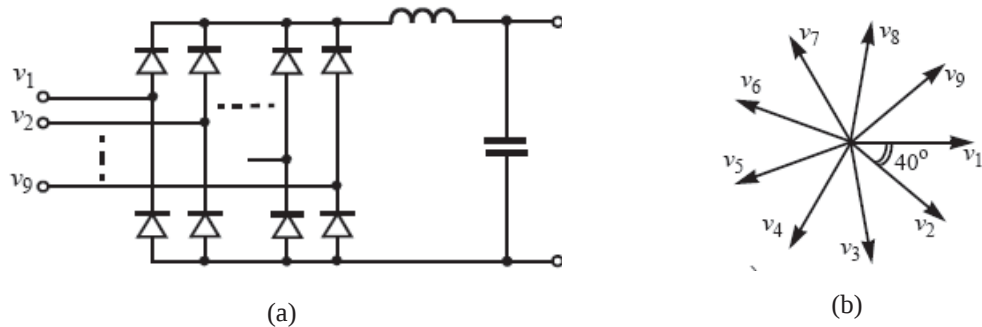


Fonte: Singh (2007).

2.3 CONVERSORES MULTIFASES

Os conversores classificados como multifases utilizam na sua configuração retificadora uma única ponte com o número de braços igual ao número de tensões secundárias geradas. A Figura 39 apresenta o esquema da ponte retificadora para um conversor de 18 pulsos, ou seja, nove fases. No caso da configuração em ponte única a defasagem entre as tensões secundárias geradas deve ser a mesma, ou seja, tensões simétricas. Além de simétricas as tensões devem ter mesma amplitude [53].

Figura 39 - Configuração em ponte única para um retificador de 18 pulsos, (a) ponte retificadora; (b) defasagem simétrica de 40° .



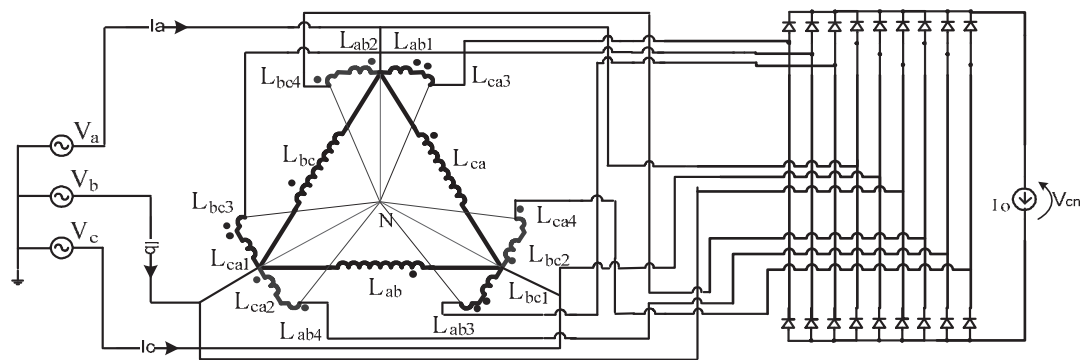
Fonte: Sun (2008).

Os conversores multifases se diferenciam dos conversores multipulsos pelo fato das tensões secundárias geradas serem de mesma amplitude e mesma defasagem entre si. O cálculo da defasagem nestes conversores é simples, devem-se dividir os 360° pelo número de fases (tensões secundárias) do retificador.

2.3.1 Conversores de nove fases

O conversor de nove fases deve apresentar defasagem de 40° entre as tensões secundárias. Foi simulado um conversor de nove fases com conexão Delta-diferencial apresentado na Figura 40. A taxa kVA para este autotransformador é de 55,8%.

Figura 40 - Conversor de 18 pulsos (nove fases) com defasagem simétrica de 40° e conexão Delta-diferencial.



Fonte: Dados do autor.

A Tabela 1 apresenta um resumo das topologias apresentadas com relação a taxa kVA para os autotransformadores de cada uma.

Tabela 1 – Taxa kVA.

Conversores Multipulsos (não-isolados)		
Nº de Pulsos	Fig.	Taxa kVA (%)
12	2.6	21,3
	2.7(a)	18,4
	2.7(b)	46,4
	2.9	28,3
18	2.13	33,2
	2.14	16,9
	2.15	27,2
	2.16	34,3
24	2.20	49,2
	2.21	37,4
30	2.22	56,2
Conversores Multifases		
9 fases	2.25	55,8

Fonte: dados do autor

2.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi dada uma atenção especial aos retificadores multipulsos em ponte não-isolados. Uma grande preocupação com relação a estas estruturas retificadoras é o peso e volume que elas apresentam. Em estruturas multipulsos isoladas não é possível obter redução destes parâmetros. Assim, uma atenção maior é dada aos conversores multipulsos não-isolados. Estes conversores apresentam em sua estrutura autotransformadores que em alguns casos processam 20% ou menos da potência entregue a carga diminuindo, assim, peso, volume e custo do conversor. A Tabela 1 apresenta alguns valores de taxa kVA para as estruturas conversoras. Observa-se da tabela que o retificador que apresenta menor taxa kVA é o retificador de 18 pulsos com conexão Delta-diferencial. Assim, quando o isolamento não é necessário, conversores não-isolados se tornam uma opção mais atrativa.

Conversores com múltiplos pulsos (multipulsos ou multifases) vêm sendo cada vez mais explorados. Um indicativo são os inúmeros trabalhos publicados e a quantidade de diferentes conexões apresentadas neste capítulo. Eles apresentam grande robustez e confiabilidade, são de baixo custo, pois são formados por elementos passivos (diodos) e não

requerem técnicas de controle. A complexidade está nos transformadores especiais utilizados para gerar as tensões e defasagens necessárias para a composição dos pulsos. Podem ser utilizados como *retrofit* em inversores de frequência substituindo a ponte retificadora convencional de seis pulsos presente nestes inversores. Este é um método seguro e eficaz de redução de harmônicos, melhorando assim a qualidade da energia na rede elétrica. Para conversores com mais de 30 pulsos, a complexidade de implementação cresce, devido ao número grande de enrolamentos secundários necessários para gerar as tensões secundárias. Conversores assim, são de difícil construção e dificilmente poderiam ser reproduzidos em escala.

Capítulo 3

Estudo das conexões diferenciais generalizadas de autotransformador

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas topologias Estrela e Delta - diferenciais de autotransformador para retificadores de 12 e 18 pulsos. A partir de diagramas fasoriais, é apresentado o equacionamento detalhado para estas topologias, a fim de se obter valores de tensão e corrente para todos os enrolamentos.

É válido observar que as conexões de autotransformador apresentadas e analisadas são conexões chamadas generalizadas, pois permitem a escolha de qualquer tensão média na carga. Característica importante quando se pensa em *retrofit*, ou seja, a substituição de um retificador convencional (seis pulsos), que apresenta grandes problemas de qualidade de energia, por um retificador multipulso sem alterar a estrutura do sistema.

Um ponto importante deste capítulo é a análise da tensão e corrente para as diferentes configurações dos secundários do autotransformador, para as topologias Estrela e Delta - diferenciais, a fim de obter tensões e ângulos necessários para a operação em 12 ou 18 pulsos.

Para a topologia Delta-diferencial são apresentadas três configurações de conexão dos enrolamentos secundários, qualquer uma dessas configurações permite a escolha de qualquer tensão secundária para qualquer tensão de entrada. Para a topologia Estrela foram encontradas apenas duas configurações distintas para os enrolamentos secundários. É apresentado o equacionamento, passo a passo, para uma configuração de cada topologia.

Para as demais configurações são apresentadas apenas as equações finais, uma vez que as demais expressões podem ser obtidas seguindo os mesmos passos dos exemplos apresentados anteriormente. Os equacionamentos das diferentes configurações, tanto para conexão Delta quanto para a Estrela, serão de grande importância para o desenvolvimento da metodologia de projeto para os retificadores multipulsos com conexões diferenciais proposta deste trabalho e que será apresentada no próximo capítulo.

3.2 TOPOLOGIA ESTRELA

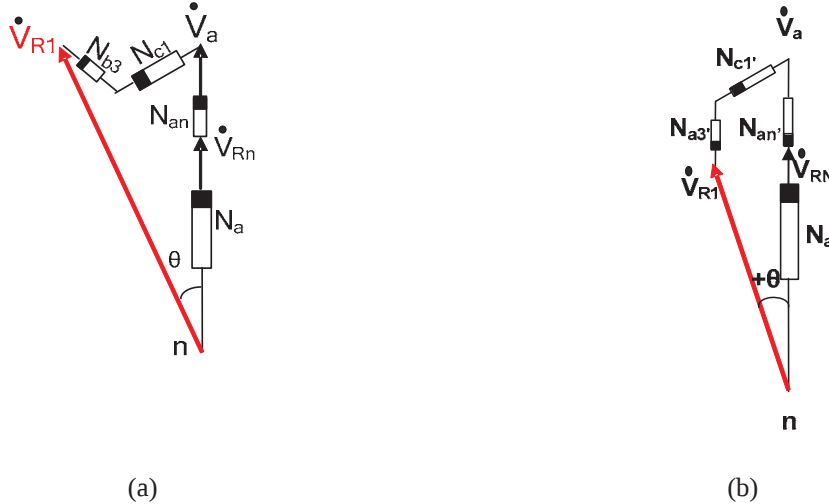
Existem duas formas de se obter os conjuntos de tensões resultantes, os quais representam cada um dos sistemas trifásicos secundários (V_{R1} , V_{R2} , V_{RN}), ilustrados na Figura

41. A primeira forma, apresentada na literatura, é aquela que utiliza os enrolamentos auxiliares N_{c1} e N_{b3} (para gerar a tensão V_{R1}) como mostra a Figura 41 (a), N_{b2} e N_{c4} (para gerar V_{R2}), N_{b1} e N_{a3} (para gerar V_{T1}), N_{a2} e N_{b4} (para gerar V_{T2}), N_{a1} e N_{c3} (para gerar V_{S1}) e N_{c2} e N_{a4} (para gerar V_{S2}) denominada neste trabalho como configuração [57].

A segunda maneira de se obter as tensões secundárias resultantes é utilizando os enrolamentos auxiliares N_{c1} e N_{a3} (para gerar V_{R1}) como mostra a Figura 41 (b), N_{b2} e N_{a4} (para gerar V_{R2}), N_{b1} e N_{c3} (para gerar V_{T1}), N_{a2} e N_{c4} (para gerar V_{T2}), N_{a1} e N_{b3} (para gerar V_{S1}) e N_{c2} e N_{b4} (para gerar V_{S2}), denominada como configuração B.

Para o conversor de 18 pulsos além dos dois sistemas trifásicos, é necessário um terceiro sistema em fase com a rede e o sistema de tensões primário. Assim, para se obter este terceiro sistema, é necessário apenas somar os enrolamentos auxiliares N_{an} , N_{bn} e N_{cn} , aos seus respectivos enrolamentos primários N_a , N_b e N_c .

Figura 41 - Conexão Estrela-diferencial para tensão resultante V_{R1} .
(a) Configuração A; (b) Configuração B.



Fonte: Dados do autor.

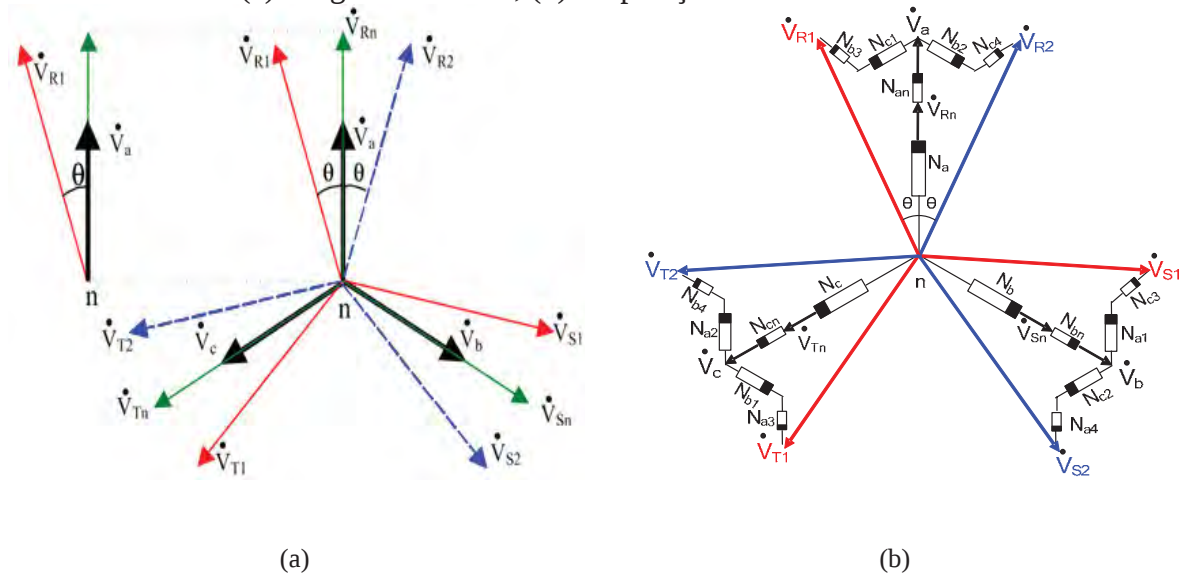
3.2.1 Análise para configuração A

As tensões V_{c1} e V_{b3} , sobre os enrolamentos auxiliares N_{c1} e N_{b3} são paralelas às tensões V_c e V_b , respectivamente, elas são necessárias para a obtenção da tensão resultante V_{R1} . O mesmo raciocínio vale para obter as demais tensões secundárias resultantes [34, 54].

A Figura 42 (a) apresenta o diagrama fasorial do sistema trifásico de tensões primárias (V_a , V_b e V_c) e os sistemas trifásicos de tensões secundárias defasadas, chamados (V_{R1} , V_{S1} e V_{T1}) para o sistema em avanço e (V_{R2} , V_{S2} e V_{T2}) para o sistema em atraso. O ângulo θ determina a operação do conversor em 12 pulsos ($\theta = 15^\circ$) ou 18 pulsos ($\theta = 20^\circ$). O

conversor de 18 pulsos requer também um sistema trifásico de tensões em fase com o primário. Este sistema é denotado por (V_{Rn} , V_{Sn} e V_{Tn}). A Figura 42 (b) apresenta uma maneira de como devem ser feitas as conexões dos enrolamentos secundários no caso da conexão Estrela-diferencial generalizada para um conversor de 18 pulsos. No caso do conversor 12 de pulsos os enrolamentos de índices “n” não são necessários.

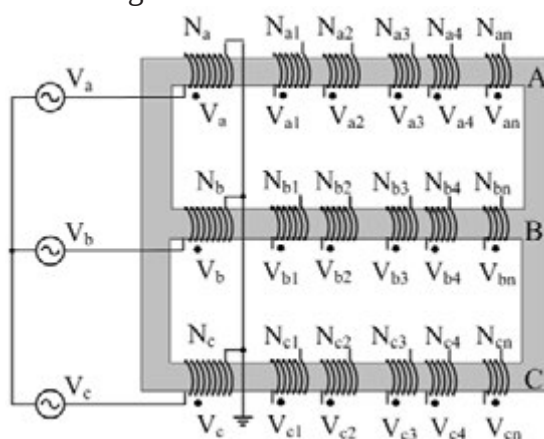
Figura 42 - Conexão Estrela-diferencial Generalizada configuração A
(a) Diagrama fasorial; (b) Disposição dos enrolamentos.



Fonte: Fernandes (2011).

A Figura 43 representa o núcleo magnético trifásico, com primário conectado em Estrela. As espiras N_a , N_b e N_c são enroladas nas pernas A, B e C respectivamente, e os secundários são compostos por 15 enrolamentos para o conversor de 18 pulsos e 12 enrolamentos para o conversor de 12 pulsos. Os enrolamentos secundários com índices “a” são montados sobre a perna A, enquanto os enrolamentos com índices “b” e “c” são posicionados sobre as pernas B e C respectivamente. Uma das formas de se conectar os enrolamentos da Figura 43 está representada na Figura 42 (b).

Figura 43 – Núcleo magnético e bobinas do autotransformador.



Fonte: Gonçalves (2006).

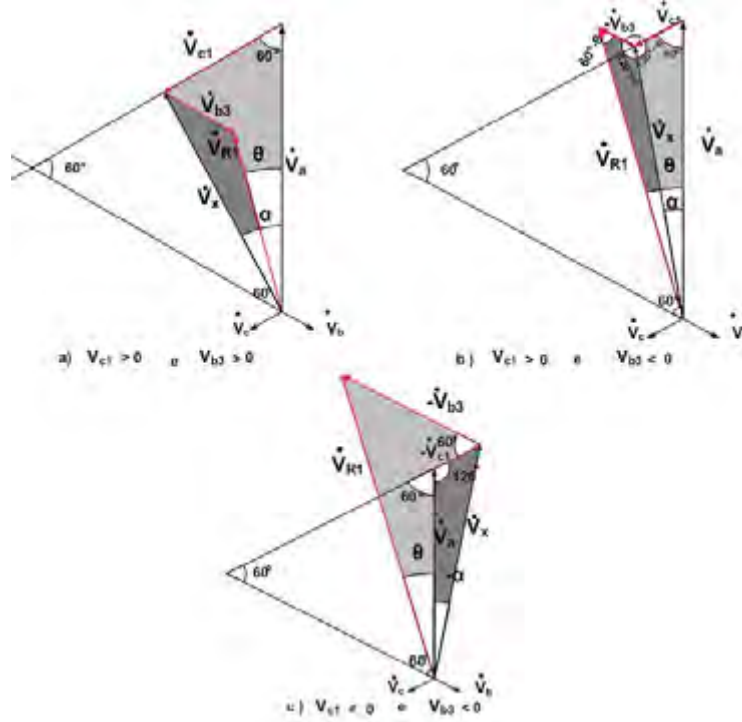
Esta configuração é chamada de genérica, pois, a partir dela podem-se gerar conexões elevadoras ou abaixadoras de tensão para conversores de 12 e 18 pulsos com topologia Estrela-diferencial. A tensão através dos enrolamentos é representada com o mesmo índice usado para designar o enrolamento, por exemplo: V_{a1} corresponde à tensão sobre o enrolamento N_{a1} . É importante mencionar que o índice n (por exemplo, N_{an}) é em relação ao ponto neutro e não denota o n ésimo enrolamento.

A Figura 44 apresenta os diagramas fasoriais para três casos possíveis de conexão dos enrolamentos secundários, quando a tensão sobre os enrolamentos auxiliares são positivas, quando uma é positiva e outra é negativa e quando as duas são negativas.

- **Para $V_{c1} > 0$ e $V_{b3} > 0$.**

Quando V_{c1} e V_{b3} são positivas a Figura 43(a) representa o diagrama fasorial para esta situação. A partir do diagrama da Figura 44(a) e aplicando a lei dos senos nos triângulos em destaque se obtêm as expressões (1) e (2). Nestas expressões a tensão V_x representa uma tensão auxiliar entre o ponto neutro, e o ponto comum aos enrolamentos N_{c1} e N_{b3} . O ângulo chamado de α (ângulo auxiliar) é definido como o ângulo entre as tensões V_x e V_a (tensão de referência).

Figura 44 - Diagramas fasoriais para a topologia Estrela-diferencial generalizada com configuração A.



Fonte: Gonçalves (2006).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(120^\circ + \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(60^\circ - \alpha)} = \frac{V_{b3}}{\text{sen}(\alpha - \theta)} \quad (1)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(60^\circ)} = \frac{V_a}{\text{sen}(120^\circ - \alpha)} = \frac{V_{c1}}{\text{sen}(\alpha)} \quad (2)$$

Neste caso a tensão resultante (V_{R1}) é sempre menor que a tensão de entrada, ou seja, se tem uma conexão abaixadora (*step-down*).

- **Para $V_{c1} > 0$ e $V_{b3} < 0$.**

Quando a tensão V_{b3} é negativa, o enrolamento N_{b3} tem sua polaridade invertida, neste caso o ângulo α esta entre θ e 0° e a tensão secundária resultante pode ser maior, menor ou igual à tensão de entrada. O diagrama fasorial que representa esta segunda situação é apresentado na Figura 44(b).

A partir dos triângulos em destaque na Figura 44(b) obtêm as expressões (3) e (4).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(60^\circ)} = \frac{V_a}{\text{sen}(120^\circ - \alpha)} = \frac{V_{c1}}{\text{sen}(\alpha)} \quad (3)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(60^\circ - \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(120^\circ + \alpha)} = \frac{-V_{b3}}{\text{sen}(\theta - \alpha)} \quad (4)$$

- **Para $V_{c1} < 0$ e $V_{b3} < 0$.**

Neste caso, V_{c1} e V_{b3} assumem valores negativos e α varia de 0° a -60° . A tensão V_{R1} é maior que a tensão de entrada, ou seja, tem-se a conexão elevadora de tensão (*step-up*). A Figura 44(c) mostra o diagrama fasorial para esta condição, e as expressões associadas a este diagrama são (5) e (6).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(120^\circ)} = \frac{V_a}{\text{sen}(60^\circ + \alpha)} = \frac{-V_{c1}}{\text{sen}(-\alpha)} \quad (5)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(60^\circ - \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(120^\circ + \alpha)} = \frac{-V_{b3}}{\text{sen}(\theta - \alpha)} \quad (6)$$

Considerando as expressões de (1) a (6) e usando identidades trigonométricas é possível obter uma única expressão que descreve as tensões através dos enrolamentos secundários em função da tensão de referência (V_a) e dos ângulos α (ângulo auxiliar) e θ . Esta expressão é apresentada em (7), a partir dela é possível obter os valores para as tensões V_{R1} , V_{c1} e V_{b3} conhecendo-se os ângulos α e θ e a tensão de entrada V_a .

$$V_a \cdot \frac{\text{sen}(60^\circ)}{\text{sen}(120^\circ - \alpha)} = V_{c1} \cdot \frac{\text{sen}(60^\circ)}{\text{sen}(\alpha)} = V_{R1} \cdot \frac{\text{sen}(120^\circ + \theta)}{\text{sen}(60^\circ - \alpha)} = V_{b3} \cdot \frac{\text{sen}(120^\circ + \theta)}{\text{sen}(\alpha - \theta)} \quad (7)$$

O ângulo auxiliar α_Y é obtido através de (8).

$$\alpha_Y = \arctg \left[\frac{3 \cdot V_a}{2 \cdot V_{R1} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos(\theta) - \text{sen}(\theta)) - \sqrt{3} \cdot V_a} \right] - \frac{\pi}{3} \quad (8)$$

3.2.2 Análise para configuração B

A Figura 45 apresenta uma segunda forma de se conectar os enrolamentos secundários do autotransformador, afim de, se obter um conversor de 18 pulsos com conexão Estrela-diferencial chamada de configuração B. A Figura 46 apresenta os diagramas fasoriais para esta configuração. Observa-se que quando esta configuração é utilizada existem apenas duas opções ($V_{c1}' > 0$, $V_{a3}' > 0$ e $V_{c1}' > 0$, $V_{a3}' < 0$) para se obter tensões resultantes maiores, menores ou iguais a tensão de referencia (V_a).

A partir do diagrama fasorial da Figura 46, é possível encontrar os valores para as tensões sobre os enrolamentos auxiliares e para as tensões resultantes.

Para a configuração A foi realizado o desenvolvimento matemático a partir dos diagramas fasoriais, a fim de se obter uma única expressão que representasse a tensão sob todos os enrolamentos do autotransformador e, também, a tensão resultante para os

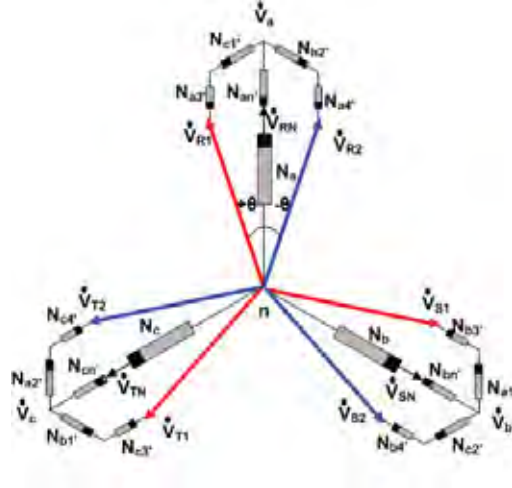
retificadores de 12 e 18 pulsos. O mesmo foi feito para a configuração B, porém, como os passos do desenvolvimento matemático são os mesmos, neste caso é apresentada diretamente a expressão generalizada (única). Portanto, em (9) é apresentada a expressão generalizada para a configuração B.

$$V_a \cdot \frac{\sin(60^\circ)}{\sin(120^\circ - \alpha)} = V_{c1'} \cdot \frac{\sin(60^\circ)}{\sin(\alpha)} = V_{R1} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(180^\circ - \alpha)} = V_{a3'} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\alpha - \theta)} \quad (9)$$

O ângulo auxiliar α_V é calculado através de (10).

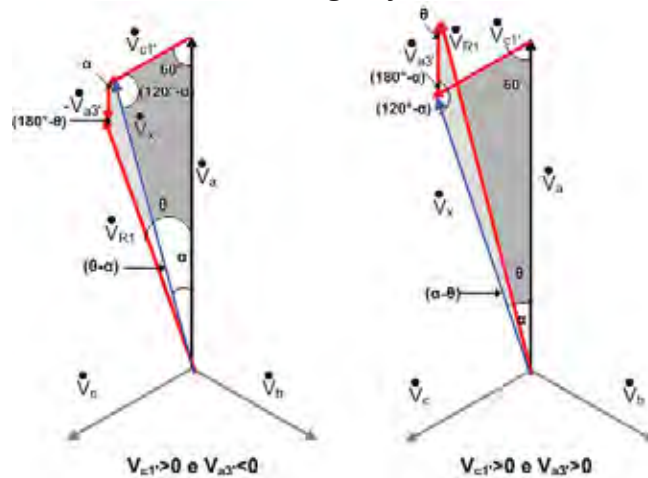
$$\alpha_V = \arctg \left[\frac{\sqrt{3} \cdot V_{R1} \cdot \sin(\theta)}{\sqrt{3} \cdot V_a - V_{R1} \cdot \sin(\theta)} \right] \quad (10)$$

Figura 45 - Enrolamentos para topologia Estrela-diferencial com configuração B.



Fonte: Dados do autor.

Figura 46 - Diagramas fasoriais para a topologia Estrela-diferencial generalizada com configuração B.



Fonte: Dados do autor.

3.2.3 Enrolamentos auxiliares para o retificador de 18 pulsos

Os retificadores de 18 pulsos necessitam de um terceiro sistema trifásico de tensões secundárias, o qual está em fase com o primário e com a rede. As tensões do sistema adicional V_{Rn} , V_{Sn} e V_{Tn} devem ter o mesmo valor, em módulo, das tensões dos sistemas defasados de $+20^\circ$ (V_{R1} , V_{S1} , V_{T1}) e de -20° (V_{R2} , V_{S2} , V_{T2}). Assim, o enrolamento N_{an} é montado na mesma perna do enrolamento N_a , e gera a tensão V_{an} que está em fase com a tensão V_a , o mesmo é válido para os enrolamentos N_{bn} e N_{cn} . A amplitude da tensão através de N_{an} ou $N_{an'}$ para o retificador com configuração B é apresentada na equação (11).

$$V_{an} = V_{R1} - V_a \quad (11)$$

É importante lembrar que o conversor de 12 pulsos não requer esses enrolamentos adicionais, pois possuem apenas dois sistemas um adiantado de $+15^\circ$ e outro atrasado de -15° .

3.2.4 Relações de espiras

As relações de espiras entre os enrolamentos do autotransformador são obtidas através das relações entre as tensões aplicadas sobre os enrolamentos primários e secundários. A relação K_a é definida para a configuração A e a relação $K_{a'}$ para a configuração B, como se pode ver na expressão (12).

$$K_a = \frac{N_a}{N_{an}} = \frac{V_a}{V_{an}} \quad K_{a'} = \frac{N_a}{N_{an'}} = \frac{V_a}{V_{an'}} \quad (12)$$

A relação entre V_a e V_{c1} ou $V_{c1'}$ define K_b e $K_{b'}$, respectivamente, como é mostrado em (13)

$$K_b = \frac{N_a}{N_{c1}} = \frac{V_a}{V_{c1}} \quad K_{b'} = \frac{N_a}{N_{c1'}} = \frac{V_a}{V_{c1'}} \quad (13)$$

Finalmente a equação (14) apresenta as relações entre V_a e V_{b3} , que define K_c e a relação entre V_a e V_{a3} , que define $K_{c'}$.

$$K_c = \frac{N_a}{N_{b3}} = \frac{V_a}{V_{b3}} \quad K_{c'} = \frac{N_a}{N_{a3}} = \frac{V_a}{V_{a3}} \quad (14)$$

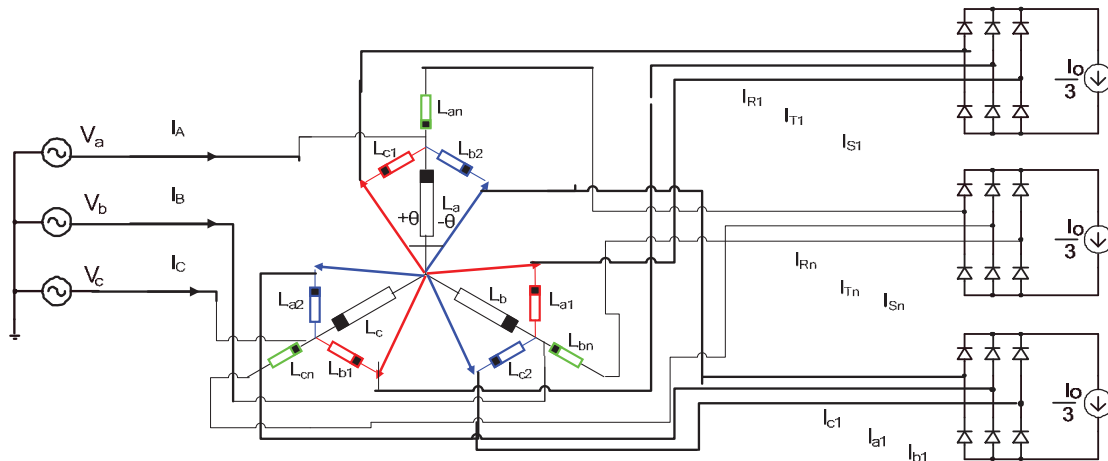
3.2.5 Conexões Particulares

Como apresentado anteriormente às expressões de (1) a (12) descrevem toda a família dos retificadores com topologias Estrela-diferencial de 12 e 18 pulsos. Porém, existem quatro conexões particulares, duas para o retificador de 12 e duas para o retificador de 18 pulsos, derivadas das conexões apresentadas. Nestes casos existe uma relação fixa entre as tensões de entrada e de saída para cada estrutura obtida, além disso, o número de enrolamentos é menor.

- **Conexão Estrela-diferencial abaixadora de tensão (*step-down*).**

A Figura 47 apresenta o caso particular da conexão generalizada, a tensão secundária resultante é fixa e menor que a tensão de entrada.

Figura 47 - Conversor de 18 pulsos com conexão particular Estrela-diferencial abaixadora de tensão.



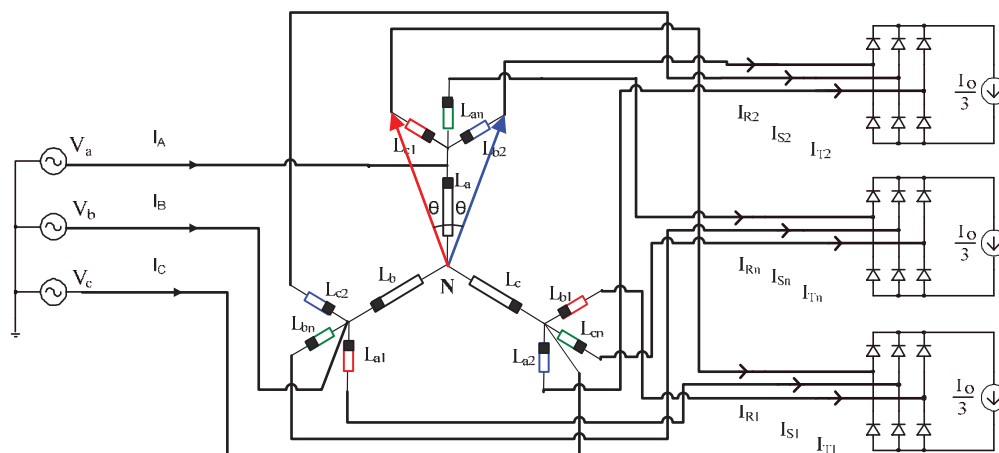
Fonte: Seixas (2001).

Esta conexão é obtida quando $K_c=0$, ou seja, os enrolamentos N_{b3} ou N_{a3} são eliminados, para este caso tem-se $V_{b3}=0$ ou $V_{a3}=0$ e $\alpha=\theta$.

- **Conexão Estrela-diferencial elevadora de tensão (*step-up*).**

Esta conexão é obtida quando $K_b=0$, ou seja, o enrolamento N_{c1} é eliminado para este caso tem-se $V_{c1}=0$ e $\alpha=0^\circ$. A Figura 48 apresenta o caso particular da conexão generalizada, onde a tensão resultante nos secundários é fixa, maior que a tensão de entrada.

Figura 48 - Conversor de 18 pulsos com conexão particular Estrela-diferencial elevadora de tensão.



Fonte: Seixas (2001).

3.2.6 Análise das correntes

Serão apresentadas as formas de onda das correntes em todos os enrolamentos do autotransformador e também as correntes na rede de alimentação para os retificadores com conexão Estrela-diferencial de 12 e 18 pulsos para as configurações apresentadas. O retificador de 12 pulsos é formado por duas pontes retificadoras de seis pulsos, assim, possui dois grupos de correntes secundárias um em avanço de 15° e um em atraso de 15° que conduzem $1/2$ da corrente de carga. O retificador de 18 pulsos é formado por três pontes retificadoras, logo, possui três grupos de correntes secundárias um em avanço de 20° um em atraso de 20° e por fim um terceiro em fase com as correntes primárias e as correntes na rede, cada ponte conduz $1/3$ da corrente de carga.

A Figura 49 apresenta um retificador de 18 pulsos com conexão Estrela-diferencial generalizada, na configuração A. Como exemplo, nesta figura está indicado as correntes nos enrolamentos secundários, primários e na rede de alimentação.

O mesmo esquema da Figura 49 pode ser apresentado para a configuração B basta substituir o autotransformador.

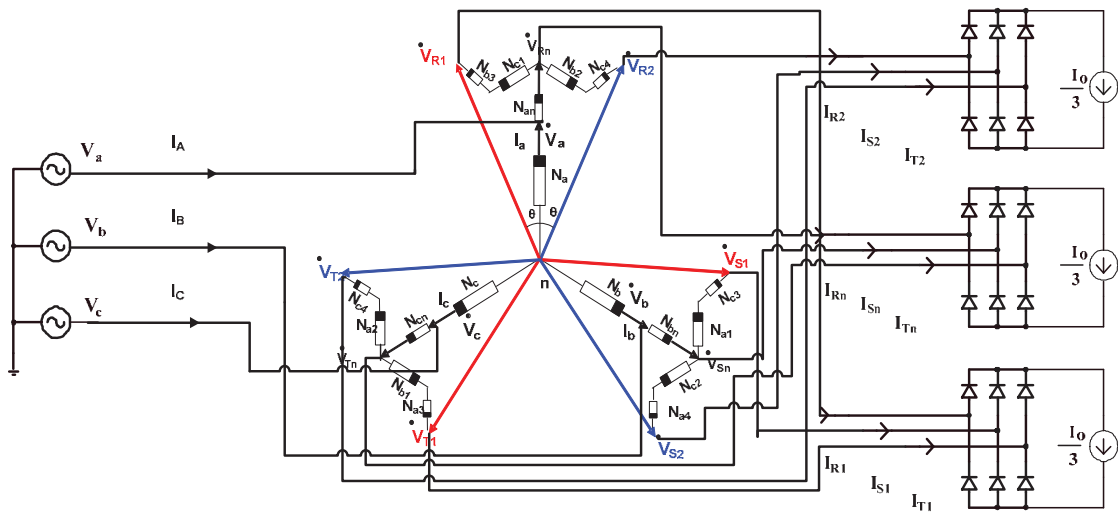
- **Análise das correntes nos secundários.**

As formas de onda das correntes secundárias podem ser decompostas em Séries de Fourier, através da composição de senos e cossenos, de maneira convencional. O cálculo e as formas de onda das correntes secundárias são os mesmos para as duas topologias Estrela apresentadas. A Figura 50 apresenta as formas de onda das correntes nos enrolamentos

secundários dos retificadores de 12 e 18 pulsos para o grupo em avanço de 15° e 20° respectivamente. A Figura 50 (a) apresenta as correntes para um retificador de 12 pulsos e a Figura 50 (b), para um retificador de 18 pulsos.

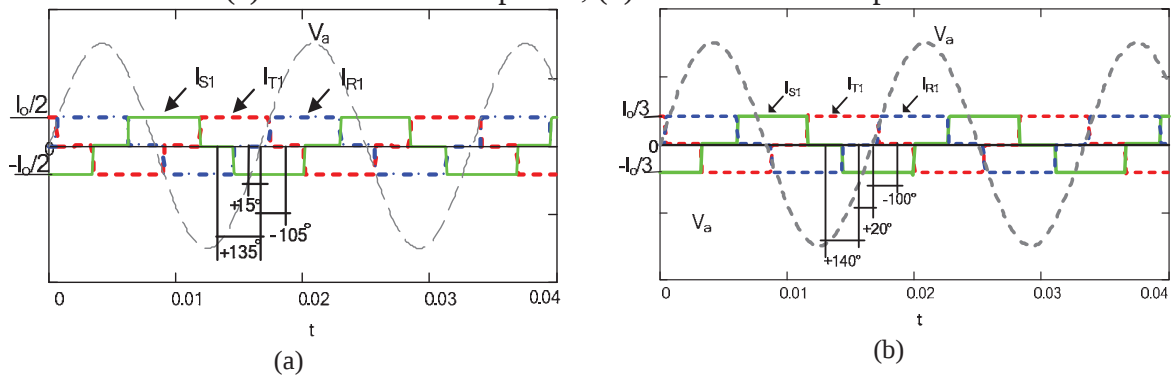
As expressões que representam as formas de onda da Figura 50 são apresentadas em (15). As correntes I_{R1} , I_{S1} e I_{T1} circulam através dos enrolamentos com índices “1” e “3” que geram o sistema trifásico em avanço de θ .

Figura 49 - Conversor de 18 pulsos com conexão Estrela-diferencial generalizada.



Fonte: Dados do autor.

Figura 50 - Correntes secundárias para o sistema em avanço
(a) Retificador de 12 pulsos; (b) Retificador de 18 pulsos.



Fonte: Dados do autor.

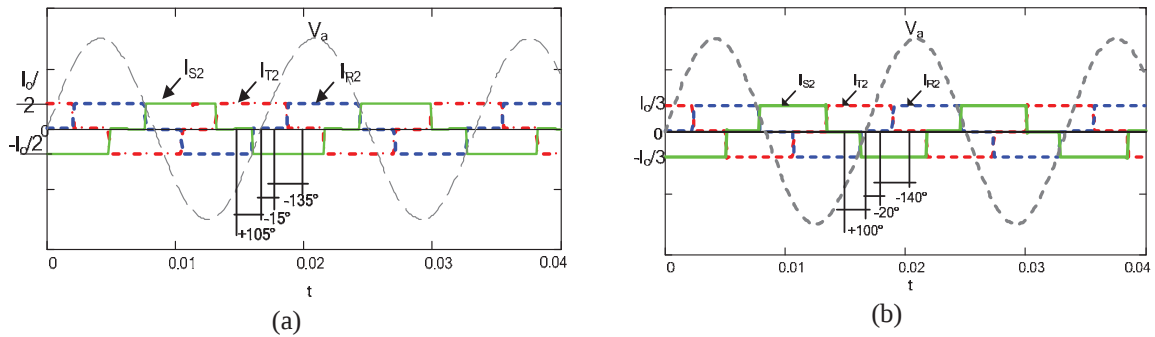
Sendo I_o , $1/2$ da corrente na carga para 12 pulsos e $1/3$ da mesma para 18 pulsos e θ o ângulo que define o número de pulsos do retificador.

$$\begin{aligned}
I_{R1}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + \theta)) \\
I_{S1}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3} + \theta)) \\
I_{T1}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3} + \theta))
\end{aligned} \tag{15}$$

A Figura 51 representa as expressões em (16). Estas correntes circulam pelos enrolamentos com índices “2” e “4”, ou seja, representa o grupo de correntes atrasado (I_{R2} , I_{S2} e I_{T2}) com relação à referência (correntes primárias I_a , I_b e I_c). A Figura 51 (a) representa as correntes para o retificador de 12 pulsos, já a Figura 51 (b), para o retificador de 18 pulsos.

$$\begin{aligned}
I_{R2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - \theta)) \\
I_{S2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3} - \theta)) \\
I_{T2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3} - \theta))
\end{aligned} \tag{16}$$

Figura 51 - Correntes secundárias para o sistema em atraso
(a) Retificador de 12 pulsos; (b) Retificador de 18 pulsos.

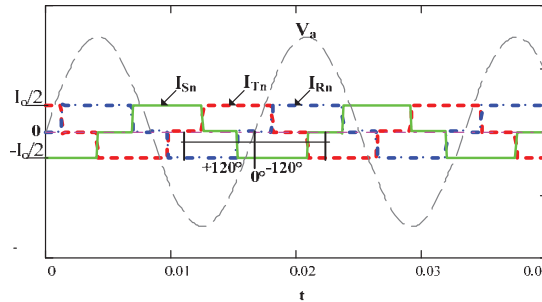


Fonte: Dados do autor.

A Figura 52 apresenta as formas de onda para as correntes que circulam pelos enrolamentos com índices “n” (I_{Rn} , I_{Sn} e I_{Tn}), estas correntes estão presentes apenas no retificadores de 18 pulsos. É o grupo de correntes em fase com a referência (correntes primárias). As formas de onda da Figura 51 representam as expressões (17).

$$\begin{aligned}
I_{Rn}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t)) \\
I_{Sn}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
I_{Tn}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3}))
\end{aligned} \tag{17}$$

Figura 52 - Corrente nos enrolamentos secundários para o sistema em fase (somente para o retificador de 18 pulsos).



Fonte: Dados do autor.

O valor eficaz das correntes secundárias pode ser calculado em função da corrente de carga I_o , sendo o mesmo para as duas configurações Estrela. O valor da corrente secundária eficaz é apresentado na equação (18) para o retificador de 12 pulsos e na equação (19) para o de 18 pulsos.

$$I_{\text{sec}_12} = \frac{I_o}{\sqrt{6}} \quad (18)$$

$$I_{\text{sec}_18} = \frac{2 \cdot I_o}{3 \cdot \sqrt{6}} \quad (19)$$

- **Análise das correntes nos primários.**

As correntes nos enrolamentos primários (I_a , I_b e I_c) são obtidas pela composição das correntes nos enrolamentos secundários acoplados ao mesmo núcleo, considerando as amplitudes definidas pelas relações de espiras e pelos sentidos dos enrolamentos (marcas de polaridades). Observa-se que as correntes com índices “a” (I_{a1} , I_{a2} , I_{a3} , I_{a4} e I_{an}) pertencem à mesma perna do núcleo, o mesmo acontece com as correntes com índices “b” e “c” pertencem às respectivas pernas do núcleo. As expressões (20) apresentam as correntes primárias nos conversores de 18 pulsos para topologia Estrela e configuração A, já as expressões (21), são para configuração B. No caso dos conversores de 12 pulsos as parcelas com índice “n” devem ser desconsideradas já que estes enrolamentos não existem nestes conversores.

A Figura 53 apresenta as formas de onda para as correntes nos enrolamentos primários quando as tensões são positivas para configuração A ($V_{c1} > 0$ e $V_{b3} > 0$) e quando as tensões são opostas para a configuração B ($V_{c1} > 0$ e $V_{a3} < 0$). Na Figura 52 (a) estão as correntes para o conversor de 12 pulsos e na Figura 52 (b), para o conversor de 18 pulsos.

Quando os enrolamentos da configuração A apresentam uma das tensões negativa, ($V_{c1} > 0$ e $V_{b3} < 0$) as correntes primárias apresentam as formas de onda da Figura 54 (a) para 12 pulsos e 3.54 (b) para 18 pulsos. Já para tensões negativas ($V_{c1} < 0$ e $V_{b3} < 0$) as correntes

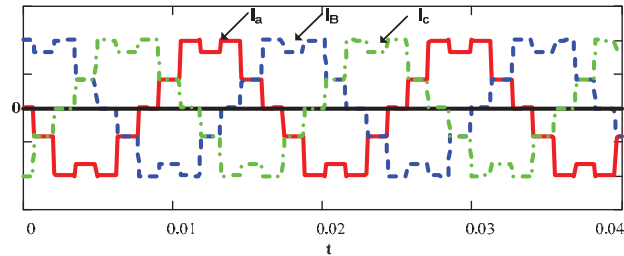
primárias apresentam as formas de onda da Figura 55 (a) para 12 pulsos e Figura 55 (b) para 18 pulsos.

Para a configuração B quando as tensões são positivas ($V_{c1}>0$ e $V_{a3}>0$) as correntes primárias podem assumir as formas de onda das Figuras 3.54 e 3.55.

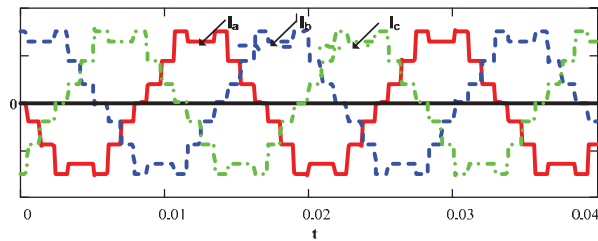
$$\begin{aligned}
 I_a(t) &= \frac{I_{S1}(t) + I_{T2}(t)}{K_b} + \frac{I_{T1}(t) + I_{S2}(t)}{K_c} + \frac{I_{RN}(t)}{K_a} \\
 I_b(t) &= \frac{I_{T1}(t) + I_{R2}(t)}{K_b} + \frac{I_{R1}(t) + I_{T2}(t)}{K_c} + \frac{I_{SN}(t)}{K_a} \\
 I_c(t) &= \frac{I_{R1}(t) + I_{S2}(t)}{K_b} + \frac{I_{S1}(t) + I_{R2}(t)}{K_c} + \frac{I_{TN}(t)}{K_a}
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 I_{a'}(t) &= \frac{I_{S1}(t) + I_{T2}(t)}{K_{b'}} + \frac{I_{R1}(t) + I_{R2}(t)}{K_{c'}} + \frac{I_{RN}(t)}{K_{a'}} \\
 I_{b'}(t) &= \frac{I_{T1}(t) + I_{R2}(t)}{K_{b'}} + \frac{I_{S1}(t) + I_{S2}(t)}{K_{c'}} + \frac{I_{SN}(t)}{K_{a'}} \\
 I_{c'}(t) &= \frac{I_{R1}(t) + I_{S2}(t)}{K_{b'}} + \frac{I_{T1}(t) + I_{T2}(t)}{K_{c'}} + \frac{I_{TN}(t)}{K_{a'}}
 \end{aligned} \tag{21}$$

Figura 53 - Correntes primárias para configuração A ($V_{c1}>0$ e $V_{b3}>0$) e B ($V_{c1}>0$ e $V_{a3}<0$) (a) 12 pulsos; (b) 18 pulsos.



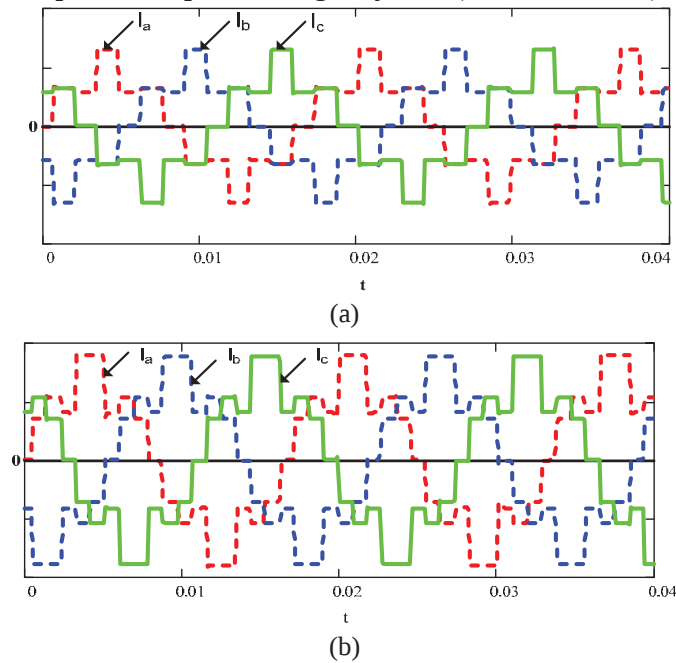
(a)



(b)

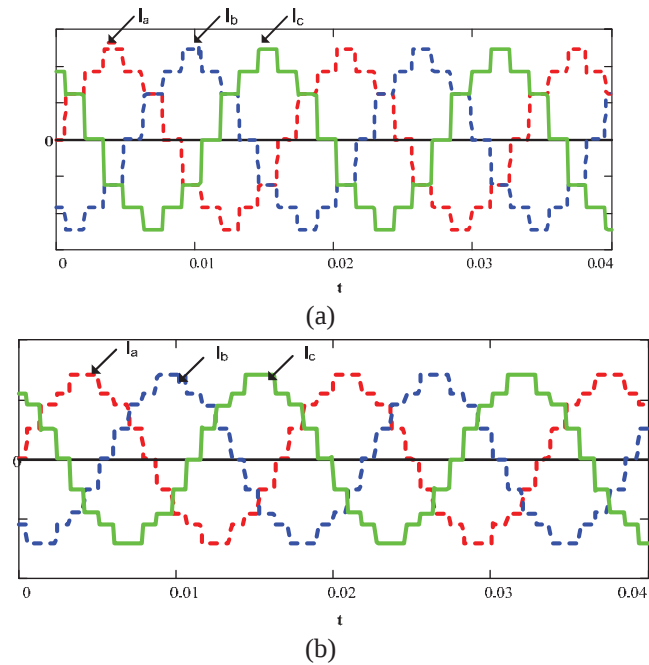
Fonte: Dados do autor.

Figura 54 - Correntes primárias para configuração A ($V_{c1}>0$ e $V_{b3}<0$) e B ($V_{c1}>0$ e $V_{a3}>0$)



Fonte: Dados do autor.

Figura 55 Correntes primárias para configuração A ($V_{c1}<0$ e $V_{b3}<0$) e B ($V_{c1}>0$ e $V_{a3}>0$)
(a) 12 pulsos e (b) 18 pulsos.



Fonte: Dados do autor.

Os valores eficazes para as correntes primárias podem ser escritos em função da corrente de carga I_o e das relações de espiras. Assim, para a configuração A as correntes para os retificadores de 12 e 18 pulsos são calculadas pelas equações (22) e (23), respectivamente.

$$I_{c1,b3_rms12} = \frac{I_o}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{4}{K_c^2} + \frac{1}{K_b^2} + \frac{2}{K_b \cdot K_c}} \quad (A) \quad (22)$$

$$I_{c1,b3_rms18} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_o}{9} \cdot \sqrt{\frac{7}{K_c^2} + \frac{1}{K_b^2} + \frac{3}{K_a^2} - \frac{8}{K_a \cdot K_c} - \frac{2}{K_a \cdot K_b} + \frac{2}{K_b \cdot K_c}} \quad (A) \quad (23)$$

As correntes primárias para a configuração B são calculadas através das equações (24) para o retificador de 12 pulsos e (25) para o de 18 pulsos.

$$I_{c1,a3_rms12} = \frac{I_o}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{7}{K_{c'}^2} + \frac{1}{K_{b'}^2} - \frac{4}{K_{b'} \cdot K_{c'}}} \quad (A) \quad (24)$$

$$I_{c1,a3_rms18} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_o}{9} \cdot \sqrt{\frac{10}{K_{c'}^2} + \frac{1}{K_{b'}^2} + \frac{3}{K_{a'}^2} + \frac{10}{K_{a'} \cdot K_{c'}} - \frac{4}{K_{b'} \cdot K_{c'}} - \frac{2}{K_{a'} \cdot K_{b'}}} \quad (A) \quad (25)$$

- **Análise das correntes na rede.**

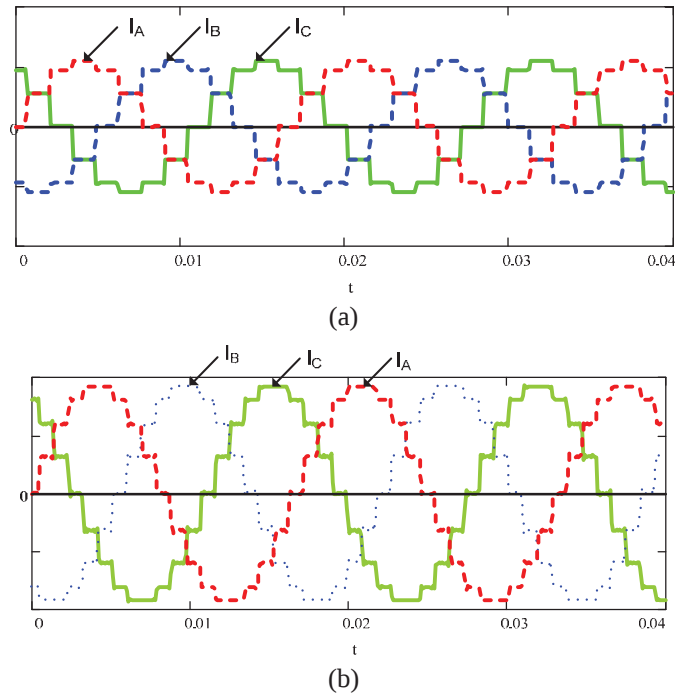
As correntes que circulam através das linhas são obtidas pela soma das correntes em todos os enrolamentos ligados a um mesmo nó. Considerando as expressões descritas para os secundários (15 a 17) e as expressões nos enrolamentos primários para configuração A (20) e as expressões para configuração B (21), obtém-se as expressões das correntes de linha apresentadas em (26) e (27), respectivamente.

$$\begin{aligned} I_A(t) &= I_{R1}(t) + I_{R2}(t) + I_{Rn}(t) + I_{a(t)} \\ I_B(t) &= I_{S1}(t) + I_{S2}(t) + I_{Sn}(t) + I_{b(t)} \\ I_C(t) &= I_{T1}(t) + I_{T2}(t) + I_{Tn}(t) + I_{c(t)} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} I_{A'}(t) &= I_{R1}(t) + I_{R2}(t) + I_{Rn}(t) + I_{a'(t)} \\ I_{B'}(t) &= I_{S1}(t) + I_{S2}(t) + I_{Sn}(t) + I_{b'(t)} \\ I_{C'}(t) &= I_{T1}(t) + I_{T2}(t) + I_{Tn}(t) + I_{c'(t)} \end{aligned} \quad (27)$$

A Figura 56 apresenta as formas de onda das correntes na rede, as quais possuem a mesma forma para as duas configurações apresentadas. Na Figura 56 (a) tem-se as correntes para os retificadores de 12 pulsos e na Figura 56 (b), para os retificadores de 18 pulsos.

Figura 56 Correntes na rede:
(a) 12 pulsos; (b) 18 pulsos.



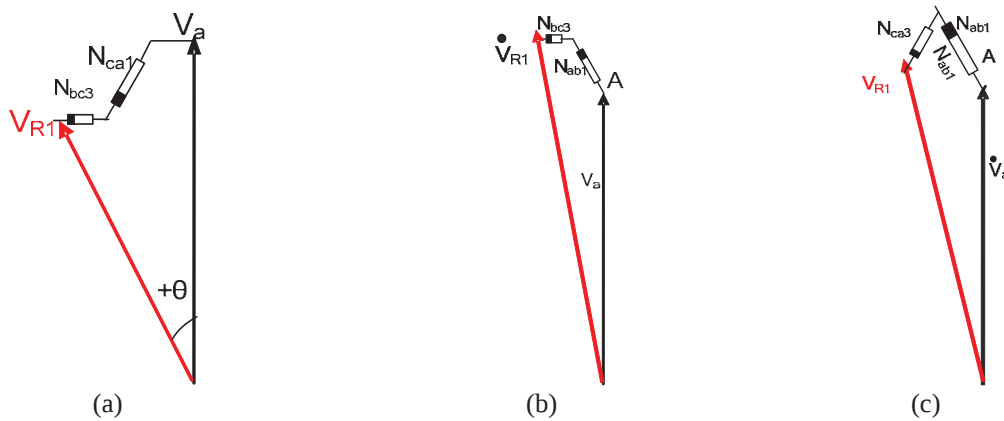
Fonte: Dados do autor.

3.3 TOPOLOGIAS DELTA

Assim como a topologia Estrela - diferencial, a topologia Delta - diferencial apresenta maneiras diferentes de se conectar os enrolamentos secundários do autotransformador, para obter uma mesma tensão resultante. A primeira configuração utiliza os enrolamentos auxiliares N_{ca1} e N_{bc3} (para obter a tensão resultante V_{R1}), denominada configuração C como mostra a Figura 57 (a). A segunda configuração a ser apresentada, é aquela que utiliza os enrolamentos auxiliares N_{ab1} e N_{bc3} (para obter V_{R1}), denominada configuração D como mostra a Figura 57 (b). Por fim, a terceira e última configuração utiliza os enrolamentos auxiliares N_{ab1} e N_{ca3} , denominada configuração E como mostra a Figura 57 (c).

A análise matemática é realizada para a configuração C e para a tensão resultante (V_{R1}). A mesma idéia se estende para as demais configurações e tensões secundárias.

Figura 57 - Conexão Delta-diferencial para tensão resultante V_{R1} .
(a) Configuração C; (b) Configuração D e (c) Configuração E.



Fonte: Dados do autor.

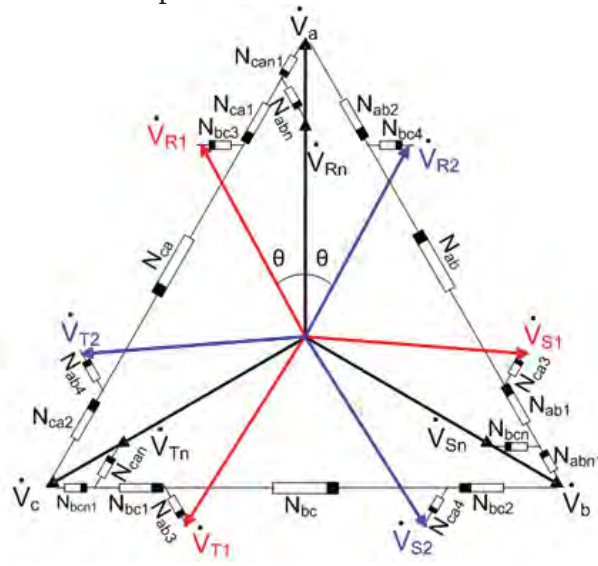
3.3.1 Análise para a configuração C

A Figura 58 apresenta como são conectados os enrolamentos auxiliares para a obtenção das tensões secundárias resultantes [34, 54, 76].

A análise das tensões para a topologia Delta - diferencial é similar àquela apresentada para a topologia Estrela-diferencial de autotransformador. No entanto, as tensões aplicadas sobre os enrolamentos primários são tensões de linha (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}). A Figura 3.19 (a) apresenta o diagrama fasorial para a topologia Delta, nele é mostrado o sistema trifásico de tensões primárias (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}), as tensões de fase e de linha do sistema adiantado de θ° (V_{R1} , V_{S1} e V_{T1}) e (V_{RS1} , V_{ST1} e V_{TR1}), respectivamente, as tensões de fase e de linha do sistema atrasado de θ° (V_{R2} , V_{S2} e V_{T2}) e (V_{RS2} , V_{ST2} e V_{TR2}), respectivamente, e o sistema em fase com as tensões primárias (V_{Rn} , V_{Sn} e V_{Tn}). Para o conversor de 12 pulsos o sistema de tensões em fase, não é necessário.

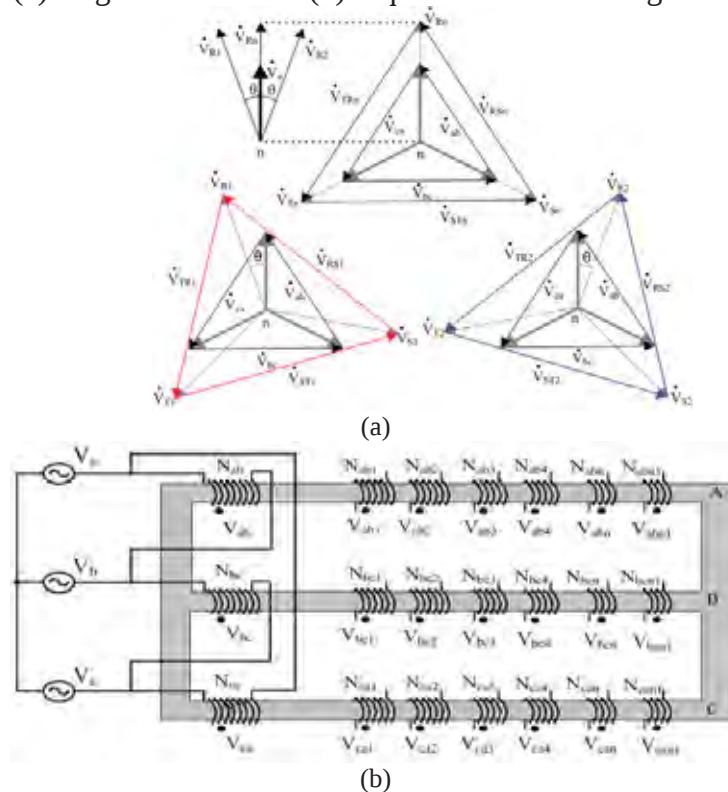
No caso do conversor Delta-diferencial de 18 pulsos são necessários dois enrolamentos auxiliares a mais por fase em comparação com a topologia Estrela, que precisa apenas de um enrolamento auxiliar para gerar o terceiro sistema trifásico em fase com as tensões primárias. A Figura 59 (b) apresenta o núcleo magnético para a conexão Delta-diferencial de autotransformador. A conexão Delta de 12 pulsos ($\theta=15^\circ$) é composta pelos enrolamentos primários e 12 enrolamentos secundários auxiliares, já a conexão de 18 pulsos ($\theta=20^\circ$) necessita de 18 enrolamentos secundários. Os enrolamentos apresentados na Figura 59 (b) são conectados de acordo com a Figura 58, para o conversor de 12 pulsos os enrolamentos com índices “n” e “n1” não são necessários.

Figura 58 - Enrolamentos para o autotransformador Delta - configuração C.



Fonte: Seixas (2001).

Figura 59 - Topologia Delta
(a) Diagrama fasorial e (b) esquema do núcleo magnético.



Fonte: Gonçalves (2006).

- Expressões para $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} > 0$.

Existem três possibilidades para a conexão dos enrolamentos N_{ca1} e N_{bc3} . Estas possibilidades permitem que a tensão resultante V_{R1} varie, podendo ser maior, menor ou igual

à tensão de entrada da rede. A Figura 60 apresenta diagramas fasoriais para cada um dos casos.

Quando as tensões V_{ca1} e V_{bc3} são positivas o diagrama que representa este caso é apresentado na Figura 60 (a). A partir deste diagrama como foi feito para conexão Estrela se obtém as expressões (28) e (29).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(30^\circ)} = \frac{V_a}{\text{sen}(150^\circ - \alpha)} = \frac{V_{ca1}}{\text{sen}(\alpha)} \quad (28)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(90^\circ + \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(90^\circ - \alpha)} = \frac{V_{bc3}}{\text{sen}(\alpha - \theta)} \quad (29)$$

A tensão de saída no secundário do autotransformador (V_{R1}) é sempre menor que a tensão de fase de entrada (V_a). Por este motivo esta conexão é chamada abaixadora de tensão (*step-down*).

- **Expressões para $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} < 0$.**

Quando a tensão sobre o enrolamento N_{bc3} é negativa, ou seja, este enrolamento é conectado com suas polaridades invertidas com relação ao enrolamento primário N_{bc} , o diagrama fasorial que representa este caso é apresentado na Figura 60 (b), a partir dele, se obtém as expressões (30) e (31).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(30^\circ)} = \frac{V_a}{\text{sen}(150^\circ - \alpha)} = \frac{V_{ca1}}{\text{sen}(\alpha)} \quad (30)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(90^\circ - \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(90^\circ + \alpha)} = \frac{-V_{bc3}}{\text{sen}(\theta - \alpha)} \quad (31)$$

O ângulo α varia entre θ e 0° , e V_{R1} pode ser menor, igual ou maior que a tensão de entrada.

- **Expressões para $V_{ca1} < 0$ e $V_{bc3} < 0$.**

O terceiro e último caso é quando as tensões V_{ca1} e V_{bc3} são negativas. Nesta situação, α varia entre 0° e -30° , enquanto V_{R1} é maior que V_a . A Figura 60 (c) mostra o diagrama fasorial para este caso. As expressões (32) e (33) são obtidas a partir do diagrama da Figura 60 (c).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(150^\circ)} = \frac{V_a}{\text{sen}(30^\circ + \alpha)} = \frac{-V_{ca1}}{\text{sen}(-\alpha)} \quad (32)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(90^\circ - \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(90^\circ + \alpha)} = \frac{-V_{bc3}}{\text{sen}(\theta - \alpha)} \quad (33)$$

Isolando V_x em todas as expressões (28 à 33) uma expressão única é obtida e apresentada em (34). Essa expressão está em função dos ângulos α , θ e da tensão de entrada e descreve as tensões através de todos os enrolamentos secundários.

$$V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ)}{\sin(150^\circ - \alpha)} = V_{ca1} \cdot \frac{\sin(30^\circ)}{\sin(\alpha)} = V_{R1} \cdot \frac{\sin(90^\circ - \theta)}{\sin(90^\circ + \alpha)} = V_{bc3} \cdot \frac{\sin(90^\circ + \theta)}{\sin(\alpha - \theta)} \quad (34)$$

Os valores para V_{R1} , V_{ca1} e V_{bc3} podem se calculados através das expressões de (35) à (37), respectivamente.

$$V_{R1} = V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ)}{\sin(150^\circ - \alpha)} \cdot \frac{\sin(90^\circ + \alpha)}{\sin(90^\circ - \theta)} \quad (35)$$

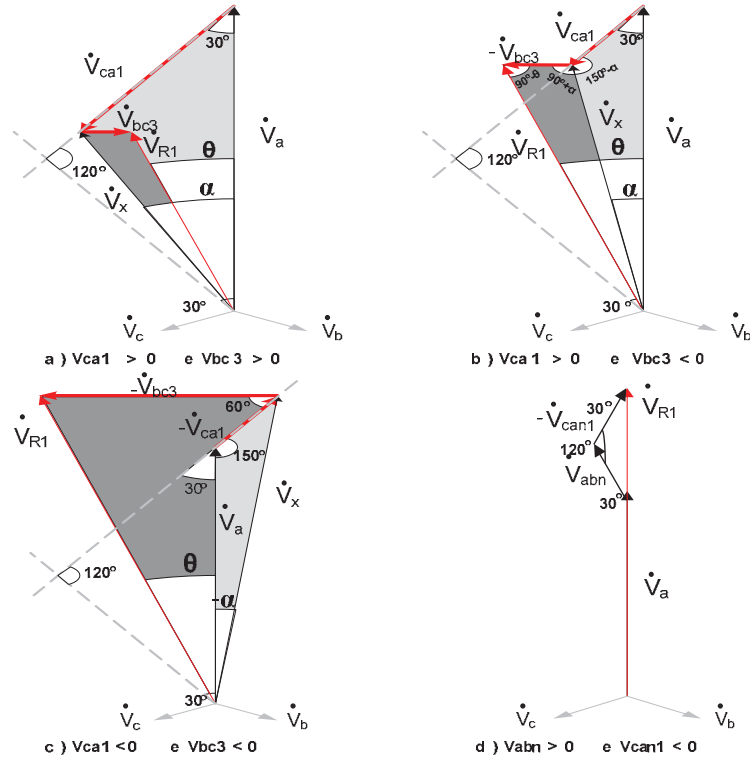
$$V_{ca1} = V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ)}{\sin(150^\circ - \alpha)} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(30^\circ)} \quad (36)$$

$$V_{bc3} = V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ)}{\sin(150^\circ - \alpha)} \cdot \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin(90^\circ + \theta)} \quad (37)$$

O ângulo auxiliar α_Δ é obtido através da equação (38).

$$\alpha_\Delta = -\arctg \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{V_{R1} \cdot \cos(\theta) - V_a \cdot \sqrt{3}}{(V_{R1} \cdot \cos(\theta))} \right] \quad (38)$$

Figura 60 - Diagramas fasoriais para topologia Delta-diferencial generalizada - configuração C.

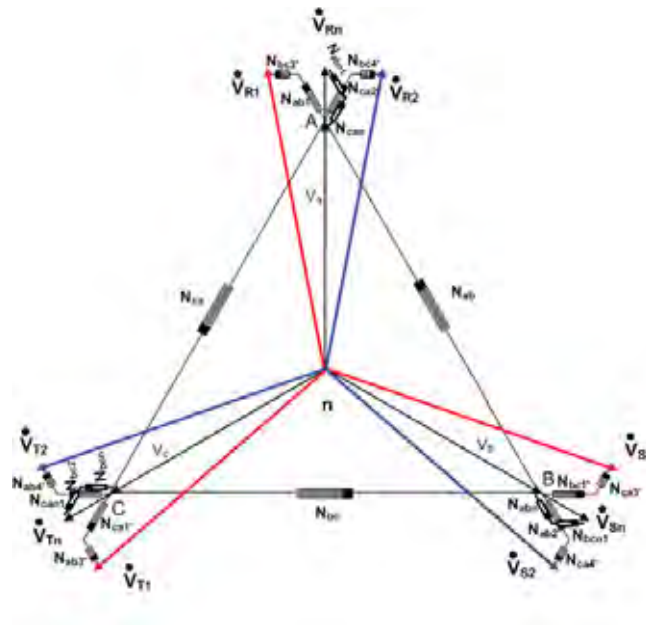


Fonte: Gonçalves (2006).

3.3.2 Análise para a configuração D

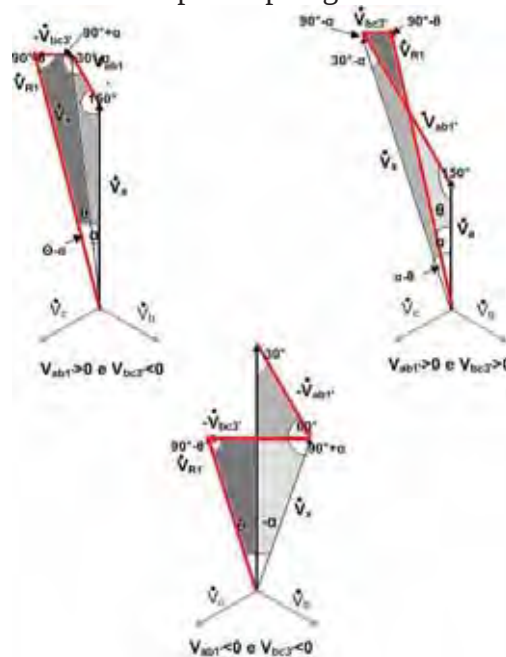
Esta análise procede de forma análoga à realizada anteriormente para a topologia Delta-diferencial com configuração C. A Figura 61 ilustra como os enrolamentos auxiliares para esta configuração devem ser conectados. A Figura 62 apresenta os diagramas fasoriais para os três casos estudados, assim como foi feito anteriormente para a configuração C [54].

Figura 61 - Esquema para os enrolamentos topologia Delta-diferencial com configuração D.



Fonte: Dados do autor.

Figura 62 - Diagramas fasoriais para topologia Delta-diferencial com configuração D.



Fonte: Dados do autor.

Da mesma forma como foram obtidas as expressões para a topologia Delta - diferencial com configuração C, se obtém expressões para este caso. É importante observar que o equacionamento é feito com base nas tensões sobre os enrolamentos auxiliares que geram a tensão V_{R1} como apresenta o diagrama fasorial da Figura 62. Assim, a partir do diagrama fasorial se obtém a equação (39) através da qual é possível obter as tensões V_{R1} , V_{ab1} e V_{bc3} .

$$V_a \cdot \frac{\sin(150^\circ)}{\sin(30^\circ - \alpha)} = V_{ab1'} \cdot \frac{\sin(150^\circ)}{\sin(\alpha)} = V_{R1} \cdot \frac{\sin(90^\circ - \theta)}{\sin(90^\circ - \alpha)} = V_{bc3'} \cdot \frac{\sin(90^\circ - \theta)}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (39)$$

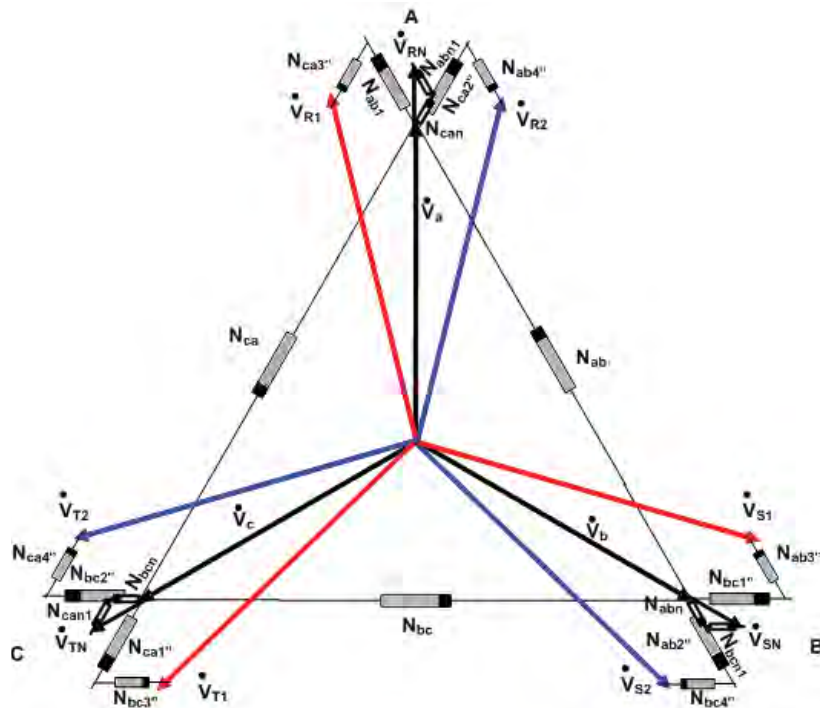
O ângulo auxiliar $\alpha_{\Delta'}$ é obtido através da equação (40).

$$\alpha_{\Delta'} = \arctg \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{(V_{R1} \cdot \cos(\theta) - V_a) \cdot \sqrt{3}}{(V_{R1} \cdot \cos(\theta))} \right] \quad (40)$$

3.3.3 Análise para a configuração E

Esta análise procede de forma análoga às realizadas anteriormente para as topologias Delta-diferencial. A Figura 63 apresenta um esquema da disposição dos enrolamentos para a topologia Delta-diferencial com configuração E.

Figura 63 - Esquema para os enrolamentos topologia Delta-diferencial com configuração E.



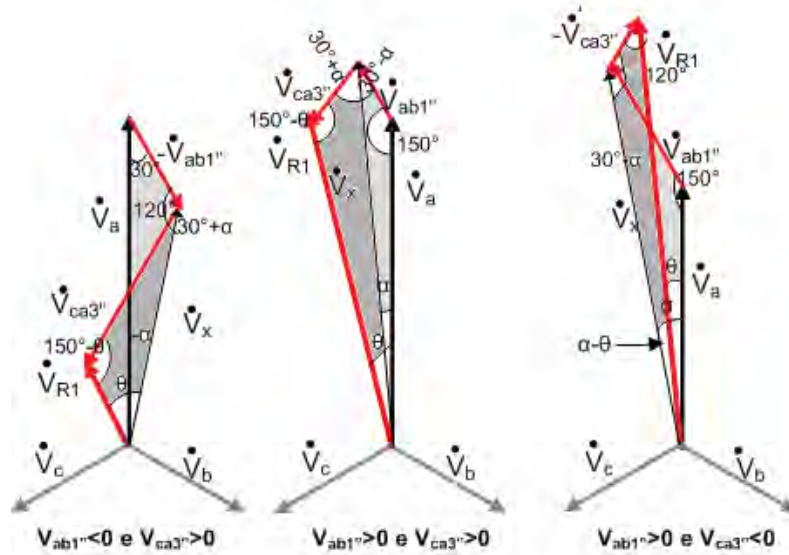
Fonte: Dados do autor.

A Figura 64 apresenta os diagramas fasoriais para os três casos estudados, assim como foi realizado para as duas configurações apresentadas anteriormente. Assim, a partir dos diagramas fasoriais obtém-se as expressões (41) e (42) que representam as tensões sobre os enrolamentos e o ângulo auxiliar $\alpha_{\Delta'}$, respectivamente.

$$V_a \cdot \frac{\sin(150^\circ)}{\sin(30^\circ - \alpha)} = V_{ab1''} \cdot \frac{\sin(150^\circ)}{\sin(\alpha)} = V_{R1} \cdot \frac{\sin(150^\circ - \theta)}{\sin(30^\circ + \alpha)} = V_{ca3''} \cdot \frac{\sin(150^\circ - \theta)}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (41)$$

$$\alpha_{\Delta''} = \arctg \left[\frac{V_{R1} \cdot \cos(\theta) + \sqrt{3} \cdot \sin(\theta) \cdot V_{R1} - V_a}{\sqrt{3} \cdot V_a + \sqrt{3} \cdot \cos(\theta) \cdot V_{R1} + 3 \cdot \sin(\theta) \cdot V_{R1}} \right] \quad (42)$$

Figura 64 - Diagramas fasoriais para topologia Delta - diferencial com configuração E.



Fonte: Dados do autor.

3.3.4 Enrolamentos adicionais para conversores de 18 pulsos

Para obtenção do terceiro sistema trifásico em fase com a rede, a conexão Delta-diferencial necessita de dois enrolamentos a mais por fase. Os enrolamentos adicionais N_{abn} e N_{abn1} são montados sobre a mesma perna do núcleo junto ao enrolamento primários N_{ab} e resultam nas tensões V_{abn} e V_{abn1} em fase com V_{ab} , os enrolamentos N_{bcn} e N_{bcn1} são montados sobre a mesma perna do núcleo junto ao enrolamento primários N_{bc} e resultam nas tensões V_{bcn} e V_{bcn1} em fase com V_{bc} e os enrolamentos N_{can} e N_{can1} são montados sobre a mesma perna do núcleo junto ao enrolamento primários N_{ca} e resultam nas tensões V_{can} e V_{can1} em fase com V_{ca} . A soma de V_a , V_{abn} e V_{can1} resulta em V_{Rn} , que deve possuir a mesma amplitude de V_{R1} e V_{R2} e estar em fase com a referência (V_a), como mostrado na Figura 58(d). As

tensões através dos enrolamentos secundários N_{abn} e N_{abn1} possuem mesma amplitude e são calculadas pela equação (43).

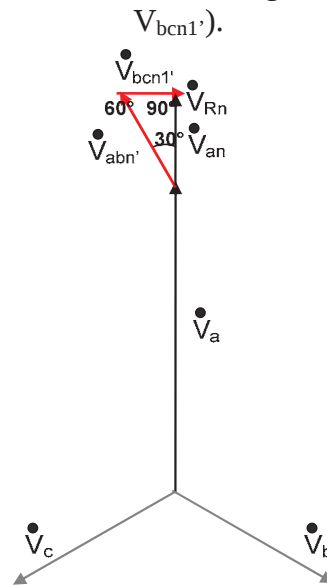
$$V_{abn} = \frac{(V_{R1} - V_a)}{2 \cdot \cos(30^\circ)} \quad (43)$$

Existe, porém, outra forma de se obter o sistema trifásico em fase com a referência, através da soma das tensões V_a , $V_{abn'}$ e $V_{bcn1'}$ como é apresentado na Figura 65. Neste caso a tensão sobre os enrolamentos $N_{abn'}$ e $N_{bcn1'}$, é apresentada em (44) e (45).

$$V_{abn'} = \frac{V_{R1} - V_a}{\sin(60^\circ)} \quad (44)$$

$$V_{bcn1'} = \frac{\sin(30^\circ) \cdot (V_{R1} - V_a)}{\sin(60^\circ)} \quad (45)$$

Figura 65 - Diagrama fasorial para tensão secundária gerada em fase com a referência ($V_{abn'}$ e



Fonte: Dados do autor.

3.3.5 Relações de espiras

A relação K_a é definida entre a tensão primária de linha V_{ab} e as tensões V_{abn} ou V_{abn1} , no caso em que o sistema em fase é gerado pela soma das tensões V_a , V_{abn} e V_{abn1} . No caso em que as tensões secundárias em fase com a referência são obtidas através da soma das tensões V_a , $V_{abn'}$ e $V_{bcn1'}$, tem-se a relação de espiras K_a' , relação entre a tensão V_{ab} e $V_{abn'}$ e K_a'' , relação entre as tensões V_{ab} e $V_{bcn1'}$.

A relação entre a tensão V_{ab} e as tensões secundárias V_{ca1} , $V_{ab1'}$, $V_{ab1''}$ definem as relações de espiras K_b , K_b' e K_b'' respectivamente. A relação entre a tensão V_{ab} e as tensões secundárias V_{bc3} , $V_{bc3'}$ e $V_{ca3''}$ definem as relações de espiras K_c , K_c' e K_c'' respectivamente.

Vale observar que todos os enrolamentos com índices “1” e “2” possuem as mesmas relações de espiras ($K_{b, b' \text{ ou } b''}$) e todos os enrolamentos com índices “3” e “4” possuem mesma relação de espiras ($K_{c, c' \text{ ou } c''}$)

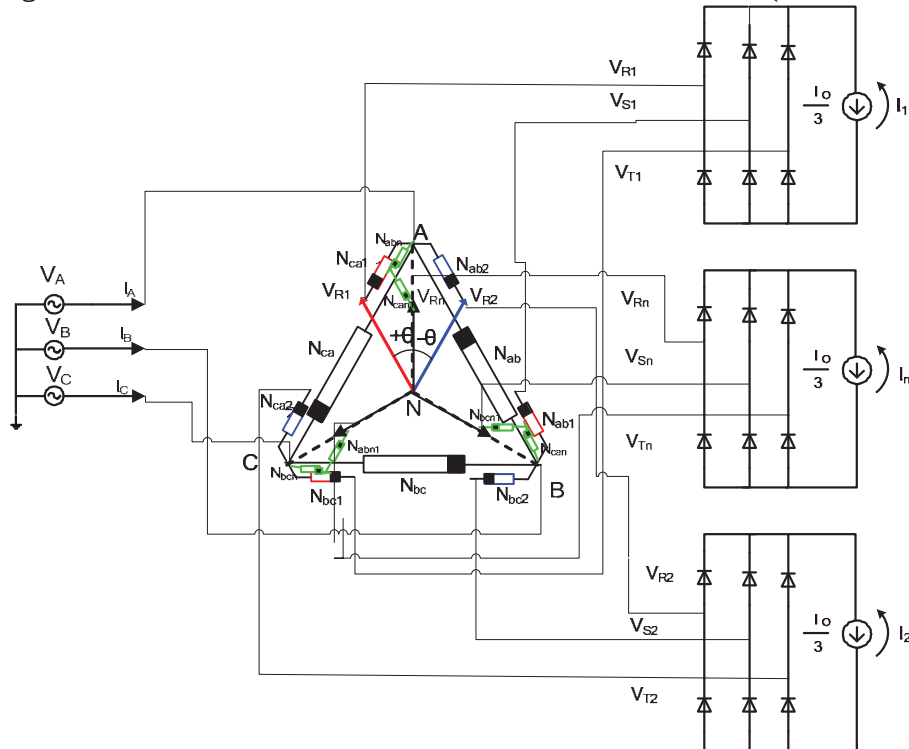
3.3.6 Conexões particulares

Foram apresentadas anteriormente expressões que definem toda a família de estruturas com conexão Delta-diferencial de 12 e de 18 pulsos. Porém, existem quatro conexões particulares (duas de 12 pulsos e duas de 18 pulsos), derivadas das conexões apresentadas, são obtidas quando um dos enrolamentos (N_{ca1} ou N_{bc3}) é eliminado. Neste caso, existe uma relação fixa para cada conversor obtido e um menor número de enrolamentos.

- **Conexão Delta-diferencial abaixadora de tensão (step-down).**

Esta conexão é obtida quando o enrolamento N_{bc3} é eliminado ($K_c = 0$). Neste caso, $V_{bc3} = 0$ e $\alpha = 0$. A Figura 66 apresenta a conexão Delta-diferencial de 18 pulsos, abaixadora de tensão, uma particularidade da conexão generalizada, nesta conexão os enrolamentos com índices “3” e “4” são eliminados.

Figura 66 - Conexão Delta-diferencial abaixadora de tensão ($K_c=0$ e $\alpha = 0$).



Fonte: Seixas (2001).

- **Conexão Delta-diferencial elevadora de tensão (*step-up*).**

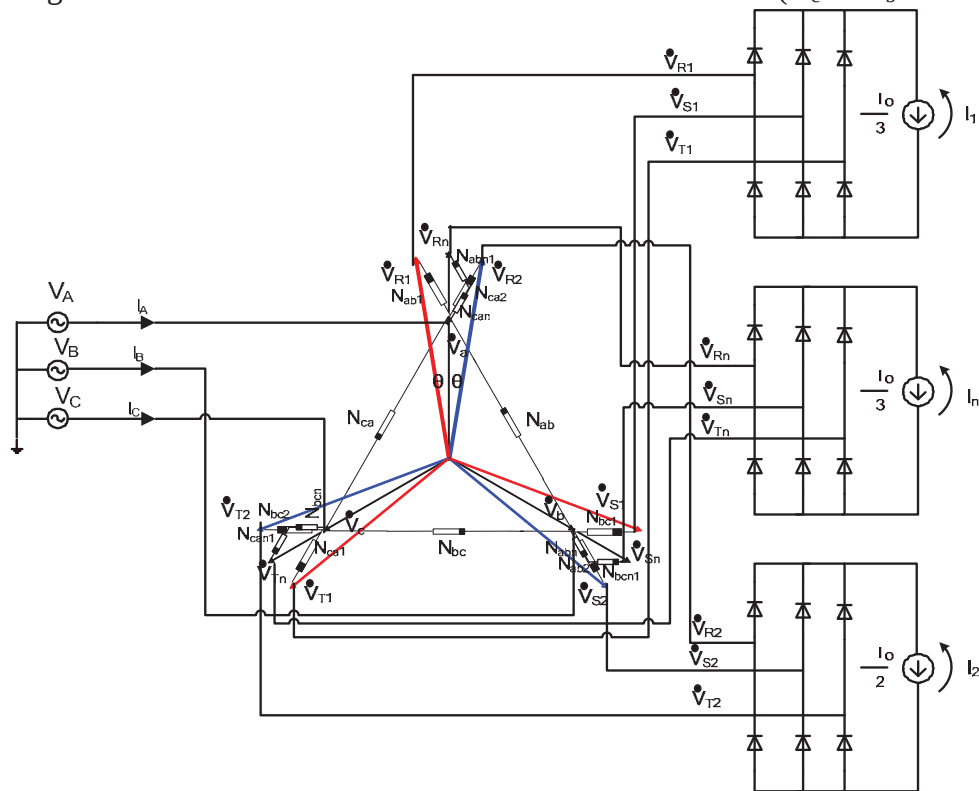
Esta conexão é obtida quando o enrolamento N_{ab1} é eliminado ($K_b = 0$ e $K_c = 0$). Ou seja, $V_{ca1} = 0$, $V_{bc3} = 0$ e $\alpha = 0$.

Sendo:

$$K_d = \frac{N_{ab1}}{N_{ab}} = \frac{V_{ab1}}{V_{ab}} \quad (47)$$

A Figura 67 apresenta o conversor com conexão Delta-diferencial elevadora de tensão.

Figura 67 - Conexão Delta-diferencial elevadora de tensão ($K_c=0$ K_b e $\alpha = 0$).



Fonte: Seixas (2001).

3.3.7 Análises das correntes

As correntes nos enrolamentos secundários do autotransformador com conexão Delta-diferencial possuem as mesmas formas de onda das correntes secundárias, apresentadas anteriormente nas Figuras 3.6 a 3.8 para a topologia Estrela de 12 e 18 pulsos. As expressões que representam as correntes nos enrolamentos secundários também são as mesmas apresentadas anteriormente para topologia Estrela (12) à (14). Logo, o valor eficaz das correntes secundárias é calculado através das equações (18) e (19) para 12 e 18 pulsos,

respectivamente. Já as correntes primárias são diferentes, pois a soma das correntes nos nós é diferente.

- **Análise das correntes nos primários.**

As correntes nos enrolamentos primários (I_{ab} , I_{bc} e I_{ca}) são obtidas pela composição das correntes nos enrolamentos secundários acoplados à mesma perna do núcleo, considerando as amplitudes definidas pelas relações de espiras e pelos sentidos dos enrolamentos (marcas de polaridades). Observa-se que as correntes com índices “ab” (I_{ab1} , I_{ab2} , I_{ab3} , I_{ab4} , I_{abn} e I_{abn1} ou I_{bcn1}) pertencem à mesma perna do núcleo, o mesmo acontece com as correntes com índices “bc” e “ca” pertencem às respectivas pernas do núcleo. As expressões apresentadas em (48) são para as correntes primárias para os conversores de 18 pulsos com configuração C, no caso dos conversores de 12 pulsos a parcela com índice “n” e “n1” devem ser desconsideradas já que estes enrolamentos não devem existir para estes conversores.

$$\begin{aligned} I_{ab}(t) &= \frac{I_{S1}(t) + I_{R2}(t)}{K_b} + \frac{I_{T1}(t) + I_{T2}(t)}{K_c} + \frac{I_{Rn}(t) - I_{Sn}(t)}{K_a} \\ I_{bc}(t) &= \frac{I_{T1}(t) + I_{S2}(t)}{K_b} + \frac{I_{R1}(t) + I_{R2}(t)}{K_c} + \frac{I_{Sn}(t) - I_{Tn}(t)}{K_a} \\ I_{ca}(t) &= \frac{I_{R1}(t) + I_{T2}(t)}{K_b} + \frac{I_{S1}(t) + I_{S2}(t)}{K_c} + \frac{I_{Tn}(t) - I_{Rn}(t)}{K_a} \end{aligned} \quad (48)$$

Para a configuração D as correntes primárias são apresentadas em (49).

$$\begin{aligned} I_{ab'}(t) &= \frac{I_{R1}(t) + I_{S2}(t)}{K_{b'}} + \frac{I_{T1}(t) + I_{T2}(t)}{K_{c'}} + \frac{I_{Sn}(t) - I_{Rn}(t)}{K_{a'}} \\ I_{bc'}(t) &= \frac{I_{S1}(t) + I_{T2}(t)}{K_{b'}} + \frac{I_{R1}(t) + I_{R2}(t)}{K_{c'}} + \frac{I_{Tn}(t) - I_{Sn}(t)}{K_{a'}} \\ I_{ca'}(t) &= \frac{I_{T1}(t) + I_{R2}(t)}{K_{b'}} + \frac{I_{S1}(t) + I_{S2}(t)}{K_{c'}} + \frac{I_{Rn}(t) - I_{Tn}(t)}{K_{a'}} \end{aligned} \quad (49)$$

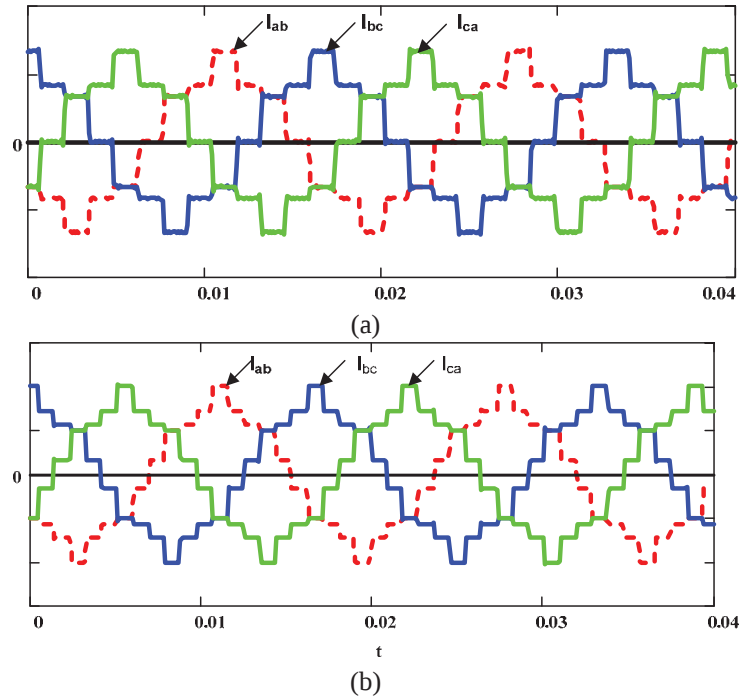
Para a configuração E as correntes primárias são definidas no conjunto de equações (50).

$$\begin{aligned} I_{ab''}(t) &= \frac{I_{R1}(t) + I_{S2}(t)}{K_{b''}} + \frac{I_{S1}(t) + I_{R2}(t)}{K_{c''}} + \frac{I_{Sn}(t) - I_{Rn}(t)}{K_{a''}} \\ I_{bc''}(t) &= \frac{I_{S1}(t) + I_{T2}(t)}{K_{b''}} + \frac{I_{T1}(t) + I_{S2}(t)}{K_{c''}} + \frac{I_{Tn}(t) - I_{Sn}(t)}{K_{a''}} \\ I_{ca''}(t) &= \frac{I_{T1}(t) + I_{R2}(t)}{K_{b''}} + \frac{I_{R1}(t) + I_{T2}(t)}{K_{c''}} + \frac{I_{Rn}(t) - I_{Tn}(t)}{K_{a''}} \end{aligned} \quad (50)$$

A Figura 68 apresenta as formas de onda para as correntes nos enrolamentos primários quando as tensões V_{ca1} e V_{bc3} são positivas para configuração C, $V_{ab1'}$ e $V_{bc3'}$ negativas para

configuração D e $V_{ab1''}$ positiva e $V_{ca3''}$ negativa para configuração E. A Figura 68 (a), as correntes para o conversor de 12 pulsos e a Figura 68 (b), para o conversor de 18 pulsos.

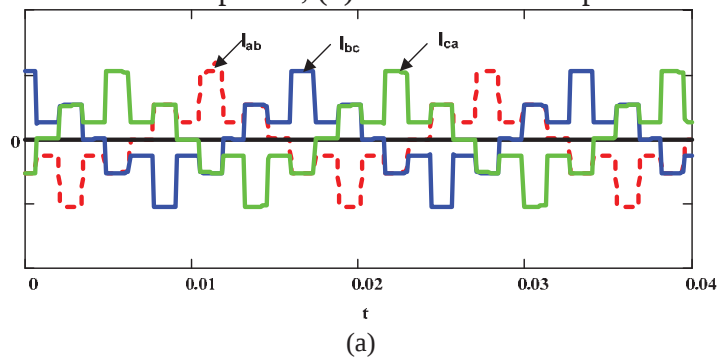
Figura 68 - Correntes primárias $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} > 0$
(a) Conversor de 12 pulsos; (b) Conversor de 18 pulsos.

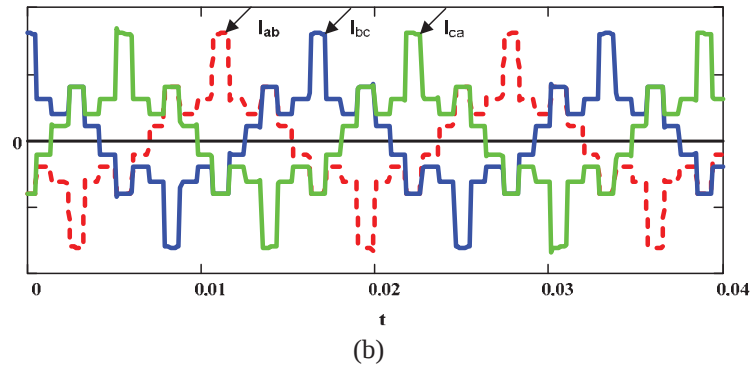


Fonte: Dados do autor.

Quando V_{ca1} é positivo e V_{bc3} é negativo para configuração C, $V_{ab1'}$ positivo e $V_{bc3'}$ negativo para configuração D e $V_{ab1''}$ negativo e $V_{ac3''}$ positivo para a configuração E as correntes primárias apresentam as formas de onda da Figura 69 (a) 12 pulsos e Figura 69 (b) 18 pulsos.

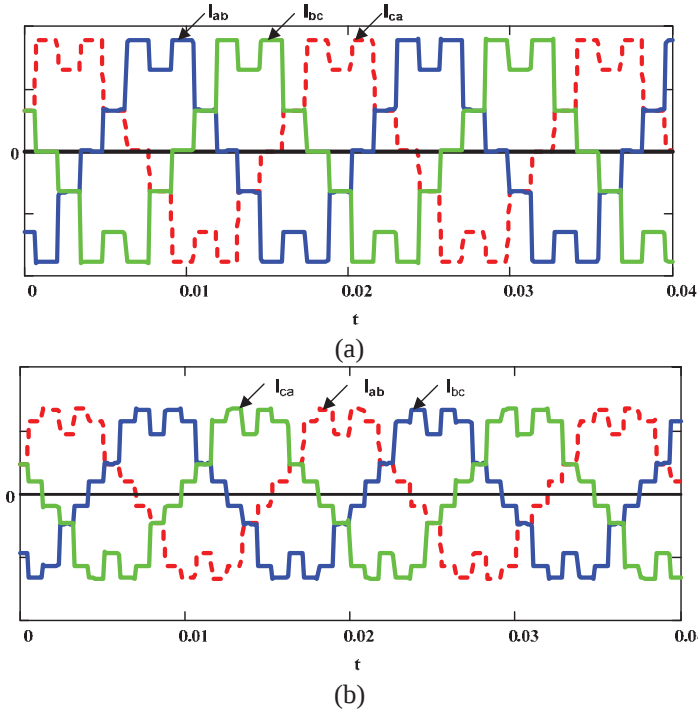
Figura 69 - Correntes primárias para $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} < 0$
(a) Conversor de 12 pulsos; (b) Conversor de 18 pulsos.





Fonte: Dados do autor.

Figura 70 - Correntes primárias $V_{ca1} < 0$ e $V_{bc3} < 0$
(a) Conversor de 12 pulsos; (b) Conversor de 18 pulsos.



Fonte: Dados do autor.

Quando V_{ca1} e V_{bc3} são negativos para configuração C, $V_{ab1'}$ e $V_{bc3'}$ positivos para configuração D e $V_{ab1''}$ e $V_{ca3''}$ positivos para a configuração E, as correntes primárias apresentam as formas de onda da Figura 70 (a) 12 pulsos e Figura 70 (b) 18 pulsos.

O valor eficaz das correntes primárias pode ser escritos em função da corrente na carga I_o e das relações de espiras. As equações (50), (51) e (52) apresentam os valores eficazes das correntes primárias para os conversores de 12 pulsos com as configurações C, D e E, respectivamente.

$$I_{rms_C_12} = \frac{I_o}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{4}{K_b^2} + \frac{1}{K_c^2} + \frac{2}{K_b \cdot K_c}} \quad (A) \quad (50)$$

$$I_{rms_D_12} = \frac{I_o}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{7}{K_{b'}^2} + \frac{1}{K_{c'}^2} - \frac{4}{K_{b'} \cdot K_{c'}}} \quad (A) \quad (51)$$

$$I_{rms_E_12} = \frac{I_o}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{7}{K_{b''}^2} + \frac{4}{K_{c''}^2} + \frac{10}{K_{b''} \cdot K_{c''}}} \quad (A) \quad (52)$$

As equações (53), (54) e (55) apresentam os valores eficazes das correntes primárias para os conversores de 18 pulsos com as configurações C, D e E respectivamente.

$$I_{rms_C_18} = \frac{I_o \cdot \sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{9}{K_a^2} + \frac{5}{K_b^2} + \frac{2}{K_c^2} + \frac{12}{K_a \cdot K_b} + \frac{6}{K_a \cdot K_c} + \frac{4}{K_b \cdot K_c}} \quad (A) \quad (53)$$

$$I_{rms_D_18} = \frac{I_o \cdot \sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{9}{K_{a'}^2} + \frac{11}{K_{b'}^2} + \frac{2}{K_{c'}^2} + \frac{18}{K_{a'} \cdot K_{b'}} - \frac{8}{K_{a'} \cdot K_{c'}} - \frac{6}{K_{b'} \cdot K_{c'}}} \quad (A) \quad (54)$$

$$I_{rms_E_18} = \frac{I_o \cdot \sqrt{2}}{9} \cdot \sqrt{\frac{9}{K_{a''}^2} + \frac{11}{K_{b''}^2} + \frac{5}{K_{c''}^2} + \frac{18}{K_{a''} \cdot K_{b''}} - \frac{12}{K_{a''} \cdot K_{c''}} - \frac{14}{K_{b''} \cdot K_{c''}}} \quad (A) \quad (55)$$

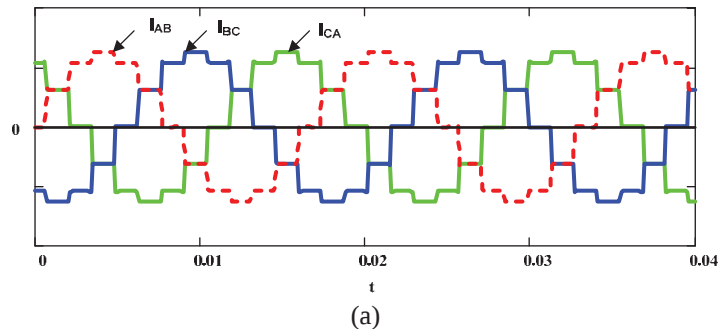
- **Análise das correntes na rede.**

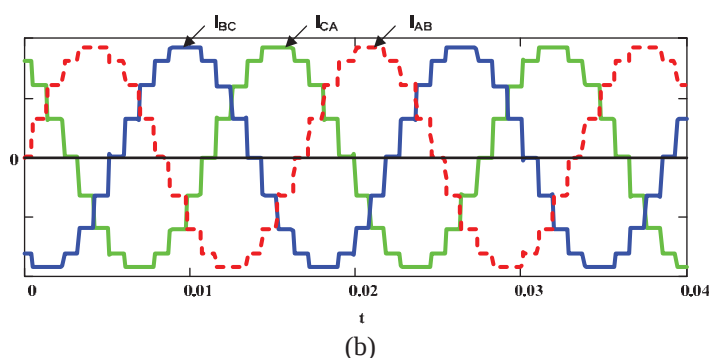
As correntes que circulam através das linhas são obtidas pela soma das correntes em todos os enrolamentos ligados em um mesmo nó. Considerando as expressões descritas para os secundários e as e as expressões nos enrolamentos primários se obtém as expressões das correntes de linha apresentadas em (56), para a configuração C. Para a obtenção das expressões das correntes na rede para as demais configurações o procedimento é o mesmo, através da soma das correntes nos nós.

$$\begin{aligned} I_{AB}(t) &= I_{R1}(t) + I_{R2}(t) + I_{Rn}(t) + I_{ab(t)} - I_{ca}(t) \\ I_{BC}(t) &= I_{S1}(t) + I_{S2}(t) + I_{Sn}(t) + I_{bc(t)} - I_{ab}(t) \\ I_{CA}(t) &= I_{T1}(t) + I_{T2}(t) + I_{Tn}(t) + I_{ca(t)} - I_{bc}(t) \end{aligned} \quad (56)$$

A Figura 71 apresenta as correntes na rede de alimentação (I_{AB} , I_{BC} e I_{CA}), na Figura. 71 (a) tem-se as correntes para os conversores de 12 pulsos e, na Figura 71 (b), para os conversores de 18 pulsos.

Figura 71 Correntes na rede
(a) Conversor de 12 pulsos; (b) Conversor de 18 pulsos.





Fonte: Dados do autor.

3.4 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta uma das contribuições deste trabalho, pois abrange todas as configurações possíveis, para as topologias Estrela e Delta-diferenciais. Como vantagem essas topologias são apropriadas para aplicações em *retrofit*, pois permitem obter qualquer valor de tensão secundária para qualquer valor de tensão de entrada, para quaisquer configurações Estrela ou Delta apresentadas. Outra vantagem que essas estruturas garantem é a robustez e a confiabilidade. Todo o equacionamento obtido para cada configuração é dito generalizado, pois existe uma equação única para cada configuração que representa os conversores de 12 ou 18 pulsos.

Este trabalho dá ênfase às topologias diferenciais não-isoladas, pois os transformadores são elementos que constituem maior peso e volume para os conversores multipulsos. Porém, com o uso do autotransformador, estes parâmetros podem ser drasticamente reduzidos quando comparados a transformadores isolados.

A reunião e equacionamento das diversas configurações para as topologias Estrela e Delta-diferenciais, através da mudança na composição dos enrolamentos auxiliares, é uma importante contribuições desta tese, pois com esta análise foi possível realizar um estudo com relação ao peso destas diversas configurações que será apresentado no capítulo 5.

O desenvolvimento para o equacionamento de tensão e corrente foi apresentado passo a passo para as configurações A e C, das topologias Estrela e Delta respectivamente. Para os demais casos foram apresentados os diagramas fasoriais e as expressões generalizadas. Este equacionamento permite que qualquer configuração para qualquer topologia seja projetada adequadamente. Ele permite que valores eficazes de tensão e corrente sejam obtidos para as configurações apresentadas, assim, todos os dados necessários para o projeto físico do conversor seja de 12 ou 18 pulsos.

Capítulo 4

Unificação das topologias estrela e delta

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em capítulos anteriores foram apresentados equacionamentos detalhados de tensão e corrente para as possíveis configurações das topologias Estrela e Delta-diferenciais. Estas conexões se destacam por apresentar baixa taxa kVA, que significa peso e volume reduzidos para o retificador multipulso.

Foram publicados artigos nas revistas IEEE Transactions on Power Electronics a SBA (Sistema Brasileiro de Automática) e em congressos como CBA, Insduscon, T&D entre outros cujo tema é apresentado neste capítulo.

Neste capítulo é apresentada a unificação do equacionamento para as configurações A e C. A conexão Estrela-diferencial com configuração A e a conexão Delta-diferencial com configuração C.

A unificação destas duas conexões, já é conhecida para tensão [54], porém, este capítulo traz também a análise para as correntes. A generalização das equações tanto para tensão quanto para corrente visam proporcionar uma maior facilidade e rapidez na obtenção destes parâmetros para uma família de retificadores com conexões diferenciais.

A partir das expressões generalizadas, um programa denominado MultiTrafo foi desenvolvido por Oliveira e Seixas em [77] para facilitar o entendimento e o equacionamento dos retificadores multipulsos. O programa permite observar as principais formas de onda de tensão e corrente para os retificadores de 12 e 18 pulsos, sem a necessidade do conhecimento de algum software de simulação, além de, se apresentar como uma eficaz ferramenta de projeto destes retificadores.

Além disso, o programa fornece todos os parâmetros de tensão, corrente, taxa kVA, tamanho de núcleo, bitola de fio, número de espiras, parâmetros necessários para o projeto e construção dos retificadores multipulsos com conexão Estrela-diferencial (configuração A) ou Delta-diferencial (configuração C), tanto para 12 como para 18 pulsos.

4.2 GENERALIZAÇÃO DAS EXPRESSÕES

No capítulo 3 foram obtidas expressões generalizadas, com relação ao número de pulsos do retificador, ou seja, para cada configuração foi obtida uma expressão única para o cálculo das tensões sobre os enrolamentos do autotransformador. Estas expressões representam os retificadores de 12 e 18 pulsos para cada configuração.

A partir do equacionamento apresentado no capítulo 3 é possível observar uma grande semelhança entre a expressão (7) para topologia Estrela-diferencial (configuração A) e a expressão (34) para Delta-diferencial (configuração C). Este fato é entendido como uma oportunidade para que estas expressões sejam reescritas, a fim de se obter uma única expressão que representasse ambas as topologias Delta e Estrela - diferenciais de autotransformador para retificadores de 12 e 18 pulsos com estas configurações. A principal diferença entre as topologias Estrela e Delta é o fato de que, no primeiro caso, as tensões secundárias estão relacionadas às tensões de fase e, para conexão Delta, estão relacionadas às tensões de linha.

Logo, com a unificação das conexões generalizadas se obtém uma expressão única que representa ambas as topologias, tornando fácil e rápido o procedimento de cálculo dos parâmetros de projeto para as topologias Estrela e Delta - diferenciais com configurações A e C, respectivamente.

4.2.1 Unificação das topologias Estrela (A) e Delta (C)

O ângulo entre as tensões de fase da conexão Estrela e a tensão de linha da conexão Delta é de 30° . Assim, para a conexão Delta o ângulo entre V_a e V_{ca1} é 30° , enquanto que, para a conexão Estrela o ângulo entre V_a e V_{c1} é de 60° . Considerando um ângulo adicional chamado de Ψ , o diagrama fasorial apresentado na Figura 58 do Capítulo 3 pode ser adaptado para o sistema unificado, como mostra a Figura 72. Este diagrama representa ambas as conexões diferenciais, Estrela e Delta. Quando Ψ é igual a 30° representa a conexão Estrela-diferencial e quando $\Psi = 0^\circ$, a conexão Delta-diferencial.

Os diagramas fasoriais da Figura 72 são usados para obter as expressões de (57) a (62), estas expressões são válidas para ambas as conexões, para todas as possibilidades desde abaixador até elevador de tensão. A expressão é deduzida para uma fase somente, porém, o mesmo resultado é aplicado às demais fases.

- $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} > 0$.

Com o mesmo procedimento realizado no Capítulo 3, aplicando a lei dos senos aos triângulos formados pelas amplitudes das tensões secundárias e primárias, a partir do diagrama da Figura 72 (a) as expressões (57) e (58) são obtidas. Observa-se que quando $\Psi = 0^\circ$ tem-se a conexão Delta - diferencial (configuração C), porém quando $\Psi = 30^\circ$ a conexão que as equações representam é a Estrela-diferencial (configuração A).

$$\frac{V_x}{\text{sen}(30^\circ + \Psi)} = \frac{V_a}{\text{sen}(150^\circ - \Psi - \alpha)} = \frac{V_{ca1}}{\text{sen}(\alpha)} \quad (57)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(90^\circ + \Psi + \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(90^\circ - \Psi - \alpha)} = \frac{V_{bc3}}{\text{sen}(\alpha - \theta)} \quad (58)$$

- $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} < 0$.

A partir da Figura 72 (b) se obtém as expressões (59) e (60):

$$\frac{V_x}{\text{sen}(30^\circ + \Psi)} = \frac{V_a}{\text{sen}(150^\circ - \Psi - \alpha)} = \frac{V_{ca1}}{\text{sen}(\alpha)} \quad (59)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(90^\circ - \Psi - \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(90^\circ + \Psi + \alpha)} = \frac{-V_{bc3}}{\text{sen}(\theta - \alpha)} \quad (60)$$

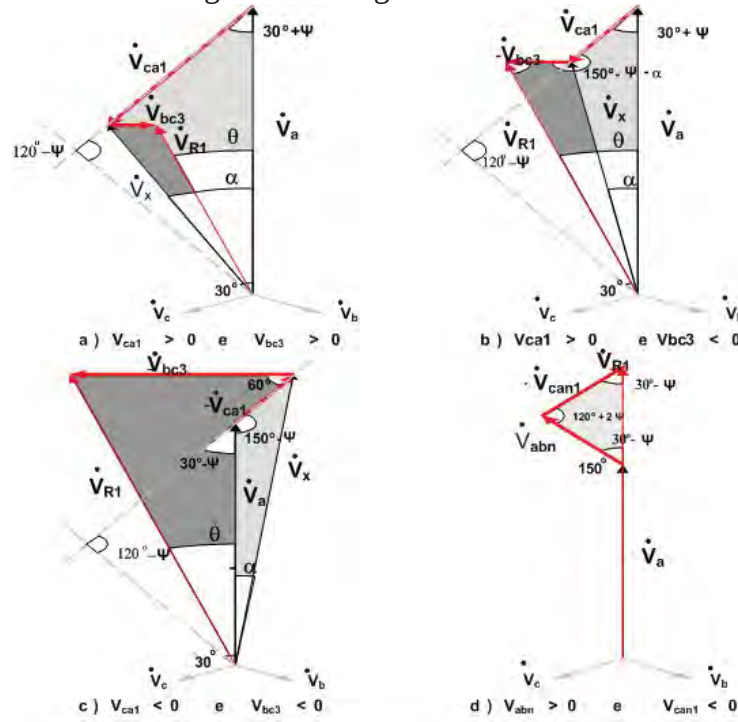
- $V_{ca1} < 0$ e $V_{bc3} < 0$.

Finalmente, da Figura 72 (c), as expressões (61) e (62) podem ser escritas.

$$\frac{V_x}{\text{sen}(150^\circ - \Psi)} = \frac{V_a}{\text{sen}(30^\circ + \Psi + \alpha)} = \frac{-V_{ca1}}{\text{sen}(-\alpha)} \quad (61)$$

$$\frac{V_x}{\text{sen}(90^\circ - \Psi - \theta)} = \frac{V_{R1}}{\text{sen}(90^\circ + \Psi + \alpha)} = \frac{-V_{bc3}}{\text{sen}(\theta - \alpha)} \quad (62)$$

Figura 72 - Diagramas fasoriais unificados.



Fonte: Gonçalves (2006).

- **Expressão final.**

Observa-se que as expressões (57) a (62) apresentam os mesmos parâmetros: tensões secundárias V_{ca1} e V_{bc3} , tensão auxiliar V_x , tensão primária V_a , tensão secundária resultante V_{R1} (tensão de fase) e os ângulos θ (que determina se o retificador é de 12 ou 18 pulsos), Ψ (que indica o tipo de conexão Estrela ou Delta) e α (ângulo auxiliar). A partir das equações apresentadas anteriormente, obtêm-se expressão (63).

Portanto, a partir de uma única expressão é possível calcular as tensões em todos os enrolamentos para as topologias retificadoras de 12 e 18 pulsos com conexões Estrela e Delta-diferenciais.

$$V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ + \Psi)}{\sin(150^\circ - \Psi - \alpha)} = V_{ca1} \cdot \frac{\sin(30^\circ + \Psi)}{\sin(\alpha)} = V_{R1} \cdot \frac{\sin(90^\circ + \Psi + \theta)}{\sin(90^\circ - \Psi - \alpha)} = V_{bc3} \cdot \frac{\sin(90^\circ + \Psi + \theta)}{\sin(\alpha - \theta)} \quad (63)$$

Os valores eficazes de V_{R1} , V_{ca1} e V_{bc3} podem ser facilmente calculados através das expressões (64), (65) e (66), respectivamente. Essas expressões são simples e podem ser solucionadas facilmente.

$$V_{R1} = V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ + \Psi)}{\sin(150^\circ - \Psi - \alpha)} \cdot \frac{\sin(90^\circ - \Psi - \alpha)}{\sin(90^\circ + \Psi + \theta)} \quad (64)$$

$$V_{ca1} = V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ + \Psi)}{\sin(150^\circ - \Psi - \alpha)} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(30^\circ + \Psi)} \quad (65)$$

$$V_{bc3} = V_a \cdot \frac{\sin(30^\circ + \Psi)}{\sin(150^\circ - \Psi - \alpha)} \cdot \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin(90^\circ + \Psi + \theta)} \quad (66)$$

O ângulo auxiliar α é determinado a partir da equação (63) aplicando leis trigonométricas e é mostrado na equação (67). Aplicando α nas equações (65) e (66), as tensões secundárias V_{ca1} e V_{bc3} são determinadas.

$$\alpha = -\psi - \arctg \left[\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{(V_{R1} \cdot \cos(\psi + \theta) - V_a \cdot \cos(\psi) - \sqrt{3} \cdot V_a \cdot \sin(\psi))}{(V_{R1} \cdot \cos(\psi + \theta))} \right] \quad (67)$$

Para os retificadores de 18 pulsos são necessários enrolamentos adicionais para gerar um terceiro sistema trifásico secundários em fase com a referência. Para a conexão Estrela um enrolamento por fase é necessário, já para a conexão Delta-diferencial, são necessários dois enrolamentos por fase.

4.2.2 Enrolamentos adicionais para o retificador de 18 pulsos

As equações (68) e (69) definem as tensões através dos enrolamentos secundários adicionais. Nota-se que, para a conexão Estrela ($\Psi = 30^\circ$), a tensão V_{abn1} é nula. Este fato ocorre porque este enrolamento adicional é necessário apenas para as conexões Delta-diferenciais generalizadas.

$$V_{abn} = \frac{(V_{R1} - V_a)}{2 \cdot \cos(30^\circ + \Psi)} \quad (68)$$

$$V_{abn1} = \frac{(V_{R1} - V_a)}{2 \cdot \cos(30^\circ + \Psi)} \cdot \cos(3 \cdot \Psi) \quad (69)$$

4.2.3 Relações de espiras generalizadas

Para as conexões Delta a tensão através dos enrolamentos primários são as tensões de linha e o quociente entre as tensões de linha e de fase resulta em $\sqrt{3}$. As equações que determinam as relações de espiras podem ser usadas tanto para topologia Delta quanto para a topologia Estrela de autotransformador. A relação de espiras K_a , é calculada através da equação (70).

$$K_a = \frac{N_{abn}}{N_{ab}} = \frac{V_{abn}}{V_{ab}} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (70)$$

A relação de espiras K_b é definida na equação (71).

$$K_b = \frac{N_{ca1}}{N_{ca}} = \frac{V_{ca1}}{V_{ca}} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (71)$$

A relação de espiras K_c é definida pela equação (72).

$$K_c = \frac{N_{bc3}}{N_{bc}} = \frac{V_{bc3}}{V_{bc}} \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (72)$$

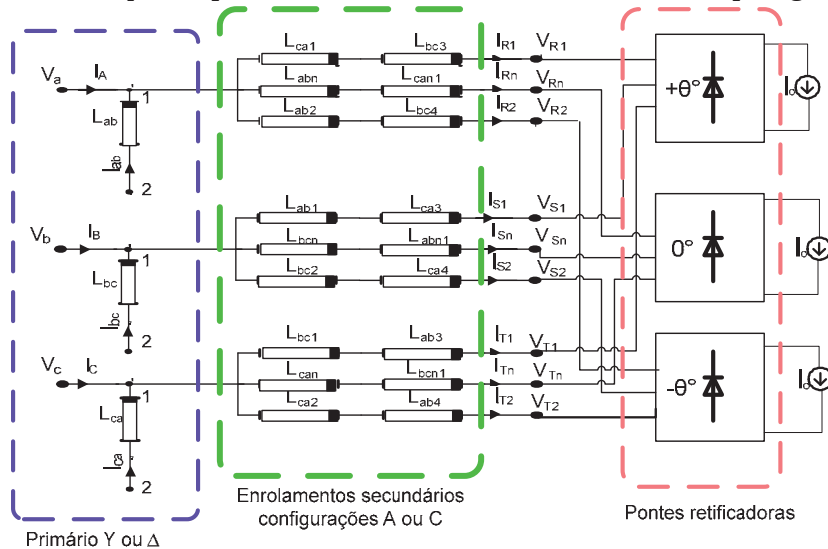
4.2.4 Generalização das correntes

A Figura 73 mostra como são conectados os enrolamentos com conexões genéricas para um retificador de 18 pulsos, apresenta também as correntes que passam por cada um dos enrolamentos primário e secundário. A ponte retificadora $+\theta^\circ$ é alimentada pelo grupo de tensões adiantado com relação às tensões de referência (V_a , V_b e V_c), a ponte 0° representa o grupo de tensões em fase com as tensões de referência e a ponte $-\theta^\circ$ é alimentada pelo grupo de tensões atrasado.

Os enrolamentos primários N_{ab} , N_{bc} e N_{ca} podem ser conectados em Delta da seguinte maneira: conectando N_{ab} '2' a N_{bc} '1', N_{bc} '2' a N_{ca} '1' e N_{ca} '2' a N_{ab} '1'. A conexão Estrela é obtida conectando as polaridades negativas em comum, a alimentação é conectada as polaridades positivas dos enrolamentos nos dois casos.

Os enrolamentos auxiliares da Figura 73 podem ser conectados de acordo com os diagramas fasoriais da Figura 72. Neste caso eles apresentam a configuração da Figura 72 (a) positivos, ou seja, $V_{ca1} > 0$ e $V_{bc3} > 0$. Para os outros casos apresentados anteriormente, basta inverter a polaridade dos enrolamentos.

Figura 73 - Esquema para as conexões dos enrolamentos na topologia unificada.



Fonte: Dados do autor.

Para o retificador de 12 pulsos existem apenas dois grupos de correntes secundárias, um grupo atrasado de 15° e outro adiantado de 15° com relação a um grupo de correntes fictício (0°), que está em fase com as tensões de fase (V_a , V_b e V_c). No retificador de 18

pulsos são necessárias três pontes retificadoras em sua estrutura como mostra a Figura 73, logo, são necessários três grupos de corrente um em fase com as tensões de fase (V_a , V_b e V_c) e será a referência para os outros dois grupos, um atrasado de 20° e outro adiantado de 20° . Estes grupos de correntes representam as correntes que entram nas pontes retificadoras as quais também passam pelos enrolamentos secundários.

As correntes que passam pelos enrolamentos secundários e alimentam as pontes retificadoras possuem uma forma de onda quadrada e simétrica e são facilmente escritas como Séries de Fourier. Os grupos de equações (73), (74) e (75) apresentam equações genéricas para as correntes nos enrolamentos secundários. Estas equações são chamadas de genéricas, pois, estão em função do ângulo θ que define se o retificador é de 12 pulsos ($\theta=15^\circ$) ou se o retificador é de 18 pulsos ($\theta=20^\circ$). A equação (73) apresenta o grupo de correntes em fase com as tensões, as quais estão presentes apenas nos retificadores de 18 pulsos. As equações (74) e (75) representam os grupos de corrente adiantado e atrasado respectivamente.

A corrente I_o é a corrente média em cada ponte retificadora quando se tem cargas independentes. Porém, quando a carga é única (pontes conectadas em paralelo) a corrente média total no converso de 12 pulsos é duas vezes I_o . Já no retificador de 18 pulsos é de três vezes I_o .

$$\begin{aligned}
 I_{Rn}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t)) \\
 I_{Sn}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3})) \\
 I_{Sn}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3}))
 \end{aligned} \tag{73}$$

$$\begin{aligned}
 I_{Rl}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + \theta)) \\
 I_{Sl}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3} + \theta)) \\
 I_{Tl}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3} + \theta))
 \end{aligned} \tag{74}$$

$$\begin{aligned}
I_{R2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - \theta)) \\
I_{S2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3} - \theta)) \\
I_{T2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3} - \theta))
\end{aligned} \tag{75}$$

As correntes primárias são obtidas através da soma das correntes secundárias dividido por suas respectivas relações de espiras K_a , K_b e K_c .

A equação (76) representa a corrente primária $I_a(t)$ para a conexão Estrela-Diferencial, já a equação (77) a corrente primária $I_{ab}(t)$ para a conexão Delta-Diferencial.

$$I_a(t) = \frac{I_{S1}(t) + I_{S2}(t)}{K_b} + \frac{I_{T1}(t) + I_{S2}(t)}{K_c} + \frac{I_{Rn}(t)}{K_a} \tag{76}$$

$$I_{ab}(t) = \frac{I_{S1}(t) - I_{R2}(t)}{K_b} + \frac{I_{T1}(t) - I_{T2}(t)}{K_c} + \frac{I_{Rn}(t) - I_{Sn}(t)}{K_a} \tag{77}$$

Observa-se das equações (76) e (77) algumas semelhanças, as duas equações possuem os termos $I_{S1}(t)$, $I_{T1}(t)$ e $I_{RN}(t)$. As diferenças estão nos termos das correntes secundárias do grupo atrasado de θ , além disso, a corrente primária para a conexão Delta apresenta um termo em fase (I_{SN}) a mais que a conexão Estrela. Porém, foi observada a possibilidade das correntes serem reescritas uma em função da outra, obtendo assim, equações generalizadas que representam ambas as conexões Estrela e Delta - diferenciais.

A corrente $I_{R2}(t)$ foi reescrita em função de $I_{T2}(t)$ somando-se 180° para representar o sinal negativo de (4.21) e subtraindo $2 \cdot \Psi$ (sendo $\Psi = 0^\circ$ para Delta e $\Psi = 30^\circ$ para Estrela). Logo, quando a conexão analisada for a Delta-diferencial $\Psi = 0^\circ$ a corrente $I_{R2_g}(t)$ apresentada em (4.22) representa a corrente $I_{R2}(t)$ (negativa) apresentada em (4.21), já se $\Psi = 30^\circ$ a conexão a ser analisada será a Estrela - diferencial e a corrente $I_{R2_g}(t)$ representará a corrente $I_{T2}(t)$ presente em (76). O mesmo é aplicado às demais fases, assim o grupo de correntes secundárias atrasadas com relação à referência é reescrito, a fim de se obter equações generalizadas para as correntes primárias.

$$\begin{aligned}
I_{R2_g}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - \theta + \pi - 2 \cdot \Psi)) \\
I_{S2_g}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3} - \theta + \pi - 2 \cdot \Psi)) \\
I_{T2}(t) &= \frac{4}{\pi} \cdot I_o \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \cos(k \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \text{sen}(k \cdot (\varpi \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3} - \theta + \pi - 2 \cdot \Psi))
\end{aligned} \tag{78}$$

As correntes primárias generalizadas são apresentadas em (79), porém, algumas considerações devem ser realizadas. Quando a conexão analisada for a Estrela-Diferencial as

parcelas $I_{Sn}(t)$, $I_{Tn}(t)$ e $I_{Rn}(t)$ devem ser eliminadas de suas respectivas correntes primárias $I_{ab_g}(t)$, $I_{bc_g}(t)$ e $I_{ca_g}(t)$.

A segunda observação é que as correntes apresentadas em (79) são para o retificador de 18 pulsos. Se o retificador analisado for o de 12 pulsos todas as parcelas com índices “n” devem ser eliminadas.

$$\begin{aligned} I_{ab_g}(t) &= \frac{I_{S1}(t) + I_{R2_g}(t)}{K_b} + \frac{I_{T1}(t) + I_{T2_g}(t)}{K_c} + \frac{I_{Rn}(t) - I_{Sn}(t)}{K_a} \\ I_{bc_g}(t) &= \frac{I_{T1}(t) + I_{S2_g}(t)}{K_b} + \frac{I_{R1}(t) + I_{R2_g}(t)}{K_c} + \frac{I_{Sn}(t) - I_{Tn}(t)}{K_a} \\ I_{ca_g}(t) &= \frac{I_{r1}(t) + I_{t2_g}(t)}{K_b} + \frac{I_{s1}(t) + I_{s2_g}(t)}{K_c} + \frac{I_{tn}(t) - I_{rn}(t)}{K_a} \end{aligned} \quad (79)$$

As correntes na rede são obtidas através da soma das correntes nos nós. Logo, $I_{AB_g}(t)$, $I_{BC_g}(t)$ e $I_{CA_g}(t)$, apresentadas na equação (80), representam as equações gerais para as corrente nas três fases da rede de alimentação.

$$\begin{aligned} I_{AB_g}(t) &= I_{R1}(t) + I_{R2}(t) + I_{Rn}(t) + I_{ab_g}(t) - I_{ca_g}(t) \\ I_{BC_g}(t) &= I_{S1}(t) + I_{S2}(t) + I_{Sn}(t) + I_{bc_g}(t) - I_{ab_g}(t) \\ I_{CA_g}(t) &= I_{T1}(t) + I_{T2}(t) + I_{Tn}(t) + I_{ca_g}(t) - I_{bc_g}(t) \end{aligned} \quad (80)$$

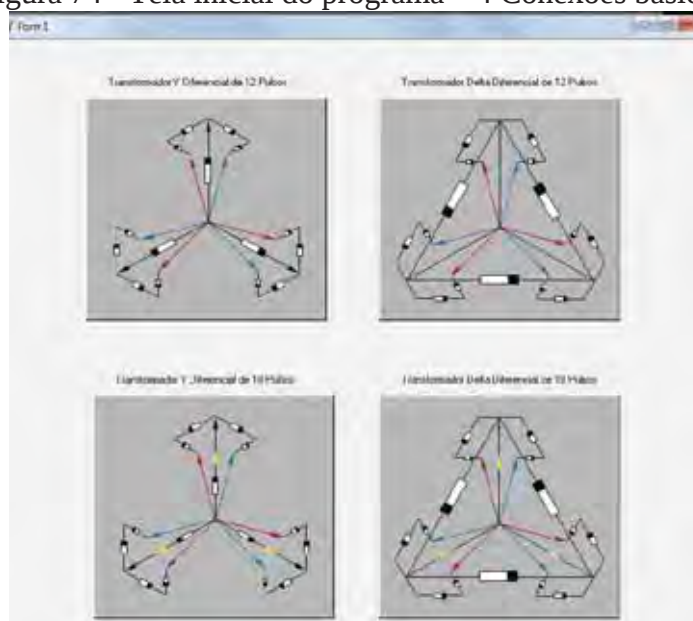
Existem algumas observações que também devem ser consideradas com relação às equações das correntes na rede de alimentação. Quando a conexão analisada for a Estrela-diferencial e o retificador for de 18 pulsos as parcelas $I_{ca_g}(t)$, $I_{ab_g}(t)$ e $I_{bc_g}(t)$ presentes nas correntes $I_{AB_g}(t)$, $I_{BC_g}(t)$ e $I_{CA_g}(t)$, respectivamente, devem ser eliminadas. Porém, se o retificador for Estrela-diferencial e de 12 pulsos, além das parcelas apresentadas todas as parcelas com índices “n” devem também ser eliminadas.

No caso da conexão Delta-diferencial as expressões descritas em (80) representam as correntes para o retificador de 18 pulsos, mas se o retificador for de 12 pulsos as parcelas com índices “n” devem ser eliminadas.

4.3 PROGRAMA MULTITRAFO.

A fim de tornar o processo para o cálculo dos parâmetros de projeto mais rápido e fácil, um programa foi desenvolvido a partir do equacionamento unificado de tensão e corrente para as conexões Estrela e Delta-diferenciais [77]. A primeira tela a ser observada no programa é apresentada na Figura 74.

Figura 74 - Tela inicial do programa – 4 Conexões básicas.



Fonte: Dados do autor.

Nesta tela escolhe-se qual a topologia de transformador, Estrela (Y) ou Delta (Δ) e o número de pulsos desejados do retificador, 12 ou 18.

O programa possui uma interface gráfica de fácil entendimento. Assim, pode ser usado como instrumento para complementar e ajudar a compreender o funcionamento dos retificadores multipulsos, sem a necessidade de conhecê-los a fundo, e sem a necessidade do conhecimento de alguma ferramenta de simulação.

Clicando sobre uma das topologias, uma segunda tela é aberta, na qual se escolhe alguns parâmetros de entrada como tensão na rede, potência e tensão média na saída retificadora.

Por exemplo, se a topologia escolhida de transformador for a Estrela-diferencial para um retificador de 18 pulsos a tela a ser aberta está mostrada na Figura 75.

A interface gráfica para os demais retificadores com conexões Estrela e Delta de 12 e 18 pulsos é a mesma apresentada na Figura 75.

Existem três abas, uma para os resultados gráficos formas de onda de tensão e corrente, uma para dados de projeto como tensão e corrente em todos os enrolamentos do transformador e resultados relacionados à qualidade de energia DHT_1 e FP e, por fim, uma aba para resultados do dimensionamento do transformador como bitola de fio, número de espiras, tamanho e peso do núcleo entre outros.

O programa permite visualizar a disposição dos enrolamentos auxiliares. Estes enrolamentos assumem diferentes disposições, afim de, se obter a tensão secundária resultante necessária para a tensão retificada desejada.

A Figura 76 apresenta a tela gráfica para o retificador de 18 pulsos com conexão Estrela-diferencial, para este retificador foram escolhidos os seguintes parâmetros: tensão de entrada 127 V, potência 2.500 W e tensão média na saída de 315 V.

Através desta tela é possível observar formas de onda de tensão e corrente verificando o funcionamento do retificador. As formas de onda desejadas podem ser escolhidas através dos botões de seleção no lado direito da tela. Na Figura 76 observa-se a tensão na carga V_o , as tensões secundárias V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} e a tensão na fase A. A Figura 77 apresenta as correntes primárias.

Todos os valores de tensão, corrente, FP, DHT_i entre outros podem ser verificados na aba de resultados como pode se observar na Figura 78.

Através dos valores apresentados na tabela de resultados é possível realizar a especificação dos componentes, bitola de fio, lâmina a ser usada para a construção do transformador, número de espiras, etc. A especificação dos componentes é apresentada na Figura 79, na qual observa-se a aba dados de projeto, nela são apresentados resultados para a implementação do retificador.

Na aba dados de projeto, alguns parâmetros podem ser escolhidos como: indutância magnética (B_m), tamanho de lâmina (D), espessura da lâmina, densidade de corrente, empilhamento novo (valor $\geq$ ao empilhamento 'b' calculado).

O programa foi desenvolvido para as duas topologias Estrela e Delta. As configurações utilizadas foram A e C com enrolamentos auxiliares N_{c1} e N_{b3} para Estrela e N_{bc3} e N_{ca1} para Delta de 12 e 18 pulsos. Logo, outro retificador dado como exemplo é o Delta-diferencial de 18 pulsos.

Na Figura 80 observam-se algumas formas de onda de tensão e corrente para o retificador Delta-diferencial de 18 pulsos com V_o igual a 600 V, P_o igual a 2,5 kW e tensão na rede de 127 V.

A Figura 81 apresenta a aba de resultados com valores eficazes de tensão, correntes, relação de espiras FP, DHT_i para o retificador Delta-diferencial.

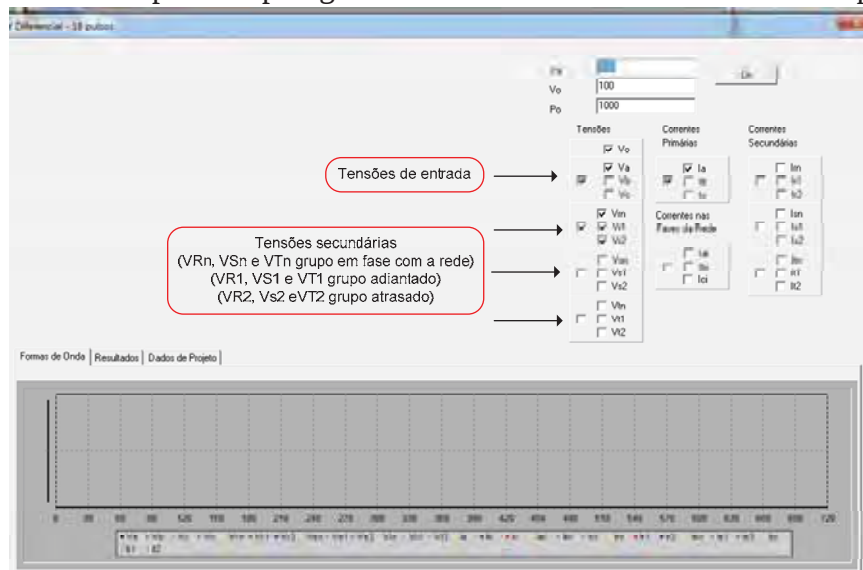
A Figura 82 mostra a aba de dados de projeto, com ela é possível implementar o retificador. É válido dizer que os resultados gráficos são apenas para mostrar o comportamento do retificador, com a tabela de resultados é possível realizar a simulação

destes retificadores em softwares como PSpice ou MatLab, para obter resultados mais precisos.

O programa é uma ótima ferramenta para projeto dos retificadores de 12 e 18 pulsos com as configurações A e C para as topologias Estrela e Delta-diferencial respectivamente.

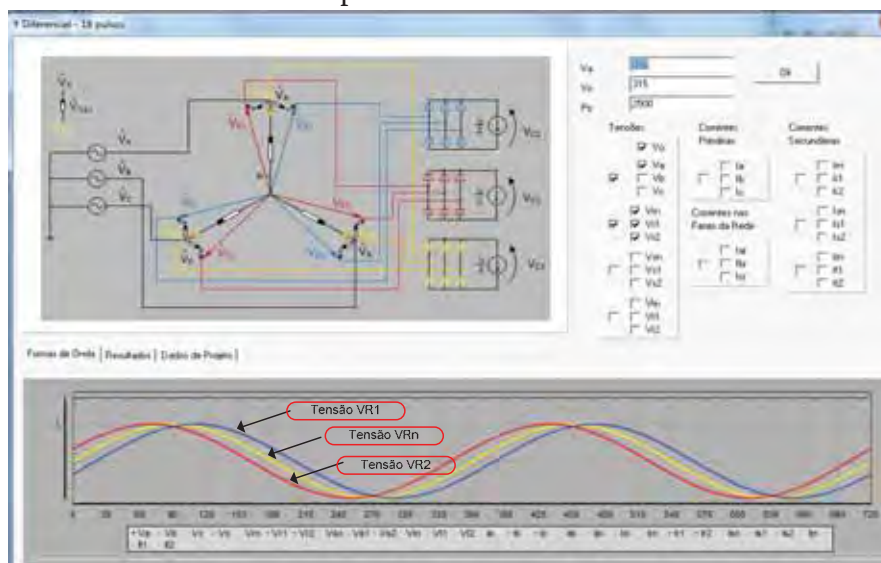
Porém, este programa desenvolvido é suficiente para implementar um retificador com as conexões diferenciais estudadas.

Figura 75 - Tela para a topologia Estrela-diferencial - retificador de 18 pulsos.



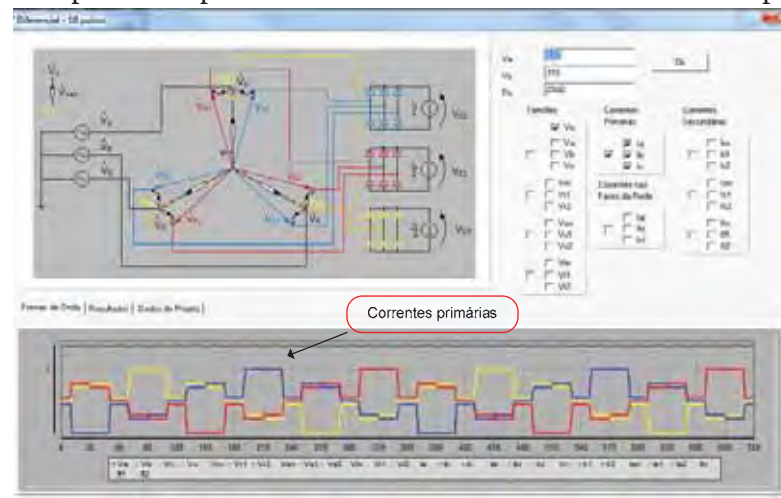
Fonte: Dados do autor.

Figura 76 - Tensões secundárias para o retificador Estrela-diferencial de 18 pulsos.



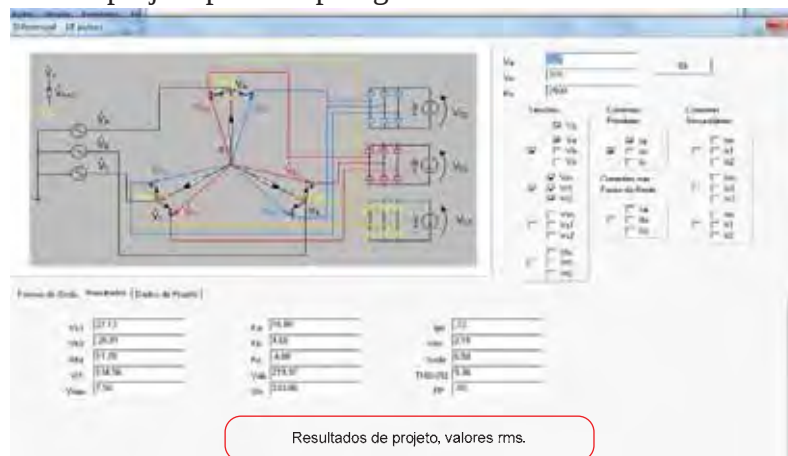
Fonte: Dados do autor.

Figura 77 - Corrente primárias para o Retificador Estrela-diferencial de 18 pulsos ($V_o=315V$).



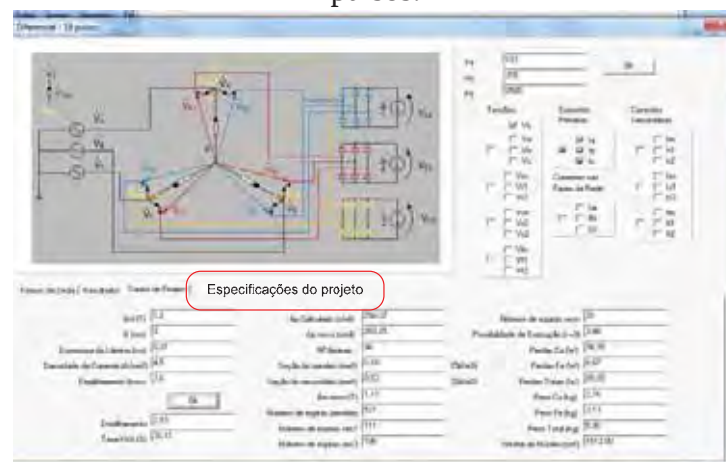
Fonte: Dados do autor.

Figura 78 - Valores de projeto para a topologia Estrela-diferencial - retificador de 18 pulsos.



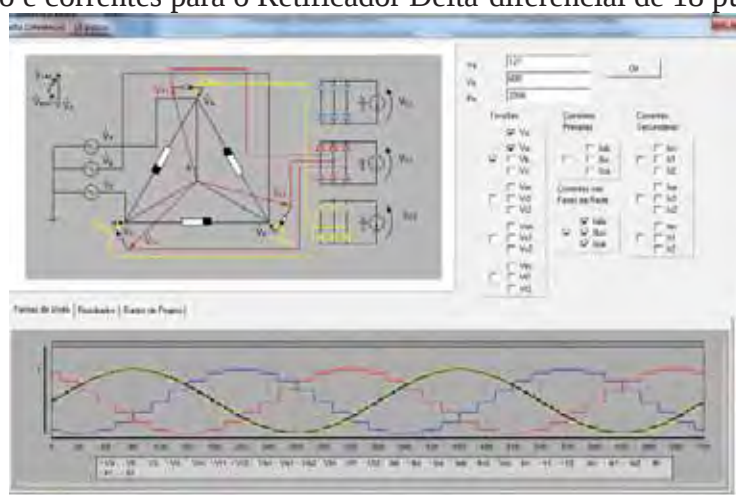
Fonte: Dados do autor.

Figura 79 - Especificações de projeto para a topologia Estrela-diferencial retificador de 18 pulsos.



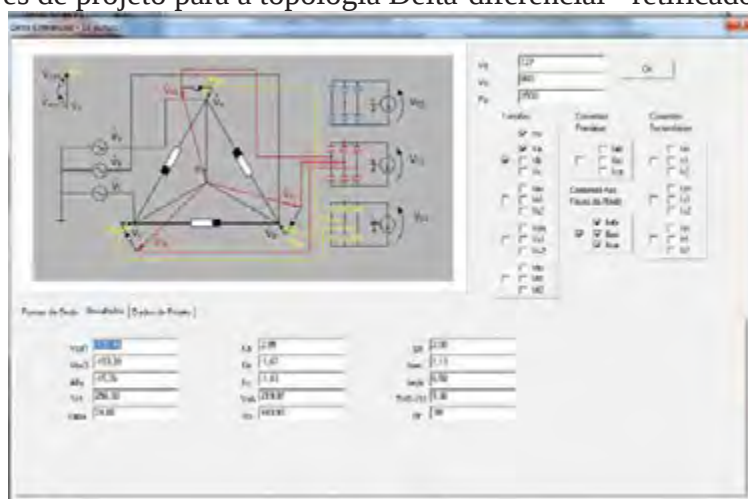
Fonte: Dados do autor.

Figura 80 - Tensão e correntes para o Retificador Delta-diferencial de 18 pulsos ($V_o=600V$).



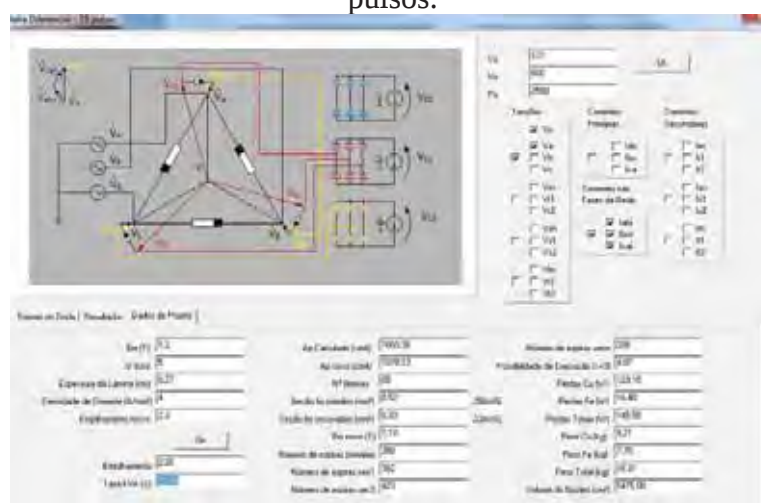
Fonte: Dados do autor.

Figura 81 - Valores de projeto para a topologia Delta-diferencial - retificador de 18 pulsos.



Fonte: Dados do autor.

Figura 82 - Especificações de projeto para a topologia Delta-diferencial - retificador de 18 pulsos.



Fonte: Dados do autor.

4.4 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou a unificação do equacionamento generalizado para as duas topologias Estrela e Delta-diferenciais com configuração A e C, respectivamente. A unificação do equacionamento para tensão já havia sido desenvolvido por Gonçalves em [54]. A contribuição deste capítulo está no equacionamento de unificação das correntes e na apresentação do programa desenvolvido chamado MultiTrafo para fins didáticos mas principalmente como ferramenta de projeto.

Através de uma única equação para tensão é possível obter as tensões sobre todos os enrolamentos do autotransformador seja ele com topologia Delta ou Estrela-diferencial, além disso, o equacionamento permite também escolher o número de pulsos do retificador 12 ou 18 pulsos. No caso das correntes, um grupo de equações para correntes secundárias, primárias e na rede é obtido, porém este grupo de equações também é único e permite encontrar valores de correntes para retificadores com topologias Delta ou Estrela de 12 ou 18 pulsos, assim como para tensão.

Capítulo 5

Metodologia de projeto

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em capítulos anteriores foram apresentadas detalhadamente as topologias Estrela e Delta-diferenciais de transformador. Foi desenvolvido um equacionamento generalizado para cada uma das configurações apresentadas. Estas topologias de transformador foram escolhidas como objeto de estudo deste trabalho não só por apresentarem flexibilidade na escolha da tensão de saída dos retificadores, mas também por possuírem reduzidos peso e volume.

A utilização de retificadores multipulsos não-isolados para aplicações embarcadas vem ganhando força e, parâmetros como peso, volume e custo, são de grande importância. A busca por uma metodologia de projeto que ajude a reduzir estes parâmetros é a principal contribuição deste capítulo e também deste trabalho.

O capítulo apresenta uma nova metodologia de projeto para retificadores com conexões diferenciais. Através de gráficos que relacionam taxa kVA, potência ativa, pesos (núcleo e cobre), é possível se obter critérios para uma melhor escolha da topologia e configuração do retificador a ser utilizada em uma determinada aplicação.

5.2 ESCOLHA DA TOPOLOGIA E CONFIGURAÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR

Uma das grandes vantagens da utilização dos autotransformadores é a baixa taxa kVA, que indica a porcentagem de potência que o núcleo processa. Uma das desvantagens é o fato de não serem isolados, portanto, este tipo de retificador é utilizado em aplicações onde a isolamento não é necessária. Os retificadores apesar de não-isolados permitem que um segundo estágio CC-CC seja conectado em suas saídas, obtendo assim, a isolamento em alta frequência.

As topologias Estrela e Delta-diferencias estudadas, ditas generalizadas, permitem que seja escolhido qualquer valor eficaz de tensão secundária para qualquer valor eficaz de tensão de entrada.

Uma forma de reduzir o peso e volume do núcleo magnético é analisando a potência processada pelo núcleo (taxa kVA). Através do equacionamento para tensão e corrente, apresentados em capítulos anteriores uma planilha foi desenvolvida, variando a tensão média

na saída e fixando a potência em 1 kW. Foram obtidos diferentes valores para taxa kVA, sendo esta taxa calculada através das equações (81) e (82).

É importante dizer que, os valores para taxa kVA são fixos - não variam com a potência ativa na carga.

$$kVA = \frac{S_{total}}{P_o} \quad (81)$$

$$S_{total} = \frac{S_{primário} + S_{secundário}}{2} \quad (82)$$

Os gráficos das Figuras 83 e 84 relacionam a taxa kVA com as tensões secundária e primária (tensões de fase para conexão Estrela e de linha para conexão Delta). Estas curvas foram obtidas para as diferentes configurações das topologias Estrela e Delta.

Na Figura 83 têm-se três curvas, cada uma representa uma possível configuração para conexão Delta-diferencial de 12 pulsos, já a Figura 84 apresenta as duas curvas que representam as configurações para a conexão Estrela-diferencial.

Observa-se que as curvas são próximas e apresentam o mesmo comportamento. A taxa kVA é mínima para todos os retificadores quando a relação entre as tensões é unitária. A tensão média varia de 100 V a 980 V, ou seja, V_{R1} (tensão resultante) varia de 42,7 V a 418,1 V, logo a relação entre as tensões varia de 0,34 a 3,3.

Para os retificadores com conexão Delta-diferencial de 12 pulsos, quando a configuração C é analisada para a região onde a taxa kVA esta abaixo de 50%, a relação entre as tensões vai de aproximadamente 0,7 ($V_{RS1}=154$ V, $V_o=2,34 \cdot V_{R1}=208$ V) à 1,35 ($V_{RS1}=300$ V, $V_o=400$ V), quando a configuração é a D a região vai de aproximadamente 0,8 ($V_{RS1}=176$ V, $V_o=240$ V) à 1,8 ($V_{RS1}=400$ V, $V_o=535$ V), já quando a configuração é a E vai de 0,7 ($V_{RS1}=154$ V, $V_o=210$ V) à 1,8 ($V_{RS1}=400$ V, $V_o=535$ V) como pode-se observar no gráfico da Figura 83.

No caso da topologia Estrela existem apenas duas configurações. Quando se analisa o retificador com topologia Estrela-diferencial de 12 pulsos pode-se obter a configuração A e B. Na configuração B a região onde a taxa kVA é menor que 50% varia de aproximadamente 0,70 ($V_{R1}=89$ V, $V_o=208$ V) a 1,38 ($V_{R1}=175$ V, $V_o=410$ V). Já para a configuração A região varia de aproximadamente 0,76 ($V_{R1}=97$ V, $V_o=2226$ V) a 1,42 ($V_{R1}=180$ V, $V_o=422$ V) como pode-se observar do gráfico da Figura 84.

Figura 83 - Taxa kVA versus Relação entre tensão primária e secundária para retificadores com topologia Delta-diferencial 12 pulsos.

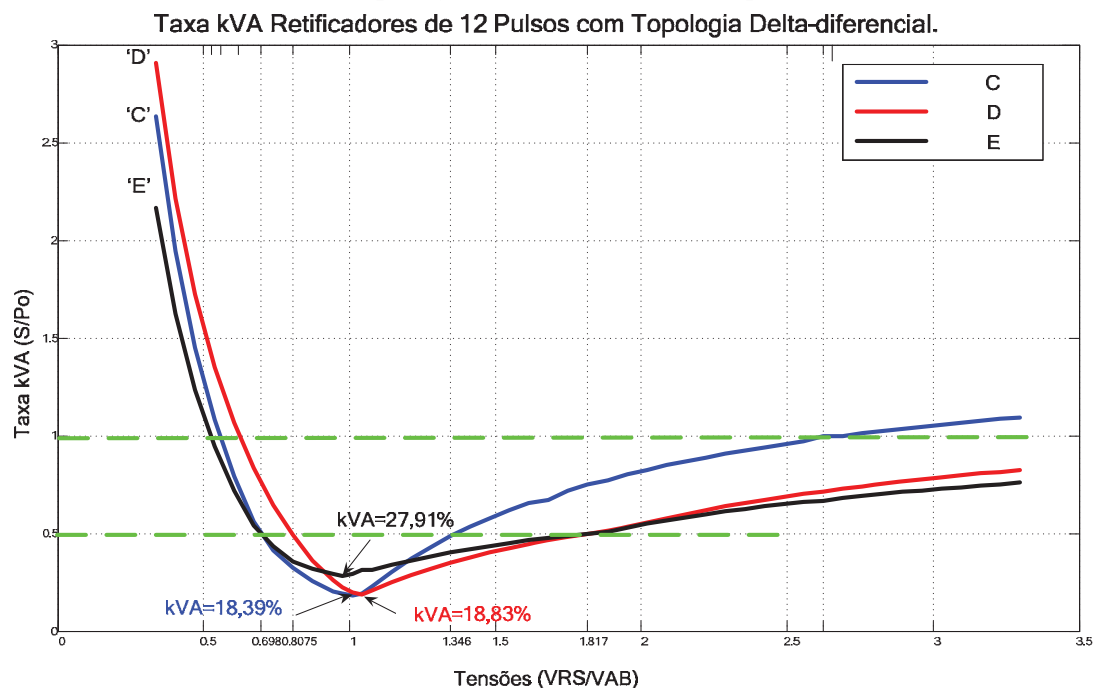
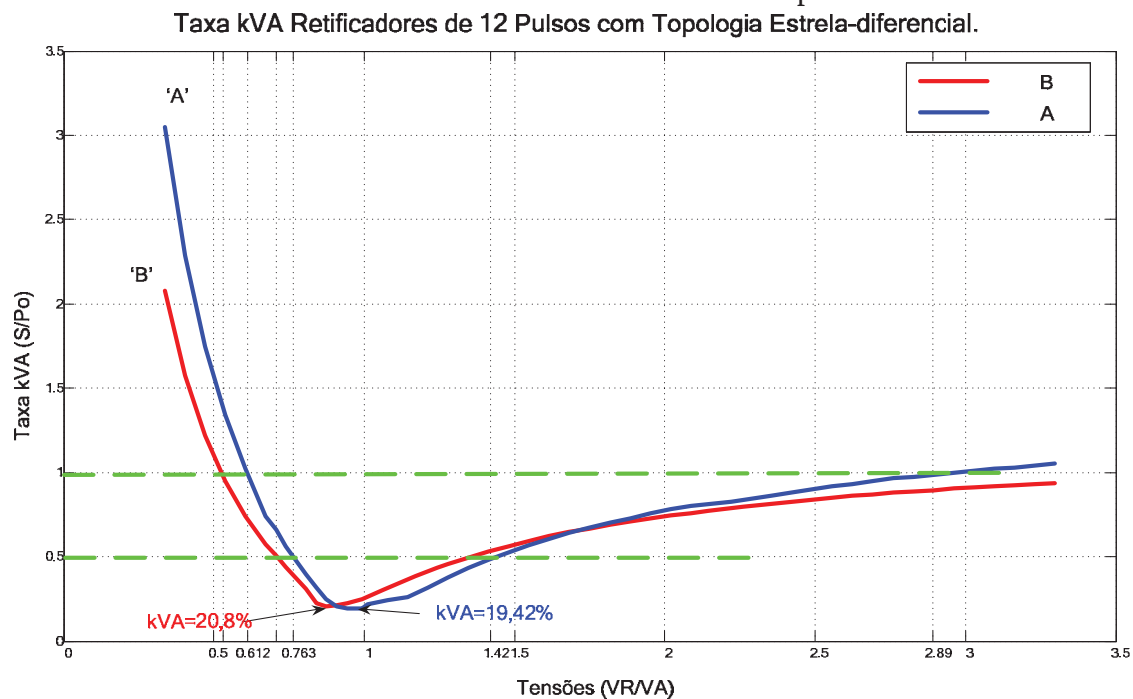


Figura 84 - Taxa kVA versus Relação entre tensão primária e secundária para retificadores com conexão Estrela-diferenciais de 12 pulsos.



Observa-se nos dois casos tanto para Estrela quanto para Delta que os limites entre as regiões para as diferentes configurações são próximas, porém, dependendo do valor escolhido

para tensão de saída a taxa kVA varia influenciando no peso e volume do núcleo do autotransformador.

A mesma análise é realizada para os retificadores com topologia Estrela ou Delta-diferencial de 18 pulsos. A Figura 85 apresenta um gráfico com taxa kVA versus relação de tensões ($V_{\text{primária}}/V_{\text{secundária}}$) para o retificador com topologia Delta-diferencial, já a Figura 86 apresenta um gráfico para a topologia Estrela-diferencial.

Para o retificador com conexão Delta-diferencial de 18 pulsos pode-se obter também três configuração como mostra a Figura 85. Para a configuração C, a região onde a taxa kVA é menor que 50% varia de aproximadamente 0,7 ($V_{\text{RS1}}=154$ V, $V_0=210$ V) à 1,45 ($V_{\text{RS1}}=319$ V, $V_0=431$ V). A mesma faixa pode ser considerada para a configuração E. Já para a configuração D a região varia de aproximadamente 0,8 ($V_{\text{RS1}}=176$ V, $V_0=238$ V) a 1,7 ($V_{\text{RS1}}=374$ V, $V_0=505$ V).

No caso da conexão Estrela-diferencial de 18 pulsos são obtidas duas configurações como mostra a Figura 86. Quando se tem a configuração B, a região onde a taxa kVA é menor que 50% varia de aproximadamente 0,7 ($V_{\text{R1}}=89$ V, $V_0=208$ V) a 1,4 ($V_{\text{R1}}=178$ V, $V_0=416$ V). Já para a configuração B a região varia de aproximadamente 0,7 ($V_{\text{R1}}=89$ V, $V_0=208$ V) a 1,6 ($V_{\text{R1}}=203$ V, $V_0=475$ V).

Figura 85 - Taxa kVA versus Relação entre tensão primária e secundária para retificadores com conexões Delta-diferenciais de 18 pulsos.

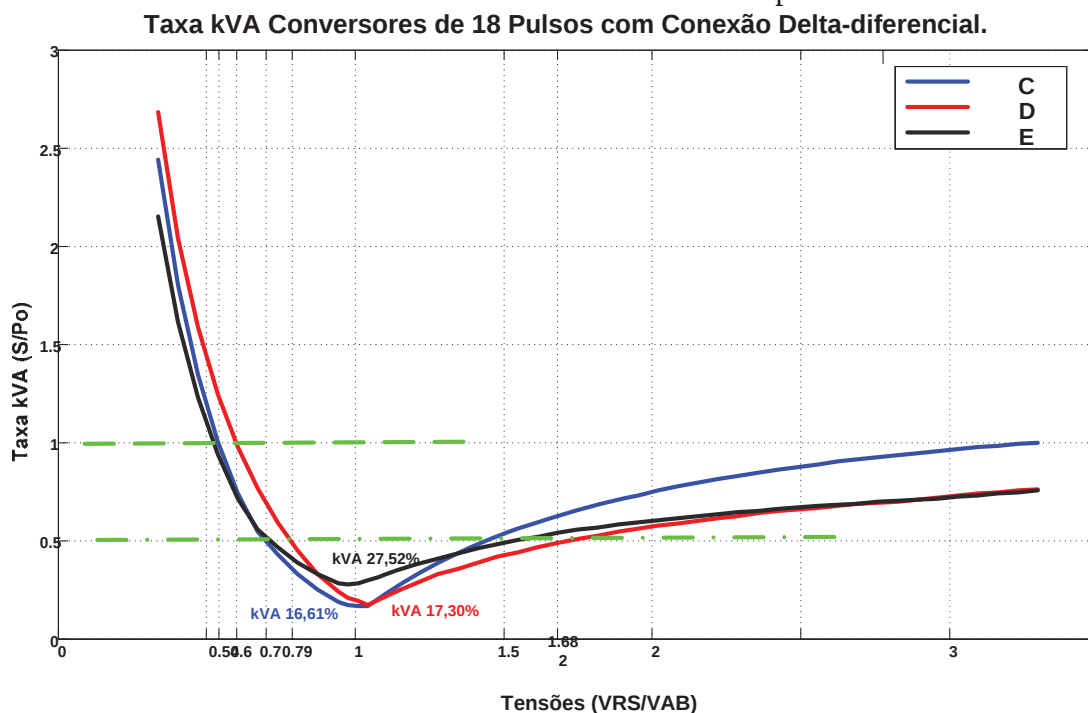
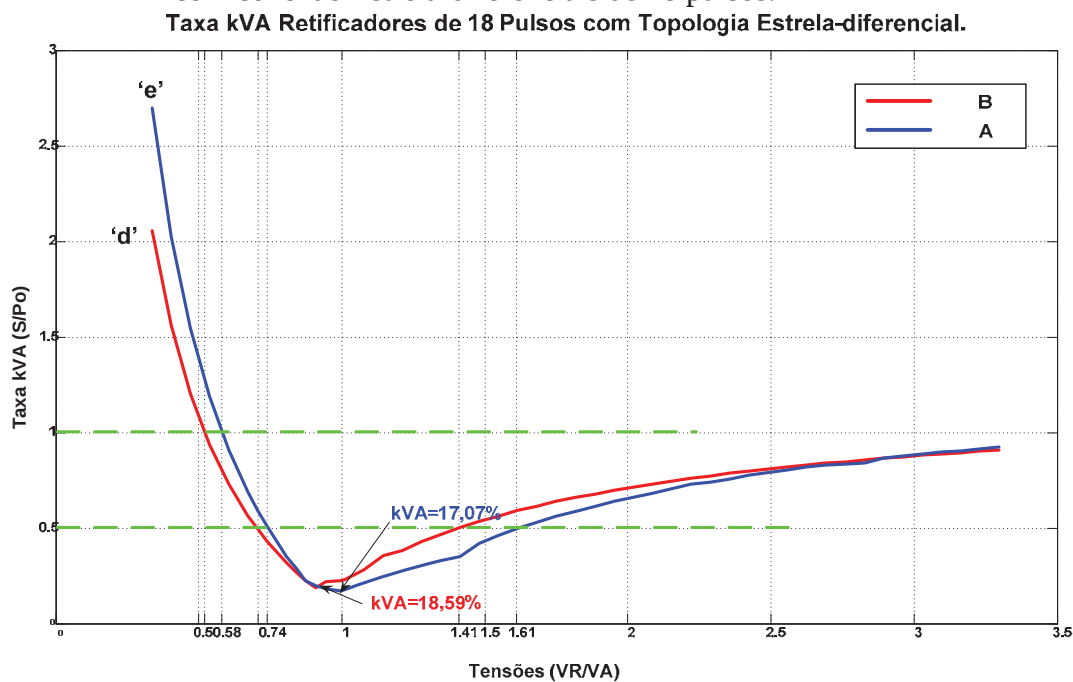


Figura 86 - Taxa kVA versus Relação entre tensão primária e secundária para retificadores com conexão Estrela-diferenciais de 18 pulsos.



A tabela 2 apresenta um resumo da faixa de operação para as diferentes configurações onde a taxa kVA apresenta menor valor.

Tabela 2 – Menor taxa kVA.

Retificadores de 12 pulsos					
	Estrela		Delta		
	A	B	C	D	E
Faixa (V_{sec}/V_{prim})	0,8-1,7	0,33-0,8 >1,7	0,7-1,0	1,0-1,8	0,33-0,7
Retificadores de 18 pulsos					
	Estrela		Delta		
	A	B	C	D	E
Faixa (V_{sec}/V_{prim})	0,8-2,6 >2,6	0,33-0,8 >2,6	0,7-1,0	1,0-2,9	0,33-0,7 >2,9

Fonte: dados do autor

5.3 ESCOLHA DO MATERIAL DO NÚCLEO

A função do núcleo é conter o fluxo magnético e criar um caminho magnético bem definido MPL (*Magnetic Path Length*). A seleção do material e da geometria do núcleo está baseada no compromisso entre peso, volume, tamanho, perdas no núcleo, aumento de temperatura entre outros parâmetros.

Muitos materiais são mal condutores do fluxo magnético. Estes materiais como ar (vácuo) e materiais não magnéticos possuem baixa permeabilidade magnética. Existem poucos materiais como ferro, níquel, cobalto que possuem alta permeabilidade.

A vantagem do núcleo magnético com relação ao núcleo de ar é que as linhas magnéticas (MPL) são bem definidas e o fluxo é essencialmente confinado ao núcleo. Existe um fluxo limite nos materiais magnéticos, acima deste limite o núcleo entra na saturação, região onde a densidade de fluxo magnético (B) é máxima.

O melhor material convencionalmente utilizado na construção de transformadores trifásicos é o aço-silício. Um bom material ferromagnético, além de uma elevada densidade de fluxo magnético também deve apresentar uma elevada permeabilidade relativa (μ_r), com baixas perdas por histerese ou por correntes parasitas. Existem hoje no mercado duas fabricações de laminas as de aço-silício: as de grãos orientados (GO) e as de grãos não-orientados (GNO).

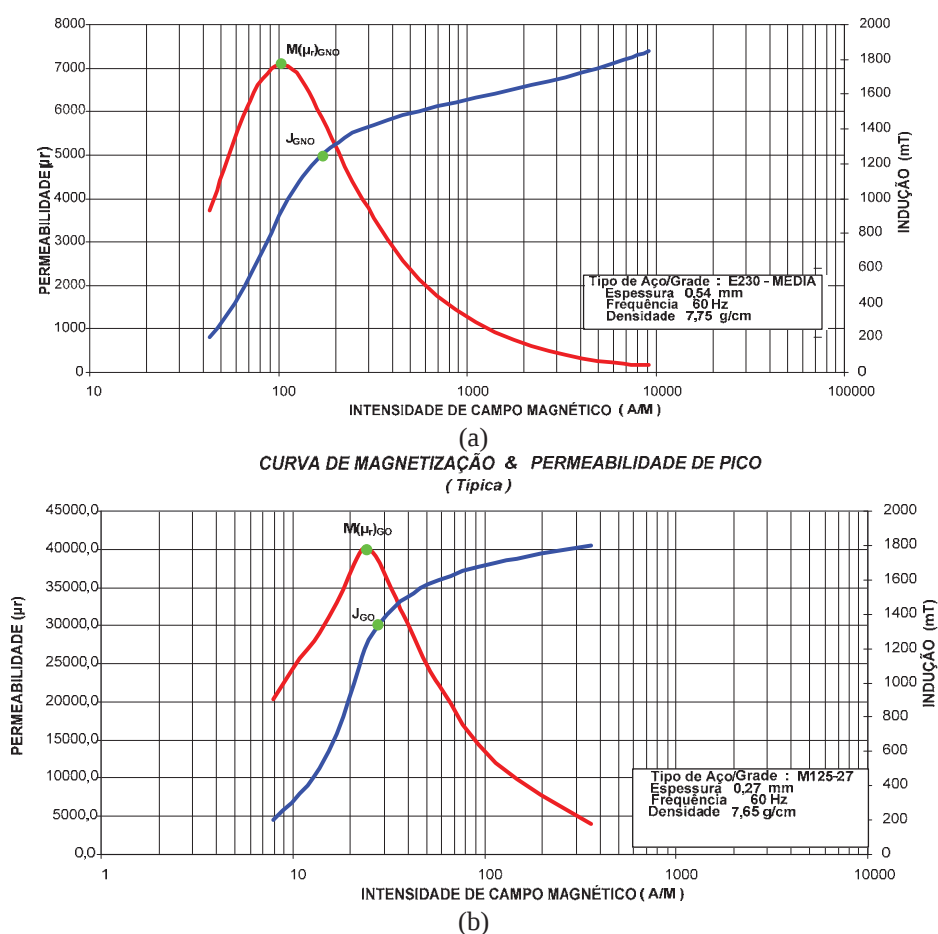
Lâminas do tipo GO apresentam espessuras menores que as do tipo GNO, com valores típicos de 0,18 mm, 0,27 mm e 0,35 mm contra 0,54 mm das laminas GNO. Uma laminação mais fina representa menores perdas por correntes parasitas.

Além disso, lâminas tipo GO apresentam uma estrutura (a nível molecular) orientada a fim de reduzir a relutância entre os caminhos magnéticos do núcleo, reduzindo assim as perdas por histerese.

A Figura 87 apresenta as curvas de magnetização e de permeabilidade para os materiais do tipo GO e GNO a fim de se observar as diferenças entre eles [76].

Figura 87 - Curvas de magnetização a) grãos não orientados, b) grãos orientados.

Gentileza: Siderúrgica Arcelor Mittal
CURVA DE MAGNETIZAÇÃO & PERMEABILIDADE DE PICO



Fonte: Fernandes (2009).

Observa-se nas curvas apresentadas na Figura 87 que os pontos J_{GNO} e J_{GO} (joelho das curvas) ocorrem para valores de intensidade de campo magnético (H) muito diferentes, é exatamente neste ponto que se dá início a região não linear da curva $B-H$. Para o material do tipo GNO esta região começa em aproximadamente 150 A/m, já no material do tipo GO em 26 A/m, o que significa que materiais do tipo GO necessitam de um módulo de campo magnético externo bem menor para levar o núcleo a um estado de elevada densidade de fluxo.

A permeabilidade relativa máxima para os dois tipos de materiais ocorrem em valores diferentes de densidade de campo magnético, no caso do material GNO, quando μ_r é máximo (ponto $M(\mu_r)_{GNO}$), B é de 1000 mT e μ_r igual a 7100. Para o material do tipo GO quando μ_r é máximo (ponto $M(\mu_r)_{GO}$), B é de 1200 mT e μ_r igual a 40000.

Embora as duas curvas tenham valores de B próximos, a permeabilidade relativa é muito maior para o material do tipo GO. Sendo a indutância própria dos enrolamentos

diretamente proporcional a permeabilidade magnética do meio, uma elevada permeabilidade acarreta uma elevada indutância e correntes de magnetização pequenas para transformadores.

É importante dizer que no momento da escolha do parâmetro indução magnética um valor muito elevado pode significar uma permeabilidade baixa levando o transformador a saturação, portanto, na escolha do valor de B deve-se encontrar um ponto ótimo entre B e μ_r .

Outro fator importante na escolha do material a ser utilizado no transformador são as perdas totais de cada um. O material do tipo GNO apresenta 1,9 W/Kg de perdas já o material do tipo GO apenas 0,65 W/Kg.

Levando em consideração as comparações feitas entre os dois materiais, o material do tipo GO apresenta menores perdas, maior permeabilidade magnética, importante vantagens na construção de um transformador.

5.4 ANÁLISES DO PESO DO NÚCLEO E DO COBRE

O peso para o núcleo do autotransformador é calculado de acordo com Maclyman [81]. A equação (83) representa o cálculo do produto das áreas A_c e A_j para transformadores trifásicos.

$$\frac{3}{2} \cdot A_c \cdot A_j = A_p = \left(\frac{kVA \cdot P_o \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_m \cdot f \cdot K_u \cdot K_t} \right)^{1,14} = (cm^4) \quad (83)$$

Sendo:

A_c : área da perna central.

A_j : área da janela.

Com o valor de A_p é possível calcular o valor de A_c através da equação (84).

$$A_c = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{A_p}{A_j} \right) = (cm^2) \quad (84)$$

A partir daí calcula-se o valor do empilhamento do núcleo chamado de b, através da equação (85).

$$b = \frac{A_c}{D} = (cm) \quad (85)$$

Sendo:

D: Dimensão da perna central da lâmina para transformadores trifásicos.

A equação (86) apresenta o calculo para o peso do núcleo.

$$Peso_{núcleo} = \frac{(A_f - 2 \cdot A_j) \cdot b \cdot \sigma}{1000} = (kg) \quad (86)$$

Sendo:

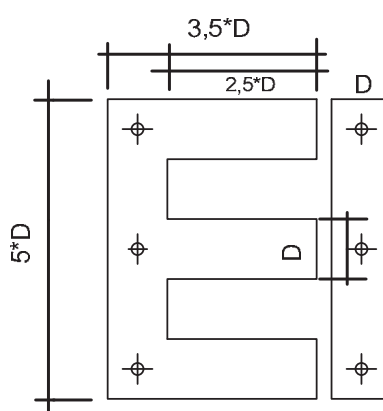
A_f : área frontal da lâmina.

A_j : área da janela

σ : peso específico do ferro 7,65 g/cm³

Foram calculados os pesos para três diferentes dimensões de D, 3 cm, 4 cm e 5 cm. A Figura 88 apresenta as dimensões de uma lâmina para um transformador trifásico.

Figura 88 - Dimensões lâmina E-I.



Fonte:

O cálculo para o peso do cobre é realizado através das seguintes equações. Primeiro calcula-se o número de espiras de todos os enrolamentos através da equação (87).

$$N = V_{enrolamento} \cdot \left(\frac{10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot A_c} \right) = (espiras) \quad (87)$$

O segundo passo é calcular a área da seção do fio a ser utilizado através da equação (88).

$$A_{cobre} = \frac{I_{enrolamento}}{J} = (mm^2) \quad (88)$$

A equação (89) apresenta o valor para L_m (comprimento médio da espira).

$$L_m = 2 \cdot (D + b) + (0,5 \cdot \pi \cdot D) = (cm) \quad (89)$$

Em (90) é apresentado o cálculo para área da seção do cobre para a conexão Estrela (Y).

$$S_{cobre_Y} = 2 \cdot N_{primário} \cdot S_{primário} + 2 \cdot N_{sec1} \cdot S_{sec} + 2 \cdot N_{sec3} \cdot S_{sec} + N_{secn} \cdot S_{sec} \quad (90)$$

Para a topologia Delta a área da seção do cobre é dada por (91)

$$S_{\text{cobre}\Delta} = 2 \cdot N_{\text{primário}} \cdot S_{\text{primário}} + 2 \cdot N_{\text{sec1}} \cdot S_{\text{sec}} + 2 \cdot N_{\text{sec3}} \cdot S_{\text{sec}} + 2 \cdot N_{\text{secn}} \cdot S_{\text{sec}} \quad (91)$$

O peso do cobre de cada enrolamento é dado pela equação (92).

$$\text{Peso}_{\text{cobre}} = \frac{S_{\text{cobre}} \cdot \rho \cdot L_m}{100} = (\text{gramas}) \quad (92)$$

Sendo:

S_{cobre} : $N \cdot A_{\text{cobre}}$.

ρ_{cu} : densidade do cobre igual a 8,9 g/cm³.

A partir do equacionamento para os pesos do núcleo e do cobre, foi possível obter gráficos para as diferentes configurações das conexões Delta e Estrela-diferenciais, tanto para os retificadores de 12 como 18 pulsos.

Estes gráficos apresentam o comportamento do peso do núcleo, do cobre e o peso total para os retificadores de 12 e 18 pulsos estudados. Foram obtidos resultados para diferentes tamanhos de lâminas 3, 4 e 5 cm para uma potência de 1, 3 e 6 kW.

5.4.1 Retificadores de 12 pulsos

- **Conexão Delta diferencial configuração C.**

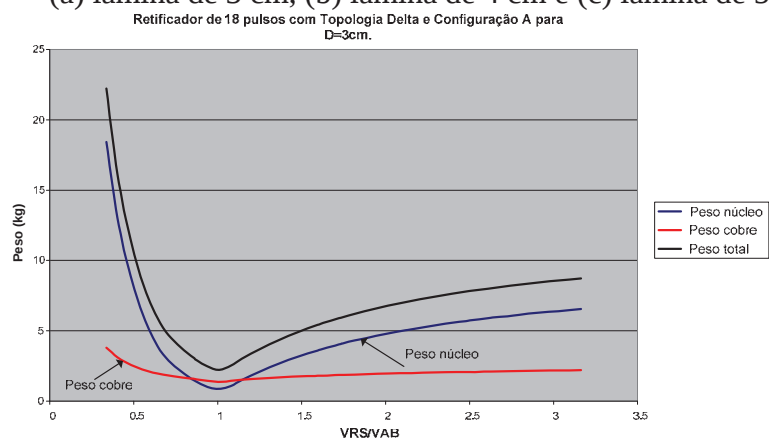
Os gráficos da Figura 89 apresentam o peso (kg) em relação às tensões V_{RS1} (tensão de linha resultante) e V_{AB} (tensão de linha primária) ($V_{\text{RS1}}/V_{\text{AB}}$), para o retificador com topologia Delta e configuração C.

A Figura 89 (a) apresenta resultados para o peso do retificador quando é utilizada a lâmina de 3 cm (como tamanho da perna central). O gráfico mostra que o peso do cobre é praticamente constante e o peso total, portanto, segue o comportamento do peso do núcleo. Na Figura 89 (b) tem-se os pesos para a lâmina de 4 cm, observa-se que existe um pequeno aumento no peso do cobre quando se tem um menor peso no núcleo (menor taxa kVA), este fato é melhor observado na Figura 89 (c) para lâmina de 5 cm.

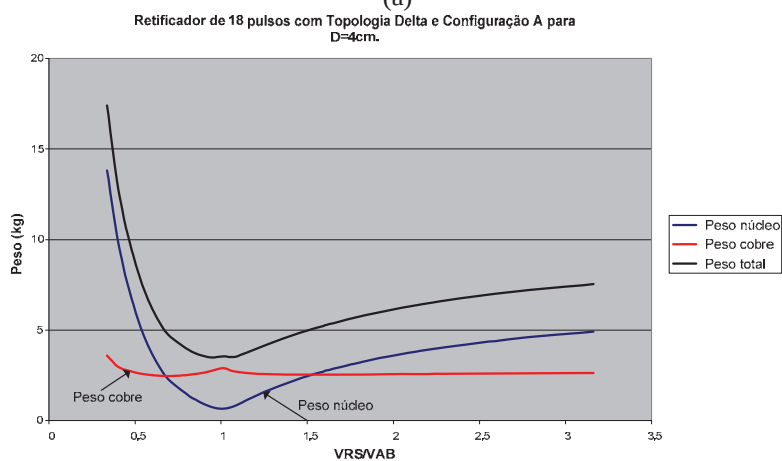
Os três gráficos ainda mostram que a região para um peso menor que 5 Kg é maior quando se utiliza a lâmina de 3 cm, já com a lâmina de 5 cm a uma potência de 1 kW não é possível se obter pesos menores que 5 Kg.

Figura 89 - Peso para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e Configuração A, potência de 1kW

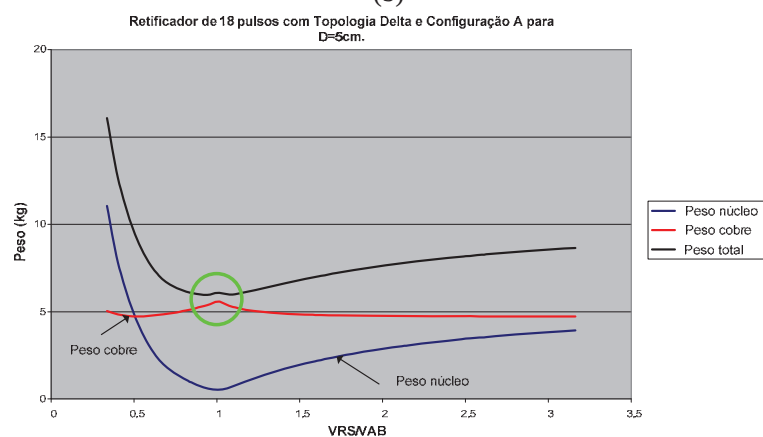
(a) lâmina de 3 cm, (b) lâmina de 4 cm e (c) lâmina de 5 cm.



(a)



(b)



(c)

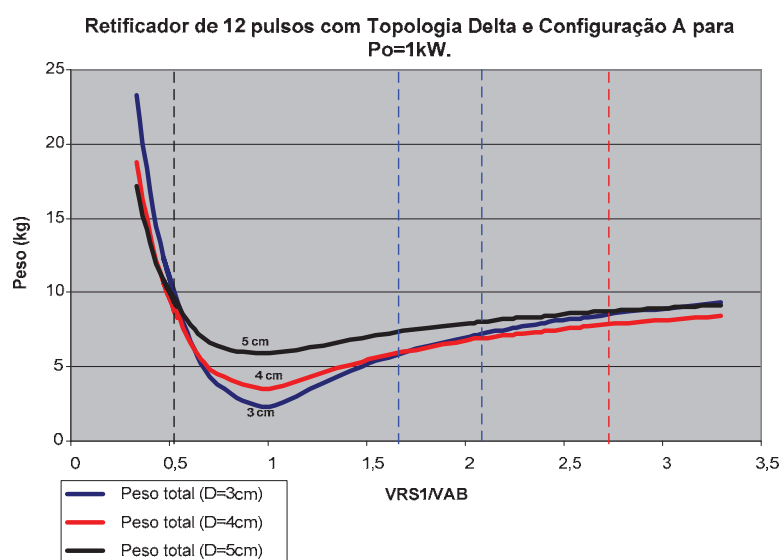
Fonte: Dados do autor.

Reunindo em um único gráfico as curvas do peso total para os diferentes tamanhos de lâminas e para a potência de 1 kW, Figura 90, observa-se que em aproximadamente 0,5 os pesos são os mesmos para as três lâminas, entre 1,6 e 2,1 o peso se torna igual para as lâminas de 3 e 4 cm e é o menor peso encontrado para esta configuração. Acima de aproximadamente

2,7 o peso é menor para a lâmina de 4 cm, porém, os pesos se igualam para as lâminas de 3 e 5 cm.

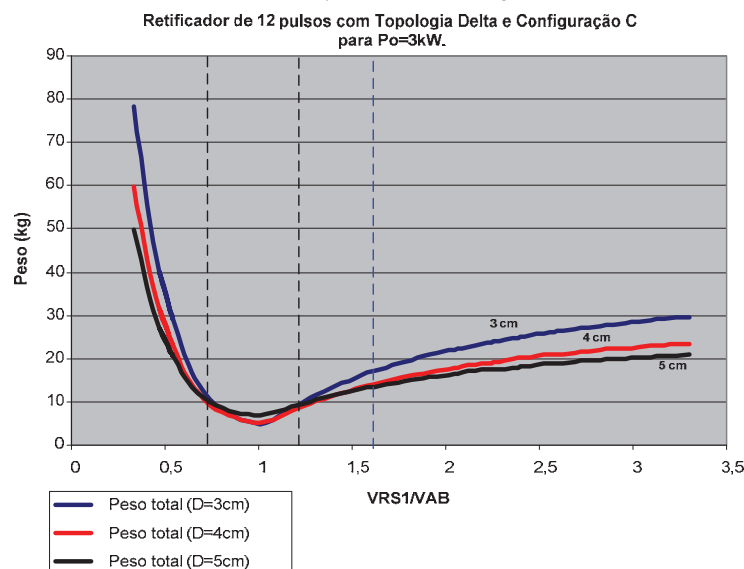
Para uma potência agora de 3 kW tem-se a Figura 91 nela observa-se a aproximação das curvas. Além disso, para uma relação de tensões de aproximadamente 0,6 existe uma equivalência entre os pesos das lâminas, no intervalo de 1,3 à 1,55 os pesos das lâminas de 3 e 4 cm. são próximos.

Figura 90 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração C, lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1kW$.



Fonte: Dados do autor.

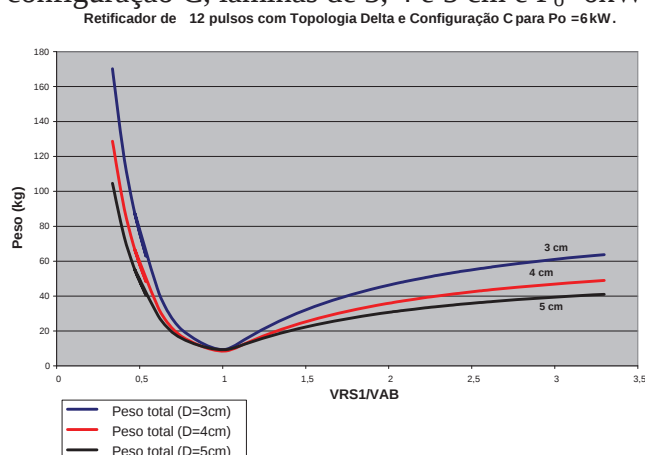
Figura 91 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração C, lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=3kW$.



Fonte: Dados do autor.

Aumentando a potência para 6 kW, pode-se observar o gráfico da Figura 92. A partir de 6 kW as curvas começam a se afastar, o peso é menor para lâmina de 5 cm. Apenas em uma pequena região próxima da relação unitária entre as tensões os pesos para as três lâminas são próximos.

Figura 92 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração C, lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=6kW$.

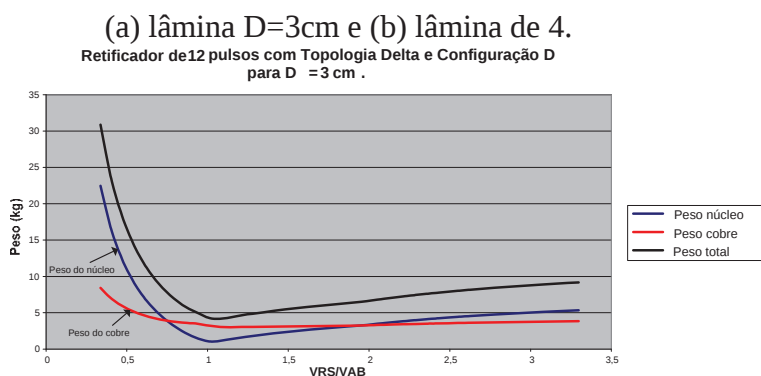


Fonte: Dados do autor.

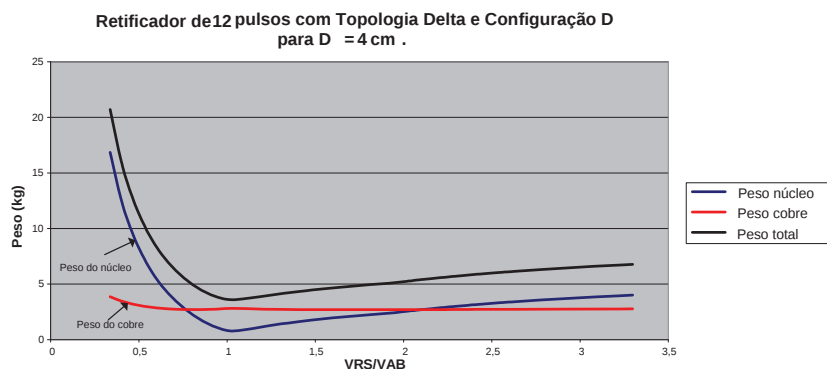
- **Conexão Delta diferencial configuração D.**

Para esta configuração diferentemente do caso anterior (configuração C), a lâmina de 4 cm apresenta maior área correspondente a um peso menor que 5 Kg para uma potência de 1 kW como mostra a Figura 93 (a) para 3 cm e (b) para 4 cm. O comportamento para a lâmina de 5 cm é o mesmo apresentado na Figura 89 (c).

Figura 93 - Peso para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração D e $P_o=1kW$



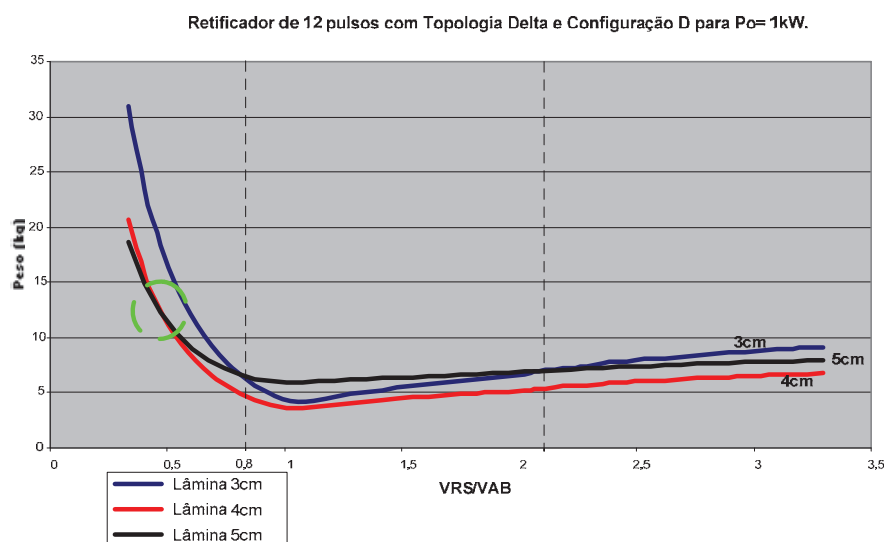
(a)



Fonte: Dados do autor.

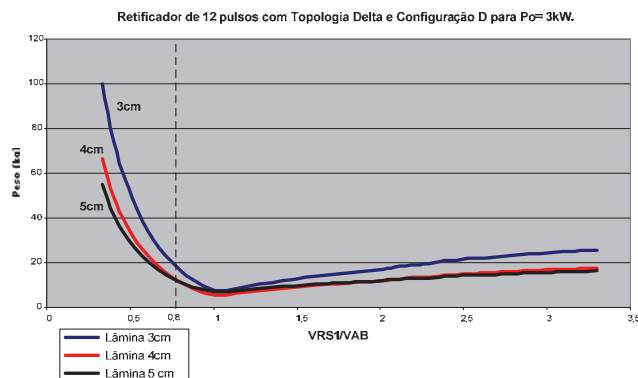
Para a configuração D o gráfico que reúne as curvas do peso total para os diferentes tamanhos de lâmina a uma potência de 1kW é apresentado na Figura 94. Observa-se que existe uma região entre 0,4 e 0,5 onde os pesos são iguais para as lâminas de 4 e 5 cm e pontos como 0,8 e 2,1 onde as curvas para lâminas 3 e 5 cm se cruzam.

Figura 94 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração D com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1\text{kW}$.



No caso da potência de 3 kW a tendência das curvas é a mesma, porém, existem algumas diferenças como, por exemplo, as curvas para 4 cm e 5 cm serem muito próximas em quase toda sua extensão como mostra a Figura 95.

Figura 95 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração D com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=3kW$.



Fonte: Dados do autor.

O comportamento do peso para a potência de 6 kW é próximo do apresentado na Figura 92.

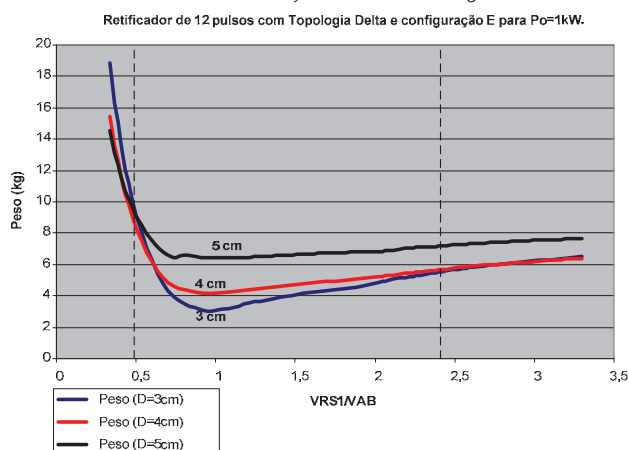
- **Conexão Delta diferencial configuração E.**

Quando a configuração analisada é a E, os gráficos para os pesos separados núcleo, cobre e total apresentam características semelhantes aos apresentados para a configuração D. Neste caso também existe uma maior área onde o peso é menor que 5 Kg quando se utiliza a lâmina de 4 cm a uma potência de 1 kW.

A lâmina de 5 cm ainda apresenta maior peso de cobre e portanto maior peso total.

A Figura 96 apresenta curvas para o peso total (cobre mais núcleo) para os diferentes tamanhos de lâminas analisados a uma potência de 1 kW. Observa-se das curvas que em aproximadamente 0,5 os pesos são os mesmos para as três lâminas, porém, acima de 2,4 o peso é o mesmo para as lâminas de 3 e 4 cm.

Figura 96 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Delta e configuração E com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1kW$.



Fonte: Dados do autor.

Para a potência de 3 kW o comportamento das curvas é muito semelhante ao apresentado na configuração D, Figura 95. Para 6 kW o comportamento continua sendo o mesmo apresentado na configuração C, as curvas começam a se afastar, os pesos são equivalentes para as três lâminas para a relação unitária caso contrário o peso é menor quando a lâmina utilizada é a de 5 cm.

- **Conexão Estrela diferencial configuração A.**

A Figura 97 apresenta gráficos que relacionam tensões (V_{R1}/V_A) com peso, para o retificador com conexão Estrela e configuração A. Observa-se que o comportamento das curvas é o próximo do apresentado para a topologia Delta. Neste caso a Figura 97 (a) apresenta as curvas quando a lâmina a ser utilizada é a de 3 cm, observa-se que esta curva apresenta uma maior região onde o peso é menor. Comparada com as curvas das Figuras 5.15 (b) e (c) para 4 e 5 cm respectivamente.

Quando se reúne em um único gráfico as curvas para os diferentes tamanhos de lâmina é mais fácil observar qual tamanho de lâmina é mais interessante de se utilizar para se obter um menor peso para a estrutura retificadora. A Figura 98 apresenta este gráfico para uma potência de 1 kW. Observa-se da figura que em aproximadamente 0,55 existe um ponto de cruzamento, assim, neste ponto qualquer lâmina que seja escolhida o peso será o mesmo, aproximadamente 10 kg. Outro ponto onde ocorre o cruzamento, agora das lâminas de 3 e 4 cm é em aproximadamente 2. A partir de 3 os pesos das lâminas de 3 e 5 cm se igualam, porém o menor peso é encontrado para a lâmina de 4 cm.

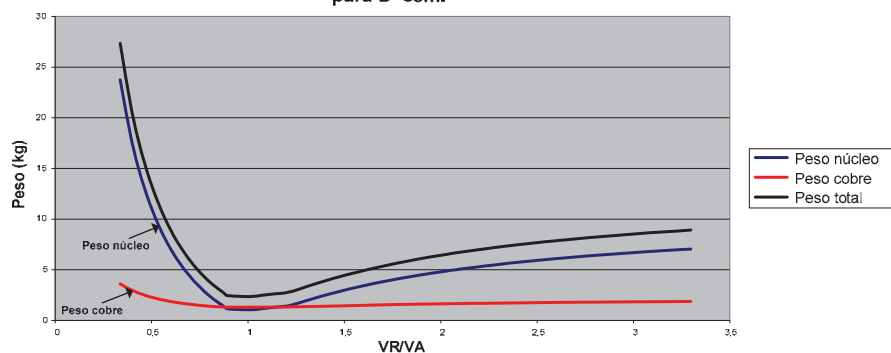
Quando a potência analisada é de 3 kW observa-se que entre 0,7 e 1,45 aproximadamente os pesos se igualam para as lâminas de 3 e 4 cm, para valores menores que 0,7 e maiores que 1,45 o peso para as lâminas de 4 e 5 cm se tornam bem próximos como mostra a Figura 99.

Para a potência de 6 kW existe apenas uma pequena região em torno da relação unitária onde o peso é equivalente para os três tamanhos de lâminas, porém, a partir de 6 kW as curvas vão se afastando e o peso total se torna menor apenas para a lâmina de 5 cm como mostra a Figura 100.

Figura 97 - Peso para o retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela, configuração A e de $P_o=1kW$

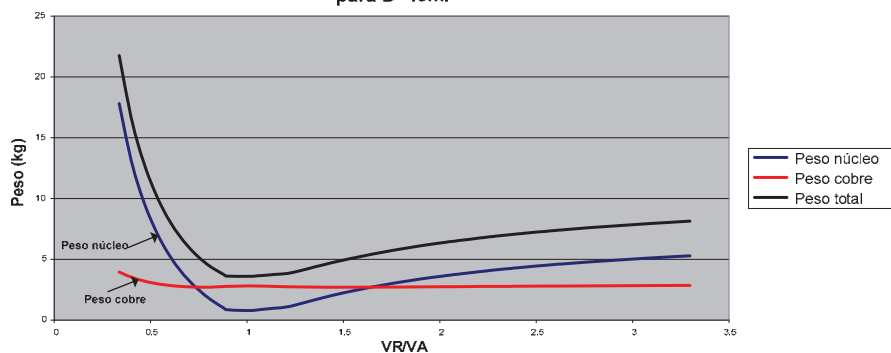
(a) lâmina de 3 cm, (b) lâmina de 4 cm e (c) lâmina de 5 cm.

Retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela e Configuração A para D=3cm.



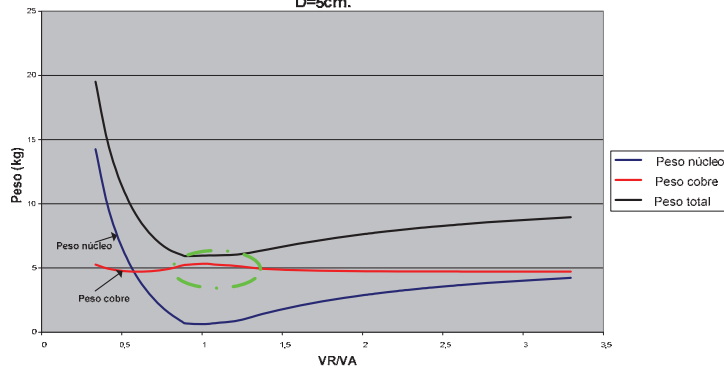
(a)

Retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela e Configuração A para D=4cm.



(b)

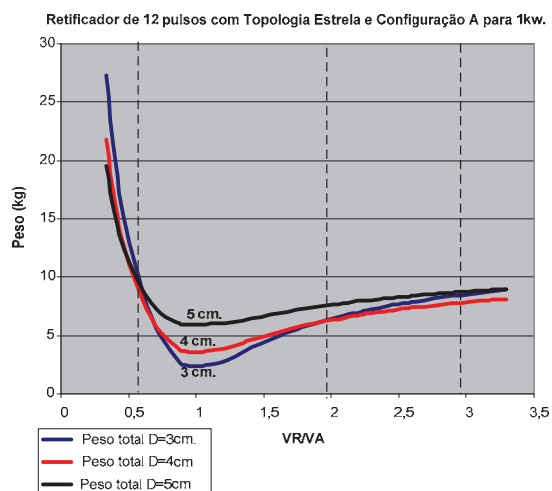
Retificador de 12 Pulsos com Topologia Estrela e Configuração A para D=5cm.



(c)

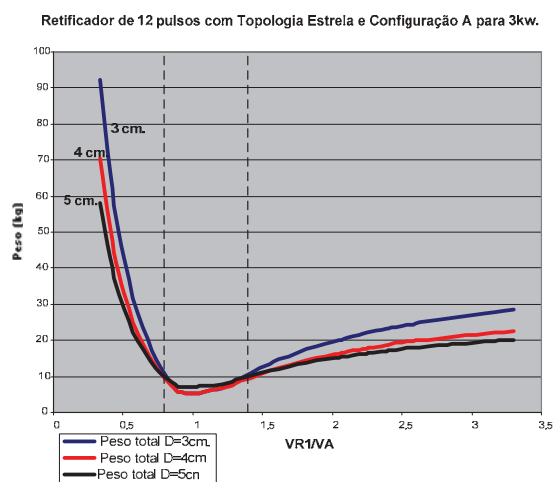
Fonte: Dados do autor.

Figura 98 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela e Configuração A com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1kW$.



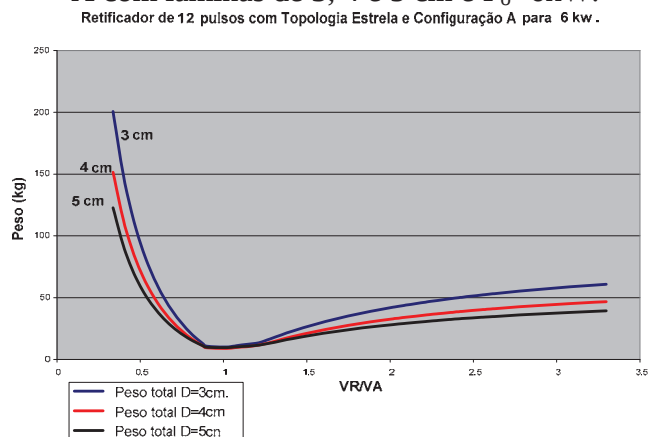
Fonte: Dados do autor.

Figura 99 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela e configuração A com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=3kW$.



Fonte: Dados do autor.

Figura 100 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela e configuração A com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=6kW$.



Fonte: Dados do autor.

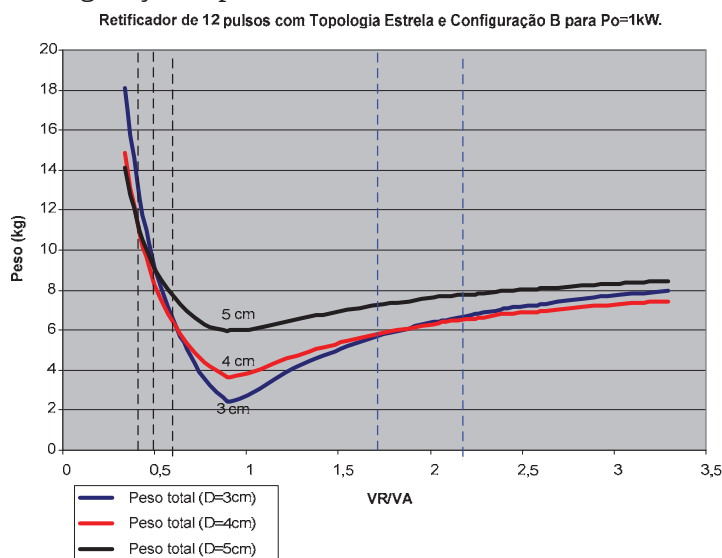
- **Conexão Estrela diferencial configuração B.**

O comportamento dos gráficos que apresentam o comportamento para o peso do cobre e núcleo separadamente é o mesmo apresentado na configuração A.

A Figura 101 apresenta o peso total para os diferentes tamanhos de lâminas (3, 4 e 5 cm) reunidos em um único gráfico para potência de 1 kW. Existem pontos onde o peso das lâminas se equivale como pode ser visto na Figura 101. O peso das lâminas de 3 e 4 cm se igualam entre 1,65 e 2,2.

O comportamento dos gráficos para as potências de 3 e 6 kW são semelhantes aos apresentados nos gráficos das Figuras 5.17 e 5.18 respectivamente.

Figura 101 - Peso total para o retificador de 12 pulsos com Topologia Estrela e configuração B para lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1\text{kW}$.



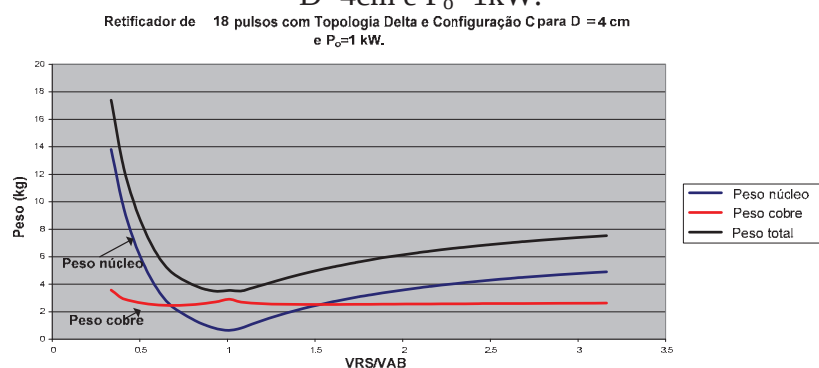
Fonte: Dados do autor.

5.4.2 Retificadores de 18 pulsos

- **Conexão Delta diferencial configuração C.**

O comportamento para peso do núcleo, peso do cobre e peso total, são os mesmos apresentados para o retificador de 12 pulsos. A Figura 102 serve para ilustrar esta afirmação, foi gerada para uma potência de 1 kW e lâmina de 4 cm.

Figura 102 - Peso para o retificador de 18 pulsos com Topologia Delta e configuração C para $D=4\text{cm}$ e $P_o=1\text{kW}$.

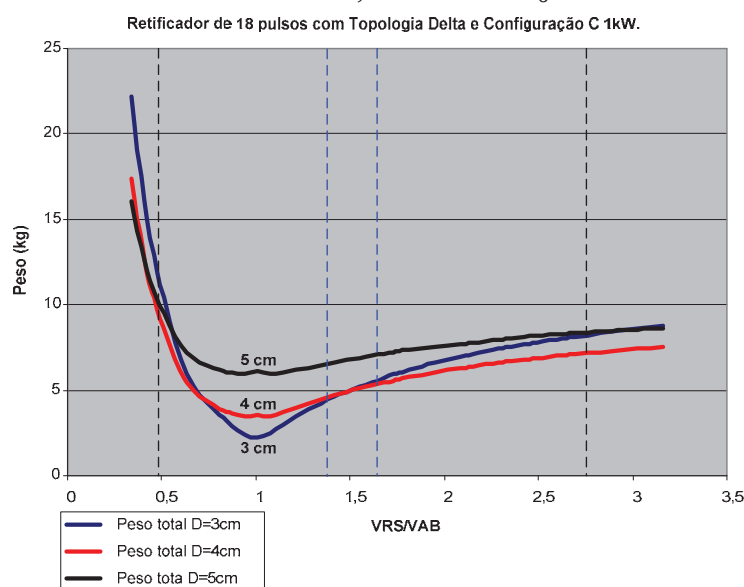


Fonte: Dados do autor.

A Figura 103 apresenta o peso total para os diferentes tamanhos de lâminas (3, 4 e 5 cm) e potência de 1kW. Para uma relação de tensões entre 1,1 e 1,6 o peso é o mesmo para as lâminas de 3 e 4 cm, em aproximadamente 0,5 os pesos são os mesmos para as três lâminas, acima de aproximadamente 2,7 o peso é menor para a lâmina de 4 cm, porém, os pesos se igualam para as lâminas de 3 e 5 cm.

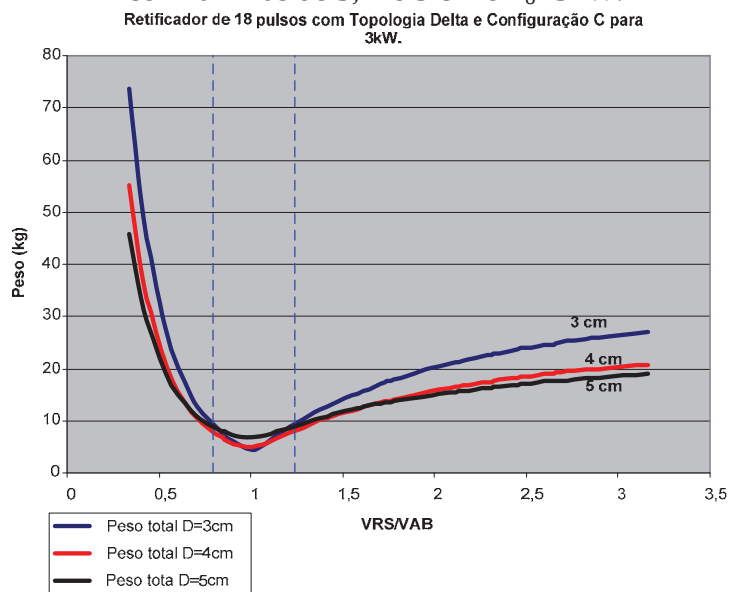
Para a potência de 3 kW como mostra a Figura 104 a região entre 0,8 e 1,35 aproximadamente apresenta peso equivalente para as lâminas de 3 e 4 cm, já para valores menores que 0,8 e maiores que 1,35 o peso encontrado para as lâminas de 4 e 5 cm são bem próximos.

Figura 103 - Peso total para o retificador de 18 pulsos com Topologia Delta e configuração C com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1\text{kW}$.



Fonte: Dados do autor.

Figura 104 Peso total para o retificador de 18 pulsos com Topologia Delta e configuração C com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=3kW$.



Fonte: Dados do autor.

O comportamento das curvas para a potência de 6 kW é semelhante ao apresentado para o retificador de 12 pulsos e mesmas topologias e configuração.

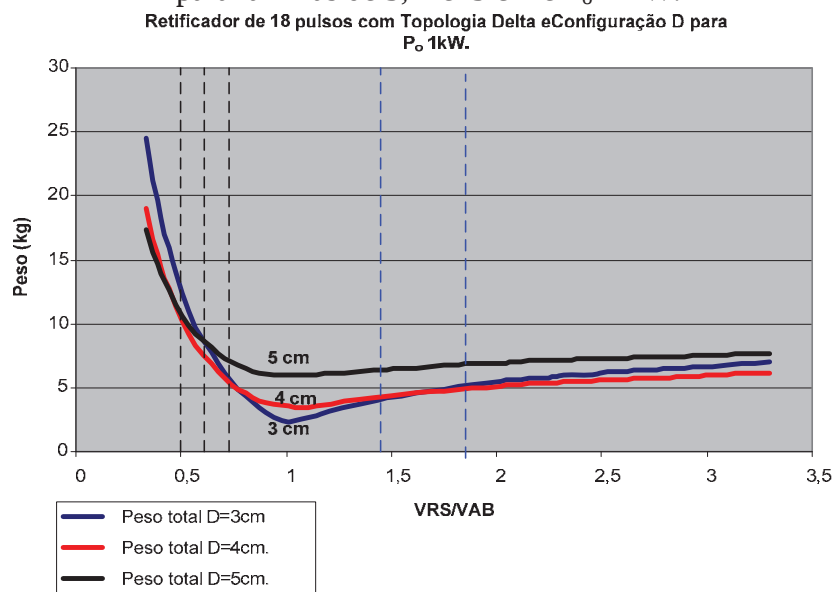
- **Conexão Delta diferencial configuração D.**

Não serão apresentados novamente os gráficos para as curvas dos pesos separadamente, pois, os comportamentos das mesmas se assemelham as já apresentadas para os retificadores de 12 pulsos.

É interessante apresentar o gráfico com as curvas para os pesos totais e diferentes tamanhos de lâminas, pois, as regiões onde os pesos se equivalem são diferentes. A Figura 105 apresenta o peso total para os três tamanhos de lâminas, para a potência de 1 kW. Para os pontos 0,5 e 0,7 o peso é o mesmo para as lâminas de 4 e 5 cm, já para o ponto 0,6 as lâminas de 3 e 4 cm apresentam o mesmo peso. Observa-se ainda que, entre 1,45 e 1,7 o peso é o mesmo para as lâminas de 3 e 4 cm, além disso, nesta faixa o peso é o menor possível.

No caso da potência de 3 e 6 kW o comportamento das curvas é muito semelhante, assim, as regiões onde os pesos se igualam são muito próximas. No caso de 6 kW, a única região onde o peso é o mesmo para as três laminas é em torno da relação unitária, a partir daí as curvas começam a se afastar.

Figura 105 - Peso total para o retificador de 18 pulsos com Topologia Delta e configuração D para lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1kW$.

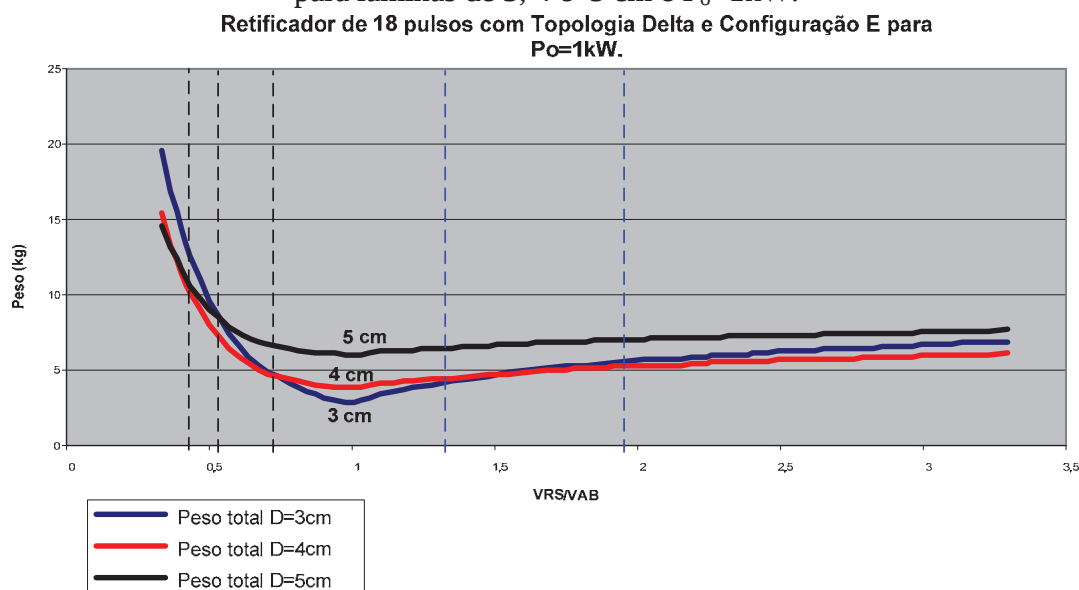


Fonte: Dados do autor.

- Conexão Delta diferencial configuração E.**

A Figura 106 apresenta o peso total para os diferentes tamanhos de lâminas (3, 4 e 5 cm) e potência de 1 kW. Para valores menores que 0,4 o peso para as lâminas de 4 e 5 cm são os mesmos, entre 1,4 e 1,9 o peso para as lâminas de 3 e 4 cm são os mesmos, no ponto 0,5 as curvas de 3 e 5 cm se cruzam, já em 0,7 as curvas de 3 e 4 cm se cruzam.

Figura 106 - Peso total para o retificador de 18 pulsos com Topologia Delta e configuração E para lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1kW$.



Fonte: Dados do autor.

As mesmas considerações realizadas para as configurações anteriores com relação as curvas de 3 e 6 kW podem ser consideradas neste caso.

- **Topologia Estrela diferencial configuração A.**

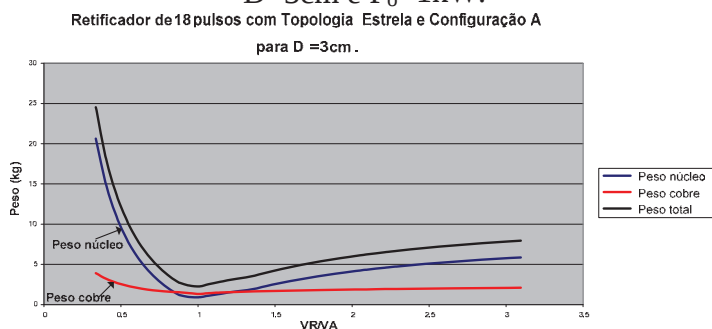
A Figura. 5.25 apresenta curvas para lâmina de 3 cm do peso do núcleo, cobre e peso total separadamente. Estas curvas mostram que o comportamento das mesmas é semelhante ao apresentado para o retificador de 12 pulsos, por isso, elas são apresentadas apenas para lâmina de 3 cm.

O gráfico que reúne as curvas para o peso total referentes aos três tamanhos de lâminas para a potência de 1 kW é apresentado na Figura 108. Como foi realizado anteriormente para as demais configurações observa-se os pontos ou faixas de valores onde os pesos se igualam para dois ou mais tamanhos de lâminas. Por exemplo, para valores menores que 0,5 os pesos das lâminas de 4 e 5 cm se igualam. Existe uma pequena região em que os pesos das três lâminas se aproximam, além disso, pode-se observar que aproximadamente entre 1,5 e 2,4 os pesos para as lâminas de 3 e 4 cm são iguais.

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam os gráficos para os pesos totais dos retificadores para os três tamanhos de lâminas e potências de 3 e 6 kW respectivamente. Existe uma região em destaque para o gráfico cuja potência é de 3 kW onde o peso para as três lâminas é praticamente o mesmo.

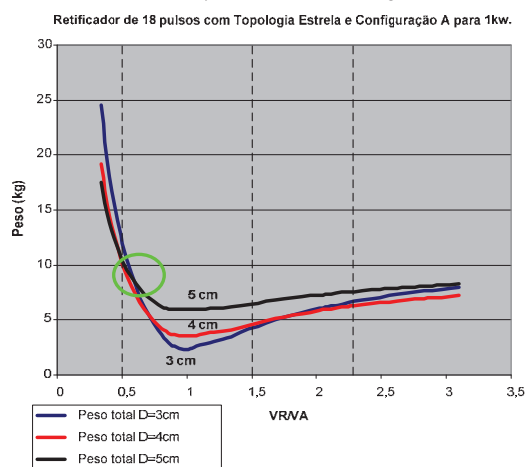
Acima de 6 kW as curvas cada vez mais se distanciam ainda em 6 kW existe uma pequena região próxima da relação de tensões unitária onde os pesos se igualam.

Figura 107 - Peso para o retificador de 18 pulsos com topologia Estrela e configuração A para $D=3\text{cm}$ e $P_o=1\text{kW}$.



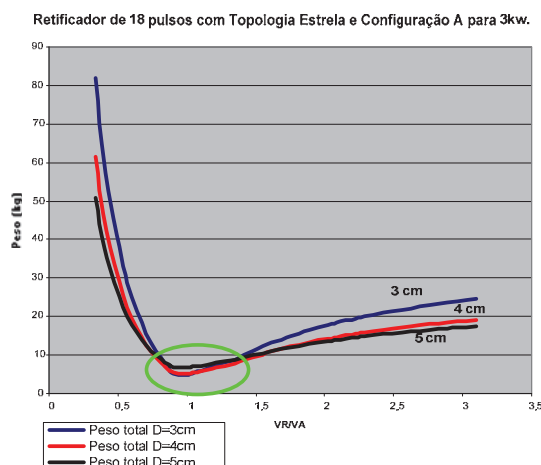
Fonte: Dados do autor.

Figura 108 Peso total para o retificador de 18 pulsos com Conexão Estrela (V_{c1} , V_{b3}) com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1kW$.



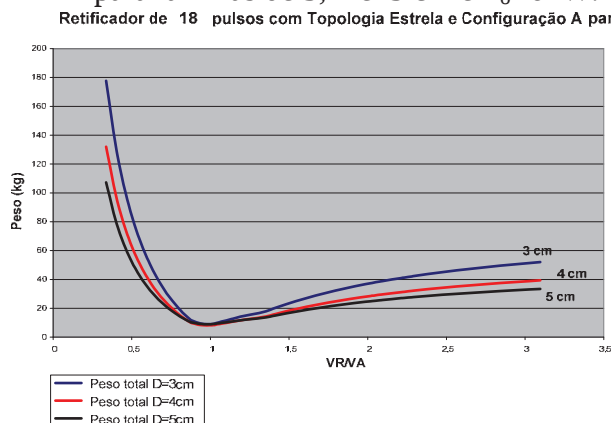
Fonte: Dados do autor.

Figura 109 - Peso total para o retificador de 18 pulsos com Conexão Estrela (V_{c1} , V_{bc3}) com lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=3kW$.



Fonte: Dados do autor.

Figura 110 - Peso total para o retificador de 18 pulsos com topologia Estrela e configuração A para lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=6kW$.



Fonte: Dados do autor.

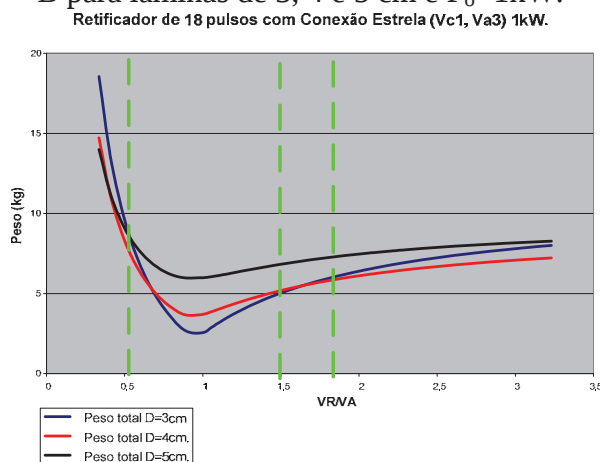
- **Topologia Estrela diferencial configuração B.**

As curvas para peso do núcleo, peso do cobre e peso total são semelhante aquelas apresentadas para o retificador de 12 pulsos com esta mesma configuração, por isso, não serão apresentadas.

O gráfico que reúne as curvas para os diferentes tamanhos de lâminas a uma potência de 1 kW é mostrada na Figura 111. Observa-se que existem pontos onde os pesos de duas lâminas se cruzam, como por exemplo, em 0,5 onde as lâmina de 3 e 5 cm se cruzam. Entre 1,5 e 1,7 os pesos são equivalentes para as lâminas de 3 e 4 cm.

É importante enfatizar que para valores de potência de 3 e 6 kW as curvas são muito semelhantes. Em 6 kW a única região onde o peso é igual para as três lâminas é em torno do valor unitário da relação de tensões, acima de 6 kW as curvas se afastam e a melhor opção para um menor peso é com a lâmina de 5 cm.

Figura 111 - Peso total para o retificador de 18 pulsos com Topologia Estrela e configuração B para lâminas de 3, 4 e 5 cm e $P_o=1\text{kW}$.



Fonte: Dados do autor.

A tabela 3 apresenta uma síntese dos resultados para o peso das diversas configurações para os retificadores de 12 e 18 pulsos topologia Estrela e potência de 1 kW.

Tabela 3 – Síntese de resultados para topologia Estrela.

Retificadores de 12 pulsos (1 kW).						
	Estrela					
	A			B		
D (cm).	3	4	5	3	4	5
Faixa ($V_{\text{sec}}/V_{\text{prim}}$)	0,5-2,0	<0,5 2,0-3,0	<0,5 >3	0,7-2,2	<0,5 0,5-0,7 >1,7	<0,5

Retificadores de 18 pulsos (1 kW).						
	Estrela					
	A			B		
D (cm).	3	4	5	3	4	5
Faixa ($V_{\text{sec}}/V_{\text{prim}}$)	0,5-2,0	<0,5 0,5-0,7 >1,5	<0,5 0,5-0,7	0,5-1,7	<0,5 >1,5	<0,5

Fonte: dados do autor.

A tabela 4 apresenta uma síntese dos resultados para o peso das diversas configurações para os retificadores de 12 e 18 pulsos topologia Delta e potência de 1 kW.

As tabelas 3 e 4 apresentam para a potência de 1 kW quais as faixas das relações de tensões ($V_{\text{sec}}/V_{\text{prim}}$) onde o peso é menor para os diferentes tamanhos de lâminas, ou seja, diferentes valores para a dimensão da perna central das lâminas (D), ou chapas, que constituem o autotransformador.

Tabela 4 – Síntese de resultados para topologia Delta.

Retificadores de 12 pulsos (1 kW).									
	Delta								
	C			D			E		
D (cm).	3	4	5	3	4	5	3	4	5
Faixa (V_{sec}/V_{prim})	0,5-2,1	<0,5 >1,6	<0,5	-	Toda faixa	<0,5	>0,5	<0,5 >2,4	<0,5

Retificadores de 18 pulsos (1 kW).									
	Delta								
	C			D			E		
D (cm).	3	4	5	3	4	5	3	4	5
Faixa (V_{sec}/V_{prim})	0,7-1,7	<0,7 >1,4	<0,5	0,7-1,7	<0,7 >1,55	<0,5	0,7-1,9	<0,7 >1,4	<0,4

Fonte: dados do autor.

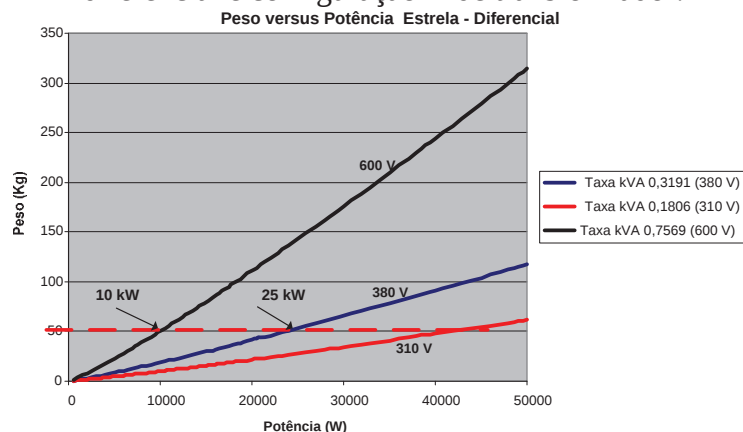
5.5 ANÁLISE DA TAXA KVA

Além da análise do comportamento do peso do transformador com relação à variação das relações entre as tensões, que também significa uma variação da tensão média na carga, a qual só é possível devido às características das conexões generalizadas. Uma análise do comportamento do peso é realizada com relação a variação da potência para três valores diferentes de taxa kVA.

Observam-se nestes gráficos que o peso do núcleo varia linearmente com a variação da potência para uma taxa kVA fixa. Esta observação é válida para qualquer topologia Estrela ou Delta e para suas diferentes configurações.

O gráfico da Figura. 112 foi obtido variando a potência, fixando a taxa kVA e escolhendo a lâmina de 4 cm. Considerando um valor máximo de 50 Kg para o núcleo do transformador observa-se que para a menor taxa kVA o transformador pode chegar a potência de 40 kW. Para uma taxa intermediária de 0,31 o retificador chega a 25 kW, já para uma taxa de 0,75, o transformador chega apenas a 10 kW.

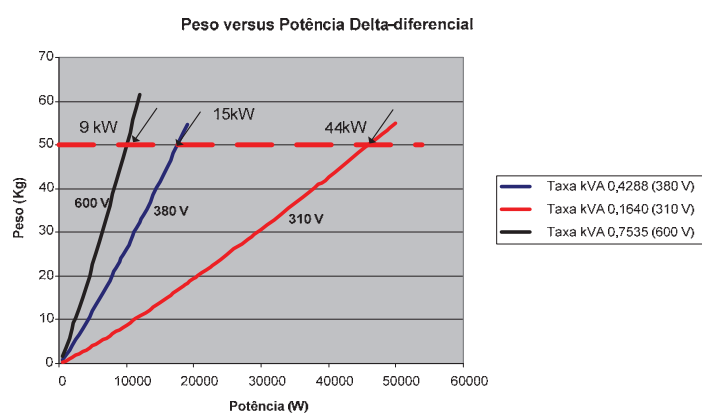
Figura 112 - Peso versus Potência para um retificador de 12 pulsos com topologia Estrela – diferencial e configuração A de transformador.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 113 apresenta a variação do peso com a potência para o retificador de 18 pulsos com conexão Delta-diferencial e configuração C. Observa-se da Figura 113 que para um peso de 50 Kg é possível obter uma potência de 44 kW.

Figura 113 - Peso versus Potência para um retificador de 18 pulsos com topologia Delta-diferencial e configuração C de transformador.



Fonte: Dados do autor.

5.6 ANÁLISE PARA IPTS

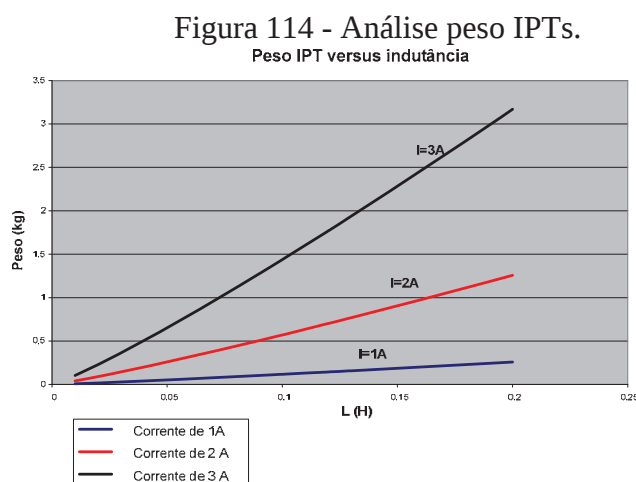
Observou-se das análises realizadas que retificadores com taxas kVA reduzidas de autotransformador apresentam menor peso. Retificadores de 12 pulsos apresentam duas pontes retificadoras independentes e retificadores de 18 pulsos possuem três pontes, porém, para alimentar uma única carga com estes retificadores é necessário que as pontes sejam conectadas em paralelo.

Para que as pontes sejam conectadas em paralelo IPTs (Indutores de Interfase) são necessários para o funcionamento correto dos retificadores.

Estes indutores se tornam uma desvantagem na utilização destes retificadores uma vez que agrega grande peso a estrutura.

O gráfico abaixo dá uma pequena noção do peso a mais que estas estruturas somam aos retificadores.

A Figura 114 apresenta o valor da indutância versus o peso para diferentes valores de correntes de carga (I_0).



Fonte: Dados do autor.

Suponha um retificador de 18 pulsos com conexão Delta-diferencial e configuração C com tensão na saída de 300 V, ou seja, V_{RS} de 220 V relação de tensões unitária.

A potência total para este retificador é de aproximadamente 1kW, observando o gráfico da Figura 103 o peso aproximado para este autotransformador é de 2,7 kg. Se for calculado um IPT de 100mH para este caso o peso de um IPT é de aproximadamente 0,2 kg, pequeno comparado ao peso do autotransformador. Porém um retificador de 18 pulsos não isolado necessita de seis IPTs um para cada saída (positiva e negativa) das pontes retificadoras. Assim, o peso total para os IPTs é de 1,2 kg 45% do peso do autotransformador.

Em alguns casos o peso dos IPTs pode ultrapassar o peso do autotransformador. Nestes casos deve ser observado o custo benefício que esta estrutura retificadora irá gerar a aplicação que foi proposta.

Outra solução seria a utilização de um estágio CC-CC, porém, antes de escolher a melhor opção entre IPTs ou conversores CC-CC, estudos devem ser realizados para verificar a relação custo benefício dos conversores chaveados, pois podem gerar maiores custos e complexidade à estrutura. Além disso, estruturas CC-CC aumentam também o peso do retificador.

5.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas análises que buscam critérios para a escolha da melhor topologia de retificadores multipulsos com conexões diferenciais de transformador objetivando redução de peso volume e, conseqüentemente, custo do retificador.

Através do equacionamento para cálculo de peso do núcleo e do cobre apresentado em [81] foram obtidos gráficos que apresentam o peso em função da relação de tensões secundária (resultante) e primária. Esta relação está diretamente ligada à tensão média na carga, uma vez que, a tensão média é 2,34 da tensão secundária resultante (fase).

Pode-se concluir dos gráficos que apresentam os pesos do núcleo, cobre e peso total separadamente que, o peso do cobre apresenta-se constante e que a curva para o peso total do retificador segue o comportamento da curva do peso do núcleo e esta por sua vez apresenta o mesmo comportamento da curva para taxa kVA.

Foram apresentados gráficos para diferentes valores de potência. Observou-se que para potências abaixo de 6 kW existem situações onde o peso para os diferentes tamanhos de lâminas são os mesmos, porém, já em 6 kW a melhor opção de tamanho de lâmina é a de 5 cm para a maioria das relações de tensão, apenas para relação igual a 1 o peso se torna próximo para as três lâminas (3, 4 e 5 cm).

Através de planilhas eletrônicas produzida com auxílio do Excel é possível encontrar o peso aproximado para qualquer retificador com topologia Estrela ou Delta nas suas variadas configurações. Através destas planilhas foi possível observar que acima de 6kW as curvas se afastam e a melhor opção de lâmina para a obtenção de um menor peso é a de 5 cm.

Capítulo 6

Especificações de projeto e resultados de simulação

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir do equacionamento de unificação das topologias apresentado no capítulo 4 e já com auxílio do programa MultiTrafo apresentado também neste capítulo, valores de tensão e corrente foram especificados para os retificadores Estrela e Delta - diferenciais de 18 pulsos propostos.

Para aplicação dos retificadores projetados como *retrofit* em inversores trifásicos comerciais, os mesmos foram especificados segundo os dados dos inversores, com tensão de alimentação de 220 V (valor rms de linha), 60 Hz e potência de 3 cv (2,2 kW).

Um dos principais atrativos das conexões generalizadas é a possibilidade de escolha da tensão retificada para qualquer valor da tensão de alimentação. Assim, os retificadores projetados apresentam alimentação de 220 V (mesma dos inversores comerciais), tensão média no barramento CC de aproximadamente 315 V (mesmo valor medido no estágio retificado dos inversores), frequência de 60 Hz e potência ativa de 2,5 kW.

6.2 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO

Neste item serão determinadas todas as tensões e correntes para todos os enrolamentos dos retificadores.

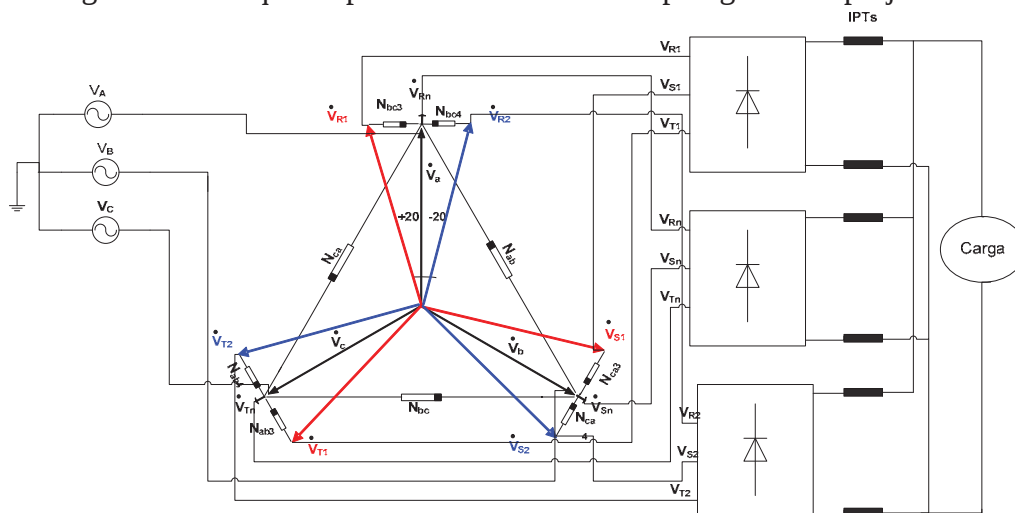
6.2.1 Retificador de 18 pulsos com conexão Delta

Para uma tensão média na saída de 315 V, a tensão de fase resultante (V_R) é de aproximadamente 134,6 V ($V_{RS}=233$ V de linha) o que resulta em uma relação de tensões de 1,06. Basta entrar com este valor nos gráficos apresentados no capítulo 5 para a topologia Delta e escolher a melhor configuração.

Através do gráfico da Figura 85 é possível observar que o retificador Delta com configuração C apresenta menor taxa kVA. Neste caso a configuração C foi escolhida por apresentar menor taxa kVA e menor peso. O programa MultiTrafo atende a esta configuração, facilitando assim, o projeto do retificador.

A Figura 115 mostra um esquema do retificador de 18 pulsos com topologia Delta-diferencial e configuração C projetado. Os enrolamentos com índices '1' e '2' foram eliminados e os enrolamentos com índices 'n' e 'n1' que formam o terceiro sistema trifásico em fase com o primário foram omitidos do esquema, por questões de melhor visualização da figura.

Figura 115 - Esquema para o retificador com topologia Delta projetado.



Fonte: Dados do autor.

O transformador a ser implementado é apresentado na Figura 115 e, a Tabela 5, apresenta os dados de projeto para a conexão escolhida.

Tabela 5 – Dados de projeto do autotransformador.

Tensão eficaz de entrada	220 V linha / 127 V fase
Tensão eficaz de saída	134,6 V fase (V_{R1})
Número de Pulsos	18 ($\theta = 20^\circ$)
Tipo de Conexão	Delta-diferencial ($\Psi = 0^\circ$)

Fonte: dados do autor.

A partir do equacionamento apresentado nos capítulos 3 e 4 e com as especificações de projeto, todas as tensões nos enrolamentos do transformador são obtidas. Estes mesmos resultados também podem ser obtidos através do programa MultiTrafo apresentado no capítulo 4.

Aplicando-se os valores de V_a e V_{R1} na equação (4.11) determina-se o valor de α .

$$\alpha = 0,15^\circ$$

Com o valor de α , V_a e V_{R1} aplicados nas equações (4.9) e (4.10) determinam-se os valores de V_{ca1} e V_{bc3} . As tensões V_{abn} e V_{abn1} são determinadas pelas equações (4.12) e (4.13) respectivamente.

- 1) Primários N_{ab} , N_{bc} e N_{ca} : $V_{ab}=220 / 127 \text{ V}$.
- 2) Secundários N_{ab1} , N_{ab2} , N_{bc1} , N_{bc2} , N_{ca1} e N_{ca2} : $V_{ca1} = 0,64 \text{ V}$
- 3) Secundários N_{ab3} , N_{ab4} , N_{bc3} , N_{bc4} , N_{ca3} e N_{ca4} : $V_{bc3} = - 45,7 \text{ V}$
- 4) Secundários N_{abn} , N_{abn1} , N_{bcn} , N_{bcn1} , N_{cn} e N_{cn1} : $V_{abn} = 4,4 \text{ V}$ e $V_{abn1} = 4,4 \text{ V}$

Com os valores de V_{ab} , V_{abn} , V_{ca1} e V_{bc3} , aplicados nas equações de (4.14) a (4.16), determinam-se os valores das relações de espiras K_a , K_b e K_c :

$$K_a = 0,0198$$

$$K_b = 0,0029$$

$$K_c = -0,2077 \text{ (invertido)}$$

Com o auxílio de softwares matemáticos ou utilizando o programa desenvolvido neste trabalho obtém-se os valores não só de tensão, mas também de corrente para todos os enrolamentos.

A corrente em todos os enrolamentos secundários da conexão Delta N_{ab1} , N_{ab2} , N_{ab3} , N_{ab4} , N_{abn} , N_{abn1} , N_{bc1} , N_{bc2} , N_{bc3} , N_{bc4} , N_{bcn} , N_{bcn1} , N_{ca1} e N_{ca2} , N_{ca3} e N_{ca4} , N_{can} e N_{can1} é de 2,15 A. Nos enrolamentos primários N_{ab} , N_{bc} e N_{ca} , a corrente é de 0,41 A. A corrente na rede é de aproximadamente 6,58 A. O programa desenvolvido também calcula e mostra na tela o FP e DHT_i , 0,993 e 9,36 respectivamente.

A partir dos cálculos apresentados, o retificador proposto foi simulado através do programa *PSpice* com cargas independentes e também com carga única, com pontes retificadoras em paralelo.

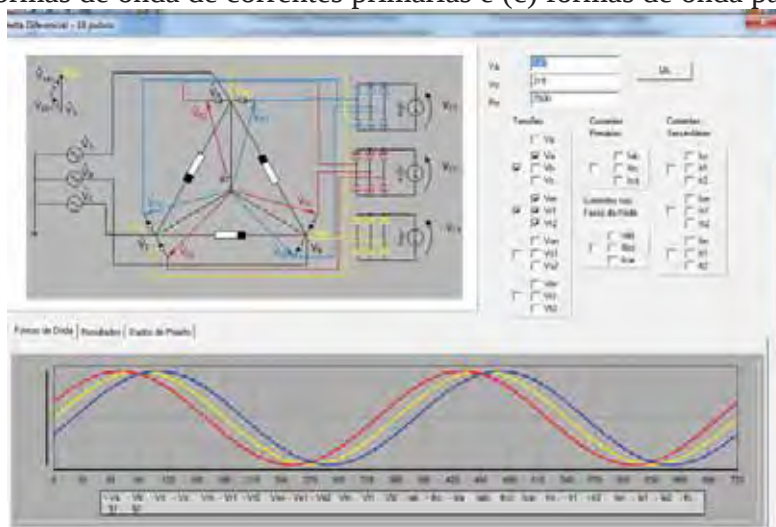
Para que as pontes fossem colocadas em paralelo, como foi dito anteriormente e visto em inúmeros artigos, indutores de interfase devem ser conectados às saídas retificadas a fim de absorver as tensões instantâneas entre elas e garantir o bom funcionamento do retificador.

As Figuras 116 a 117 apresentam a sequência para a utilização do programa MultiTrafo.

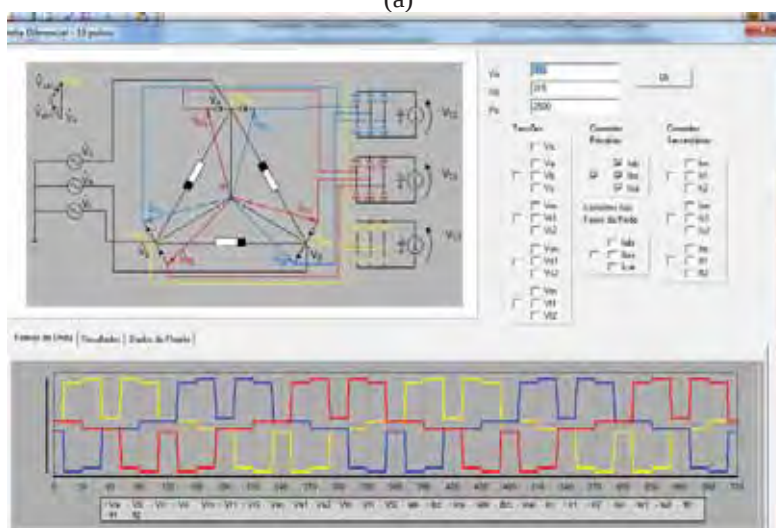
Primeiro escolhe-se a topologia e número de pulsos desejados, depois é aberta uma tela onde são colocados os parâmetros como tensão de entrada (127 V), tensão média (315 V) retificada e potência ativa (2,5 kW), depois basta escolher as formas de onda a serem visualizadas na tela e clicar em OK. A Figura 116 (a) apresenta as formas de onda para as tensões nos secundários V_{R1} , V_{R2} V_{Rn} e a tensão na rede V_a que está em fase com V_{Rn} . Na Figura 116 (b) podem-se observar as formas de onda para as correntes primárias, já na Figura 116 (c) são apresentadas as correntes na rede de alimentação.

A Figura 117 apresenta a tabela de dados, tensões, correntes em todos os enrolamentos, FP, DHT_i e relações de espiras.

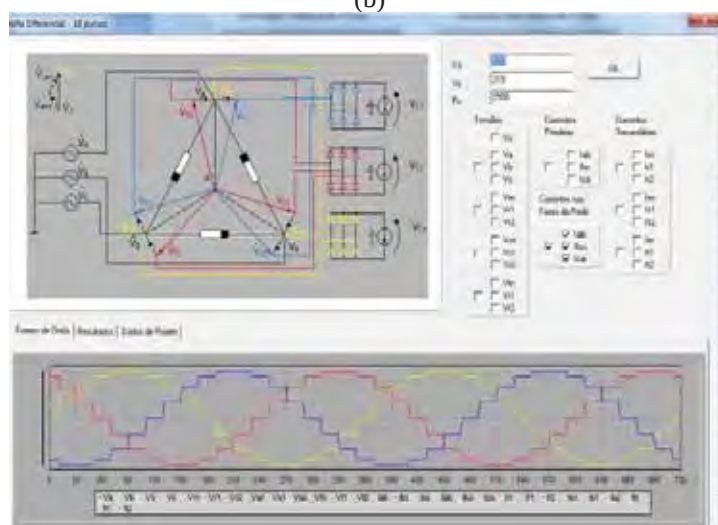
Figura 116 - Resultados obtidos através do programa MultiTrafo, (a) formas de onda de tensão; (b) formas de onda de correntes primárias e (c) formas de onda para correntes na rede.



(a)



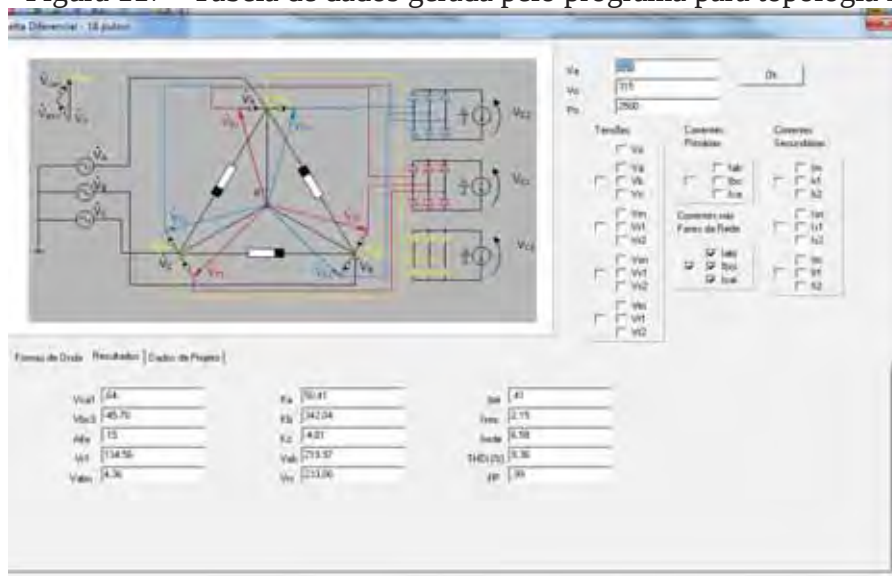
(b)



(c)

Fonte: Dados do autor.

Figura 117 - Tabela de dados gerada pelo programa para topologia Delta.



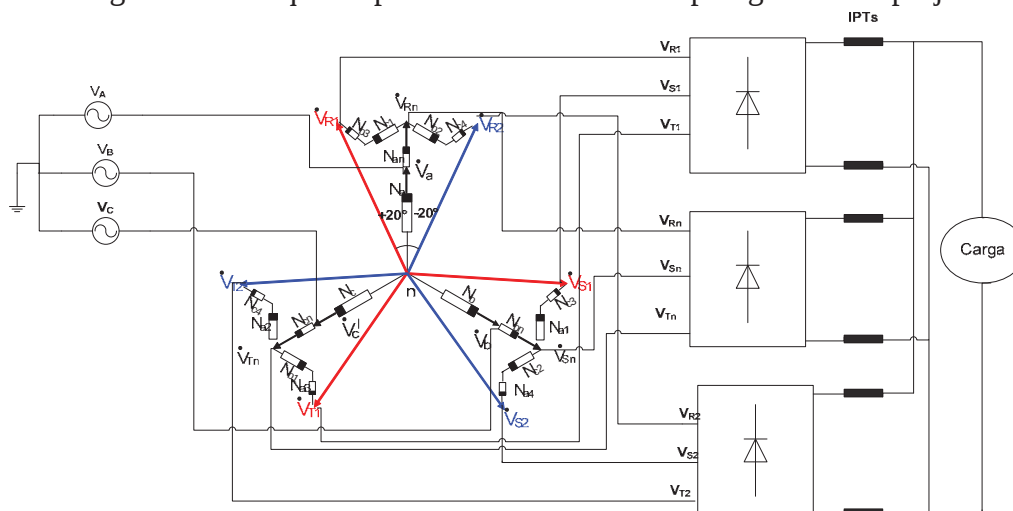
Fonte: Dados do autor.

6.2.2 Retificador de 18 pulsos com conexão Estrela

Através do gráfico da Figura 86 é possível observar que o retificador Estrela com configuração A apresenta menor taxa kVA para relação de tensões de 1,06. Além disso, resultados obtidos através das planilhas desenvolvidas para o cálculo do peso total mostram que a configuração A para uma potência de 2,5 kW apresenta menor peso total (núcleo mais cobre). Neste caso a configuração A foi escolhida por apresentar menor taxa kVA e menor peso. O programa MultiTrafo também atende a esta configuração.

O transformador implementado é apresentado na Figura 118. A Tabela 6, apresenta os dados de projeto para a conexão escolhida.

Figura 118 - Esquema para o retificador com topologia Estrela projetado.



Fonte: Dados do autor.

Tabela 6 – Dados de projeto do autotransformador.

Tensão eficaz de entrada	220 V linha / 127 V fase
Tensão eficaz de saída	134,6 V fase (V_{R1})
Número de Pulsos	18 ($\theta = 20^\circ$)
Tipo de Conexão	Delta-diferencial ($\Psi = 30^\circ$)

Fonte: dados do autor.

O mesmo procedimento de projeto realizado para a topologia Delta, agora é repetido para a topologia Estrela.

Aplicando-se os valores de V_a e V_{R1} na equação (4.11) determina-se o valor de α .

$$\alpha = 11,7^\circ$$

Com o valor de α , V_a e V_{R1} aplicados nas equações (4.9) e (4.10) determinam-se os valores de V_{c1} e V_{b3} . A tensão V_{an} é determinada pela equação (4.12).

- | | |
|--|---------------------------|
| 5) Primários N_{ab} , N_{bc} e N_{ca} | : $V_{ab} = 220 / 127$ V. |
| 6) Secundários N_{a1} , N_{a2} , N_{b1} , N_{b2} , N_{c1} e N_{c2} | : $V_{c1} = 27,13$ V |
| 7) Secundários N_{a3} , N_{a4} , N_{b3} , N_{b4} , N_{c3} e N_{c4} | : $V_{bc3} = -26$ V |
| 8) Secundários N_{an} , N_{bn} , N_{cn} | : $V_{an} = 7,56$ V |

Com os valores de V_{ab} , V_{an} , V_{c1} e V_{b3} , aplicados nas equações de (4.14) a (4.16), determinam-se os valores das relações de espiras K_a , K_b e K_c :

$$K_a = 0,059$$

$$K_b = 0,2136$$

$$K_c = -0,2049 \text{ (invertido)}$$

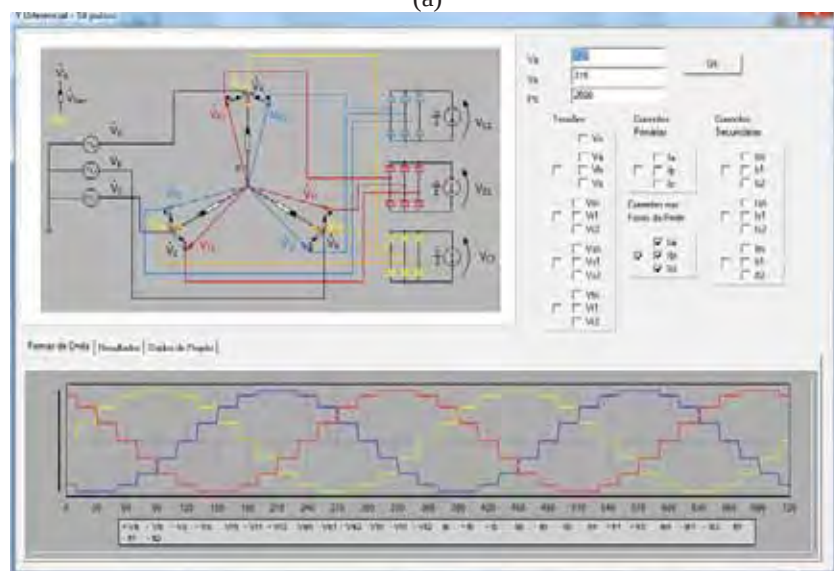
A corrente em todos os enrolamentos secundários da conexão Estrela N_{a1} , N_{a2} , N_{a3} , N_{a4} , N_{an} , N_{b1} , N_{b2} , N_{b3} , N_{b4} , N_{bn} , N_{c1} e N_{c2} , N_{c3} e N_{c4} e N_{cn} é de 2,15 A. Nos enrolamentos primários N_a , N_b e N_c , a corrente é de 0,72 A. A corrente na rede também pode ser calculada e é de aproximadamente 6,58 A.

As Figuras 119 e 120 apresentam alguns resultados obtidos através do programa MultiTrafo. Na Figura 119 (a) é possível observar as formas de onda para as correntes nos enrolamentos primários, já a Figura 119 (b) mostra as formas de onda das correntes na rede de alimentação. O programa além de apresentar formas de onda gera uma tabela de dados para tensão, corrente em todos os enrolamentos do autotransformador e calcula o FP e DHT_i como mostra a Figura 120.

Figura 119 - Formas de onda de correntes obtidas a partir do programa, (a) primárias, (b) rede.



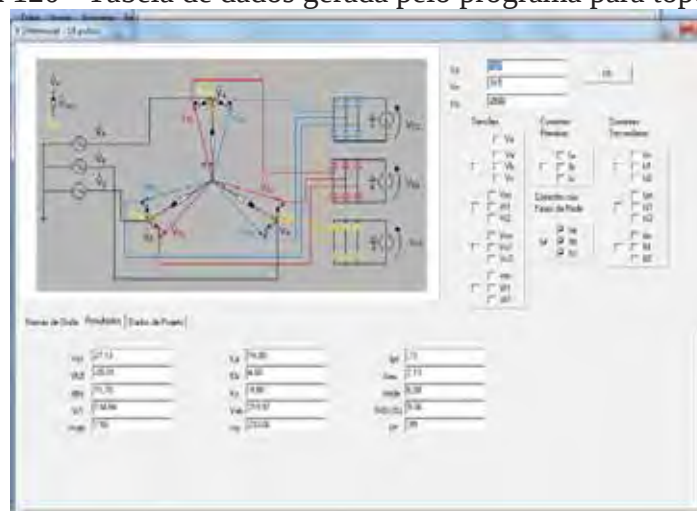
(a)



(b)

Fonte: Dados do autor.

Figura 120 - Tabela de dados gerada pelo programa para topologia Estrela.



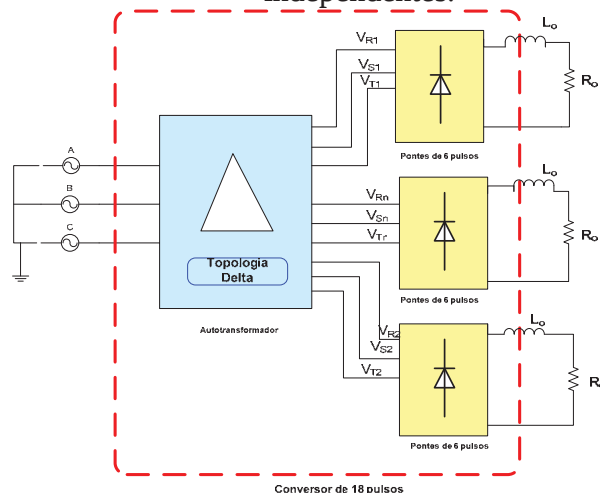
Fonte: Dados do autor.

6.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - CARGAS INDEPENDENTES

6.3.1 Topologia Delta

A Figura 121 apresenta o esquema do retificador com cargas independentes, formado pelo autotransformador com conexão Delta e 3 pontes retificadoras de seis pulsos.

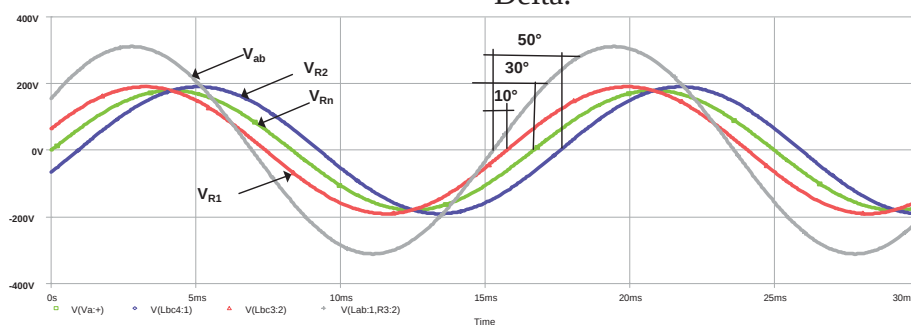
Figura 121 - Esquema para o retificador de 18 pulsos topologia Delta com cargas independentes.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 122 apresenta as tensões secundárias V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} e a tensão primária.

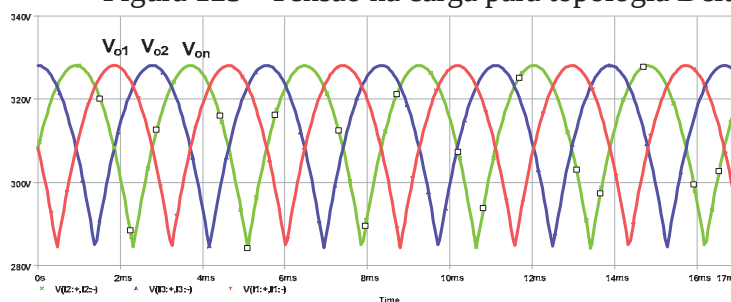
Figura 122 - Tensões secundárias V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} e tensão primária para topologia Delta.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 123 apresenta as tensões retificadas nas saídas das três pontes de seis pulsos. Observa-se que elas se encaixam para formar os 18 pulsos desejados.

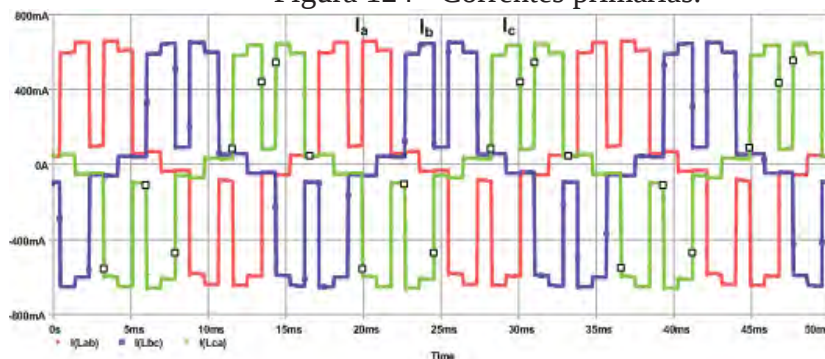
Figura 123 - Tensão na carga para topologia Delta.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 124 apresenta as correntes primárias típicas para o retificador com conexão Delta-diferencial proposto. O valor eficaz para as correntes primárias, obtido através da simulação, foi de 0,419 A. As correntes secundárias obtiveram valores iguais a 2,16 A.

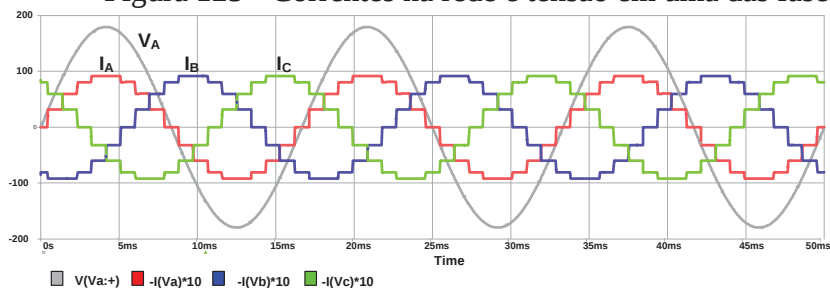
Figura 124 - Correntes primárias.



Fonte: Dados do autor.

A Figura. 125 apresenta as correntes nas três fases da rede e a tensão em uma das fases. Observa-se que as correntes são equilibradas e estão em fase com respectivas tensões. As correntes estão multiplicadas por um fator de 10 para melhor visualização. Os valores eficazes para as correntes na rede por simulação são de 6,59 A.

Figura 125 - Correntes na rede e tensão em uma das fases.

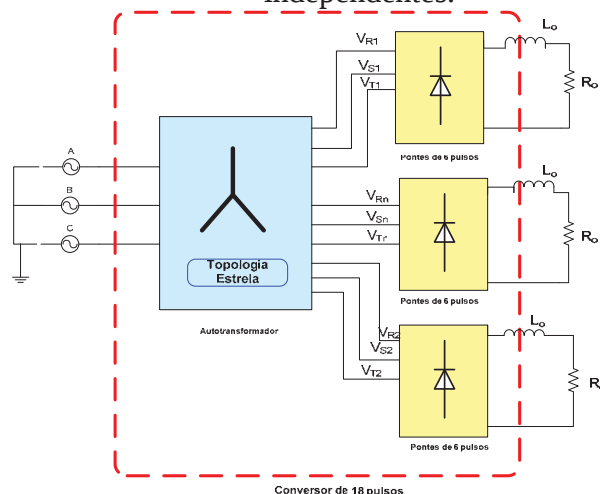


Fonte: Dados do autor.

6.3.2 Topologia Estrela

A Figura 126 apresenta o esquema do retificador com cargas independentes, neste caso o autotransformador apresenta conexão Estrela-diferencial.

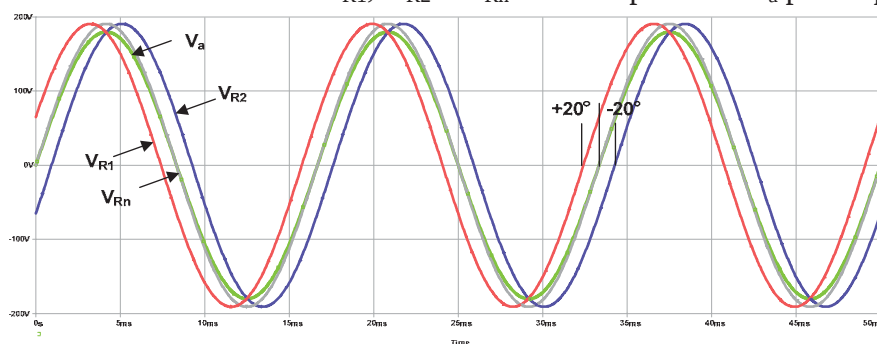
Figura 126 Esquema para o retificador de 18 pulsos topologia Estrela com cargas independentes.



Fonte: Dados do autor.

As tensões secundárias e a tensão primária podem ser vistas na Figura 127, observa-se o defasamento de 20° entre as tensões dos grupos trifásicos de tensões secundárias.

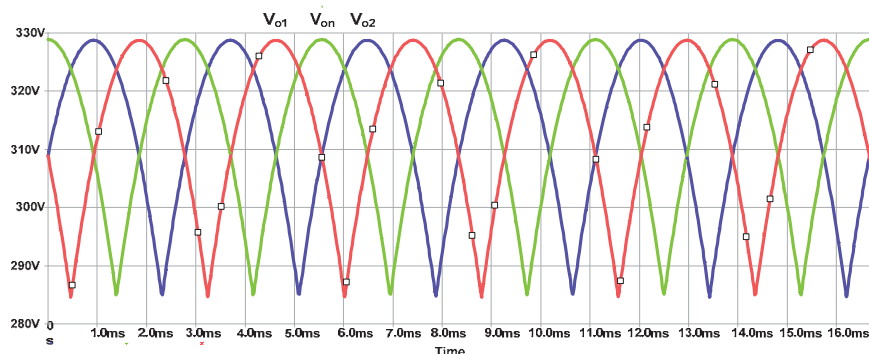
Figura 127 - Tensões secundárias V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} e tensão primária V_a para topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

A tensão retificada é apresentada também para esta topologia como mostra a Figura 128. Em um período da rede de alimentação de 60 Hz pode-se observar os 18 pulsos na tensão retificada.

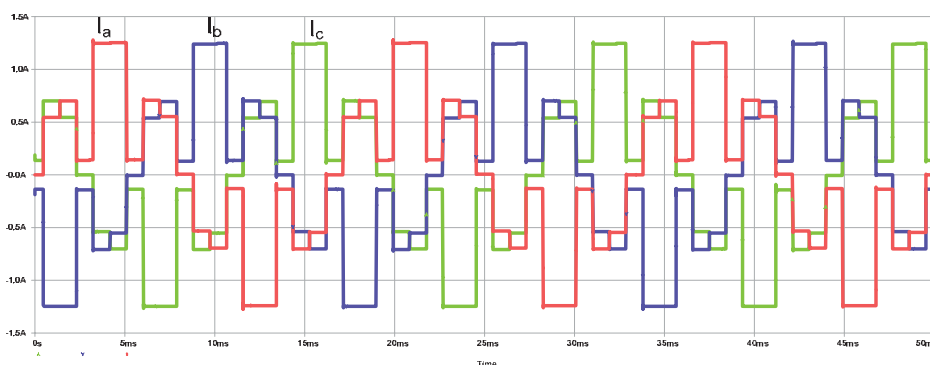
Figura 128 - Tensão retificada na carga (315 V rms) para topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

A forma de onda típica para o retificador de 18 pulsos com topologia Estrela com tensão média na saída de 315 V é apresentada na Figura 129. O valor eficaz para as correntes primárias, obtidas através da simulação, foi de 0,727 A. As correntes secundárias obtiveram valores iguais a 2,17 A.

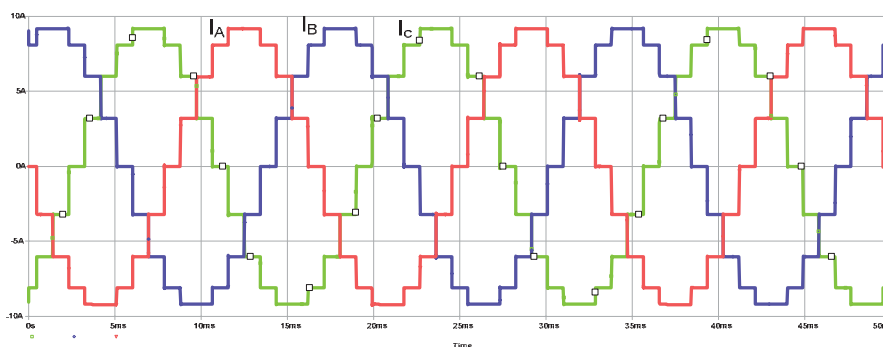
Figura 129 - Correntes primárias para topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 130 apresenta as correntes nas três fases da rede. Os valores eficazes para as correntes na rede por simulação foram de 6,61 A. A DHT_i de corrente para este retificador é de 9,5%.

Figura 130 - Correntes na rede para topologia Estrela.



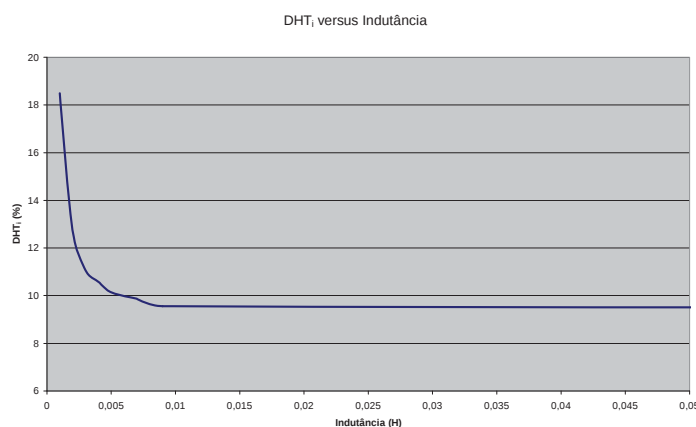
Fonte: Dados do autor.

6.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO - ÚNICA CARGA

Na maioria das aplicações os retificadores alimentam uma única carga. Neste caso, as pontes devem ser conectadas em paralelo com o auxílio de Indutores de Interfase (IPTs). A tensão aplicada sobre um transformador ou indutor de interfase é a diferença entre o valor instantâneo da tensão de saída do retificador (que apresenta seis pulsos por período da tensão de alimentação) e o valor médio da tensão na carga. O projeto destes indutores é feito considerando a máxima ondulação de corrente admissível. Estes elementos foram calculados de acordo com [26, 51] para uma ondulação de corrente não maior que 5%. Além disso, é possível observar através de resultados de simulação o valor ótimo da indutância para os IPTs, pois, sabe-se que a DHT_i torna-se constante a partir deste valor, ou seja, para valores maiores que o ótimo a DHT_i sofre alterações que podem ser desconsideradas [50]. O gráfico da Figura 131 apresenta resultados de simulação para DHT_i versus a indutância para os IPTs.

O valor ótimo de indutância encontrado para estes elementos adicionais foi de 100 mH. Vale observar que a taxa kVA de cada um destes elementos é 8 %, portanto, são de baixo volume e peso. Porém, para retificadores de 18 pulsos não-isolados são necessários seis IPTs, o que pode agregar à estrutura retificadora peso e volume consideráveis.

Figura 131 - Valor ótimo para indutância dos IPTS.

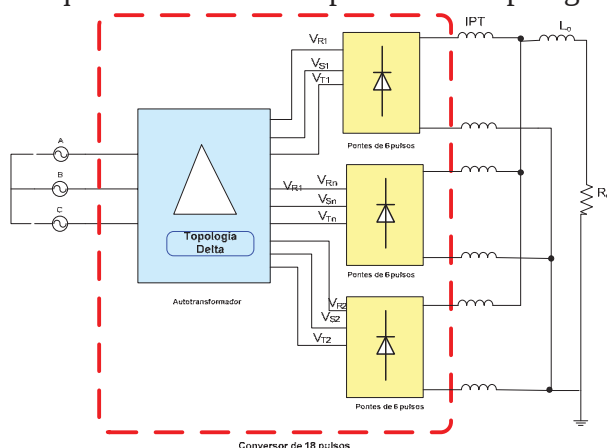


Fonte: Dados do autor.

6.4.1 Topologia Delta

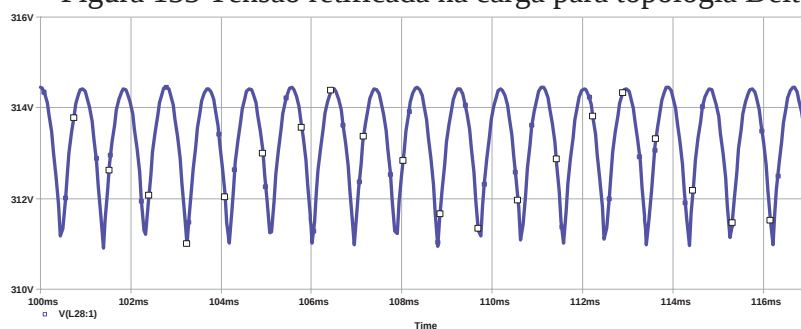
A Figura 132 apresenta a conexão do retificador proposto com pontes conectadas em paralelo e carga única R-L. A indutância de carga usada para simulação foi de 200 mH e a resistência de 40 Ω .

Figura 132 - Esquema retificador 18 pulsos com topologia Delta e carga única.



Fonte: Dados do autor.

Figura 133 Tensão retificada na carga para topologia Delta.

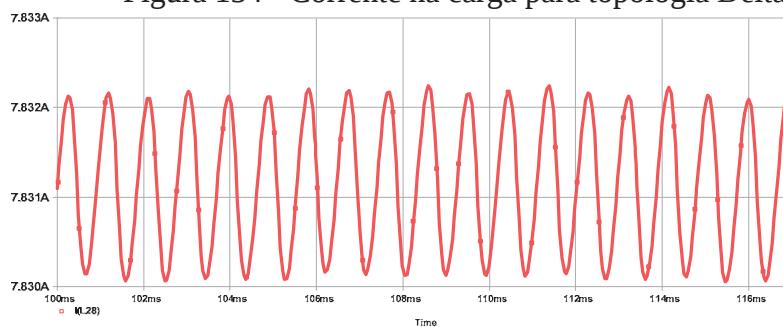


Fonte: Dados do autor.

A Figura 133 apresenta a tensão retificada na carga quando as pontes foram conectadas em paralelo. Observa-se que em um período da rede tem-se na carga 18 pulsos de tensão retificada. A ondulação de tensão é muito pequena, logo a tensão média esta em torno de 311,5 V.

A Figura 134 apresenta a corrente na carga, seu valor médio é de aproximadamente 6,58 A com ondulação de corrente de 0,0019 A. A corrente na carga é praticamente constante e é a soma das correntes nas pontes retificadoras.

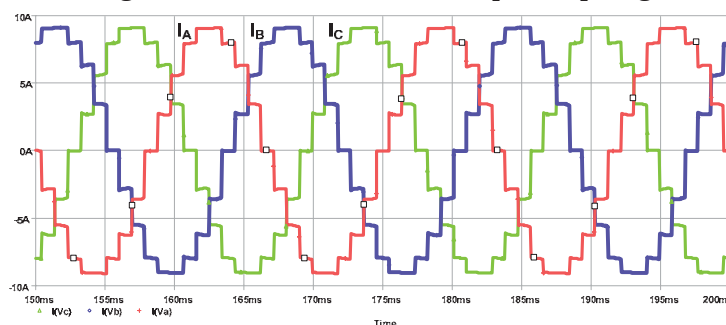
Figura 134 - Corrente na carga para topologia Delta.



Fonte: Dados do autor.

A Figura. 135 apresenta as correntes nas três fases rede. Observa-se que as correntes são equilibradas, porém, os patamares não se encontram perfeitamente simétricos, mas sim com pequenas distorções. Este fato ocorre devido aos IPTs que foram incluídos ao sistema.

Figura 135 - Correntes na rede para topologia Delta.

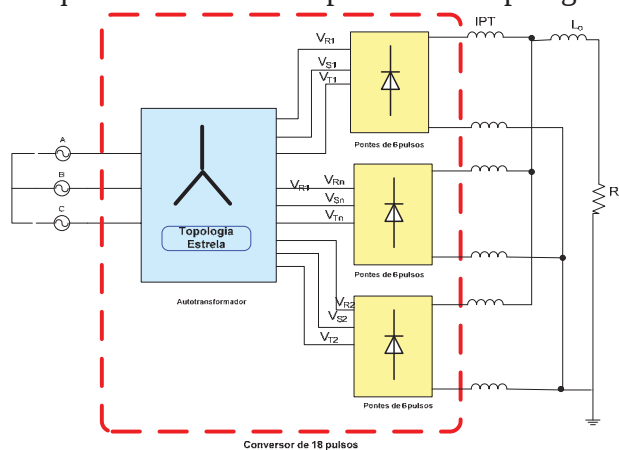


Fonte: Dados do autor.

6.4.2 Topologia Estrela

A Figura 136 apresenta a conexão do retificador com topologia Estrela proposto, com pontes conectadas em paralelo e carga única R-L. A indutância de carga usada para simulação foi de 200 mH e a resistência de 40 Ω .

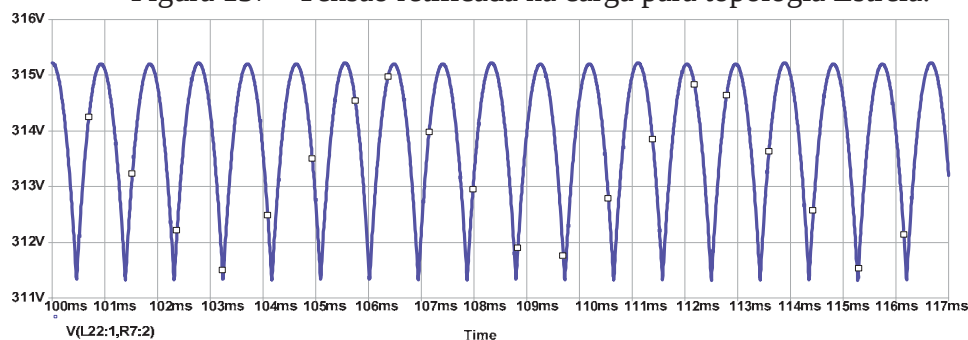
Figura 136 - Esquema retificador 18 pulsos com topologia Estrela e carga única.



Fonte: Dados do autor.

Para a topologia delta também foi obtida a tensão na carga como mostra a Figura 137. A tensão média na carga obtida por simulação foi de 311,7 V. É importante dizer também que a ondulação de tensão é muito pequena cerca de 1%.

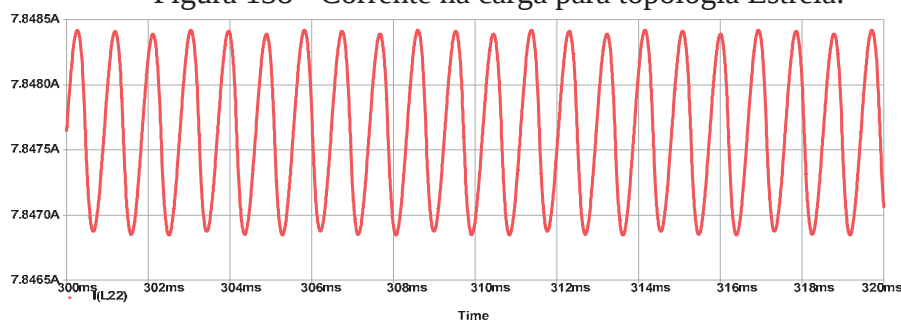
Figura 137 - Tensão retificada na carga para topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 138 apresenta a corrente na carga, o valor médio para esta topologia foi de aproximadamente 7,66 A. A corrente na carga é praticamente constante e é a soma das correntes nas pontes retificadoras. Observa-se também que a ondulação de corrente é de aproximadamente 0,0015 A.

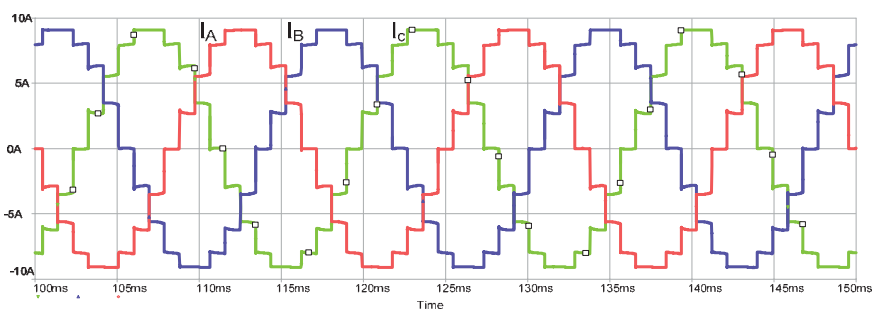
Figura 138 - Corrente na carga para topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

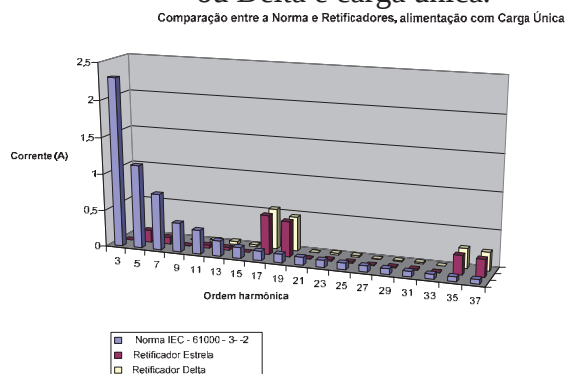
As correntes na rede de alimentação são apresentadas na Figura. 139, elas são equilibradas, porém devido à inclusão dos IPTs apresentam patamares não simétricos. A DHT_i neste caso foi de 9,8%.

Figura 139 Correntes na rede para topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

Figura 140 - Espectro harmônico na corrente de rede para retificadores com topologia Estrela ou Delta e carga única.



A Figura 140 apresenta um gráfico de barras que compara valores individuais de harmônicos de corrente dos retificadores de 18 pulsos com topologias Estrela ou Delta diferenciais com a norma internacional européia IEC – 61000 – 3 – 2.

6.5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou especificações de parâmetros importantes para a realização do projeto físico dos retificadores. Foram obtidos valores para tensões e correntes em todos os enrolamentos do autotransformador a partir do equacionamento e do programa MultiTrafo desenvolvido e apresentado no capítulo 4.

A escolha da melhor configuração para cada uma das topologias foi realizada com o auxílio dos gráficos apresentados no capítulo 5. Os gráficos apresentaram critérios como taxa kVA e peso dos retificadores para cada uma das configurações, assim, proporcionam critérios para a escolha da configuração que apresente menor peso e a melhor lâmina (chapa) a ser utilizada.

Resultados de simulação comprovaram os resultados apresentados pelo programa MultiTrafo. Além disso, as formas de onda validam a operação do retificador como um mitigador de harmônicos. É fácil observar que a corrente na rede de alimentação não é mais pulsada como a corrente característica de um retificador de seis pulsos com filtro capacitivo, mas ela apresenta uma forma de onda mais próxima da senoidal.

Além das formas de onda e resultados para tensão e corrente nos enrolamentos a simulação apresentou resultados de DHT_i de 9,5 % para cargas independentes e 9,7 para carga única em ambas topologias. Observa-se, porém, através do gráfico comparativo apresentado na Figura 140 que o retificador não se enquadra totalmente à norma internacional IEC – 61000-3-2 para equipamentos com correntes menores de 16 A.

Apesar do retificador não se enquadrar completamente à norma, ele elimina grande parte das componentes harmônicas de baixa ordem existentes em um retificador convencional de seis pulsos.

Capítulo 7

Especificações de componentes e resultados experimentais

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os projetos físicos dos retificadores propostos, onde serão especificados o tamanho da lâmina, o peso e o volume do núcleo, as bitolas dos fios, além do número de espiras e do peso dos enrolamentos. Todo o equacionamento apresentado está baseado em McLyman [81, 82]. Além do autotransformador, será apresentado os dados como peso, indutância para os IPTs, elementos adicionais para o funcionamento do inversor com carga única e pontes associadas em paralelo. Os protótipos foram implementados para tensão de alimentação 127/220 V, frequência de 60 Hz, tensão média na carga de 315 V e potência de 2,5 kW. Os retificadores implementados serão aplicados a diferentes inversores comerciais, tradicionalmente usados no Brasil, em substituição ao estágio retificador convencional, como *retrofit*. Os inversores adquiridos apresentam tensão de entrada de 220 V (linha), potência de 3 cv (2,2 kW) e corrente máxima de 10 A [83-86]. Serão apresentados resultados para os retificadores alimentando cargas independentes, carga única e resultados da aplicação destes retificadores aos inversores.

7.2 DADOS DE PROJETO

A tabela 5 apresenta alguns dados para o projeto do autotransformador que compõe o retificador de 18 pulsos com topologia Estrela, obtidos no capítulo 6.

Tabela 5 - Dados de projeto para topologia Estrela.

Tensão de entrada	127 V / 220 V
Tensão de saída retificada / potência P_o	315 V / 2,5 kW
Número de pulsos	18 pulsos ($\theta = 20^\circ$)
Tipo de conexão	Estrela ($\Psi = 30^\circ$)
Tensão nos enrolamentos N_{a1} , N_{a2} , N_{b1} , N_{b2} , N_{c1} e N_{c2}	27,13 V
Tensão nos enrolamentos N_{a3} , N_{a4} , N_{b3} , N_{b4} , N_{c3} e N_{c4}	-26 V
Tensão nos enrolamentos N_{an} , N_{bn} e N_{cn}	7,56 V
Correntes eficazes nos enrolamentos secundários	2,17 A
Correntes eficazes nos enrolamentos primários	0,72 A

Fonte: dados do autor.

Na tabela 6 têm-se os dados de projeto para o retificador com topologia Delta.

Tabela 6 - Dados de projeto para topologia Delta.

Tensão de entrada	127 V / 220 V
Tensão de saída retificada / potência P_o	315 V / 2,5 kW
Número de pulsos	18 pulsos ($\theta = 20^\circ$)
Tipo de conexão	Delta ($\Psi = 0^\circ$)
Tensão nos enrolamentos N_{ab1} , N_{ab2} , N_{bc1} , N_{bc2} , N_{ca1} e N_{ca2}	0,64 V
Tensão nos enrolamentos N_{ab3} , N_{ab4} , N_{bc3} , N_{bc4} , N_{ca3} e N_{ca4}	-45,7 V
Tensão nos enrolamentos N_{abn} , N_{bcn} , N_{can} , N_{abn1} , N_{bcn1} e N_{can1}	4,4 V
Correntes eficazes nos enrolamentos secundários	2,16 A
Correntes eficazes nos enrolamentos primários	0,42 A

Fonte: dados do autor.

7.3 PROJETOS DO NÚCLEO E DOS ENROLAMENTOS

O projeto físico de um autotransformador não se difere muito do projeto de transformadores convencionais, deve-se conhecer em ambos os casos as tensões e correntes sobre todos os enrolamentos. O equacionamento para projeto do núcleo e enrolamentos do autotransformador é clássico e repleto de desenvolvimentos empíricos. O equacionamento apresentado é baseado no método proposto por [81].

7.3.1 Dimensionamento do núcleo e dos enrolamentos

- **Topologia Estrela.**

A partir do gráfico da Figura 86 encontra-se a taxa kVA do autotransformador que é de 0,20 para a topologia Estrela e configuração A. Sabendo-se o valor da taxa kVA e a potência total do autotransformador, encontra-se o valor da potência processada pelo núcleo magnético. Com a potência total (S_{total}) que o núcleo processa encontra-se o produto das áreas a partir da equação em (83).

$$A_p = \left(\frac{S_{total} \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_m \cdot f \cdot K_u \cdot K_t} \right)^{1,14} = 253,88 \text{ cm}^4$$

A equação (83) permite o cálculo do chamado Produto das Áreas (A_p), que nada mais é do que o produto da área da seção transversal do núcleo magnético (A_c) pela área da janela do mesmo (A_j). A área da janela é uma escolha de projeto, depende apenas das medidas das lâminas de que se dispõe. Nesta equação estão presentes também a frequência de operação (f), o fator de utilização das janelas (K_u , igual a 0,4) e o fator térmico (K_t , igual a 304, para elevação máxima de temperatura de 25°C).

A seção transversal do núcleo é dada pela equação (84). A lâmina escolhida foi $D=3$ cm (dimensão da perna central). As dimensões desta lâmina estão mostradas na Figura 88. A equação (85) apresenta o valor para o empilhamento do núcleo.

$$A_c = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{A_p}{A_j} \right) = 7,52 \text{ cm}^2 \qquad b = \frac{A_c}{D} = 2,507 \text{ cm}$$

O peso do núcleo foi apresentado na equação (86). O valor escolhido para o empilhamento foi de 2,6 cm para uma possibilidade de execução de projeto ≥ 3 .

$$Peso_{nucleo} = \frac{(A_f - 2 \cdot A_j) \cdot b \cdot \sigma}{1000} = 3,1 \text{ kg}$$

A tabela 7 apresenta valores de tensão e corrente em todos os enrolamentos do autotransformador. Com estes valores e a partir da equação (5.8) apresentada no capítulo 5 foram obtidos os valores para as bitolas dos fios.

Tabela 7 - Detalhes dos enrolamentos topologia Estrela.

Enrolamentos	Tensão eficaz	Corrente eficaz	Condutor
N_a, N_b, N_c	127 V	0,72 A	24 AWG
$N_{a1}, N_{a2}, N_{b1}, N_{b2}, N_{c1}, N_{c2}$	27 V	2,17 A	20 AWG
$N_{a3}, N_{a4}, N_{b3}, N_{b4}, N_{c3}, N_{c4}$	26 V	2,17 A	20 AWG
N_{a3}, N_{b3}, N_{c3}	7,6 V	2,17 A	20 AWG

Fonte: dados do autor.

Resta apenas agora determinar o número de espiras para cada enrolamento através da equação (7). A tabela 8 apresenta todos os dados e especificações para o autotransformador com topologia Estrela e configuração A.

Tabela 8 - Detalhes do Autotransformador topologia Estrela.

Tensão de fase de entrada	Trifásico 127 V
Tensão de fase de saída	Três sistemas trifásicos 134,6 V
Potência total na carga (P_o)	2,5 kW
Potencia processada pelo núcleo	500 VA
Taxa kVa	20 %
Frequência de operação (f)	60 Hz
Tipo de núcleo	E – I M25 – 27 GO, espessura 0,27 mm
Densidade máxima de Fluxo magnético (B_m)	1,16
Elevação máxima de temperatura	25 °C
Enrolamentos	Especificações
N_a, N_b, N_c	24 AWG 526 espiras
$N_{a1}, N_{a2}, N_{b1}, N_{b2}, N_{c1}, N_{c2}$	20 AWG 112 espiras
$N_{a3}, N_{a4}, N_{b3}, N_{b4}, N_{c3}, N_{c4}$	20 AWG 108 espiras
N_{an}, N_{bn}, N_{cn}	20 AWG 31 espiras

Fonte: dados do autor.

O peso encontrado para o cobre foi de 0,55 Kg por fase.

$$Peso_{cobre} = \frac{S_{cobre} \cdot \rho \cdot L_m}{100} = 557g \text{ (por fase)}$$

O volume do transformador é dado pela equação (93) sendo D a dimensão da perna central da chapa

$$Volume = 6 \cdot D \cdot 4,5 \cdot D \cdot (empilhamento_novo + D) \quad (93)$$

O peso do cobre para as bobinas que compõem cada fase, ou seja, as bobinas que são montadas sobre uma perna do núcleo é de aproximadamente 0,556 Kg. Assim, o peso total de cobre é de 1,67 Kg. O peso total do autotransformador (núcleo mais cobre) é então de 4,8 Kg, com um volume de 1.512 cm^3 e densidade de potência (W/pol³) de 27,55.

- **Topologia Delta.**

Para a topologia Delta proposta, a taxa kVA é de 0,18, valor obtido a partir do gráfico da Figura 85. Com o valor da potência total (S_{total}) que o núcleo processa encontra-se o produto das áreas a partir da equação em (83).

$$A_p = \left(\frac{S_{total} \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_m \cdot f \cdot K_u \cdot K_t} \right)^{1,14} = 230,3 \text{ cm}^4$$

A seção transversal do núcleo é dada pela equação (84). A lâmina escolhida foi D=3 cm (dimensão da perna central) em (85) é apresentado o valor para o empilhamento do núcleo.

$$A_c = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{A_p}{A_j} \right) = 6,82 \text{ cm}^2 \quad b = \frac{A_c}{D} = 2,3 \text{ cm}$$

O peso do núcleo foi apresentado na equação (86).

$$Peso_{núcleo} = \frac{(A_f - 2 \cdot A_j) \cdot b \cdot \sigma}{1000} = 3 \text{ kg}$$

Os valores de tensão e corrente em todos os enrolamentos para a topologia Delta é apresentado na tabela 7.5.

Com estes valores e a partir da equação (5.8), foram obtidos os valores para as bitolas dos fios apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Detalhes dos enrolamentos topologia Delta.

Enrolamentos	Tensão eficaz	Corrente eficaz	Condutor
N_a, N_b, N_c	127 V	0,42 A	25 AWG
$N_{a1}, N_{a2}, N_{b1}, N_{b2}, N_{c1}, N_{c2}$	0,64 V	2,64 A	20 AWG
$N_{a3}, N_{a4}, N_{b3}, N_{b4}, N_{c3}, N_{c4}$	45,7 V	2,64 A	20 AWG
N_{a3}, N_{b3}, N_{c3}	4,4 V	2,64 A	20 AWG

Fonte: dados do autor.

Resta apenas determinar o número de espiras para cada enrolamento através da equação (7). A tabela 10 apresenta todos os dados e especificações para o autotransformador com topologia Delta e C.

Tabela 10 - Detalhes do Autotransformador topologia Delta.

Tensão de linha de entrada	Trifásico 220 V
Tensão de fase de saída	Três sistemas trifásicos 134,6 V
Potência total na carga (P_o)	2,5 kW
Potencia processada pelo núcleo	450 VA
Taxa kVa	18 %
Frequência de operação (f)	60 Hz
Tipo de núcleo	E – I M25 – 27 GO, espessura 0,27 mm
Densidade máxima de Fluxo magnético (B_m)	1,1
Elevação máxima de temperatura	25 °C
Enrolamentos	Especificações
N_{ab}, N_{bc}, N_{ca}	25 AWG 997 espiras
$N_{ab1}, N_{ab2}, N_{bc1}, N_{bc2}, N_{ca1}, N_{ca2}$	20 AWG 0 espiras
$N_{ab3}, N_{ab4}, N_{bc3}, N_{bc4}, N_{ca3}, N_{ca4}$	20 AWG 207 espiras
$N_{abn}, N_{bcn}, N_{can}, N_{abn1}, N_{bcn1}, N_{can1}$	20 AWG 20 espiras

Fonte:

O peso para o cobre por fase para a topologia Delta foi de aproximadamente 0,6 Kg por fase.

$$Peso_{cobre} = \frac{S_{cobre\Delta} \cdot \rho \cdot L_m}{100} = 610g \text{ (por fase)}$$

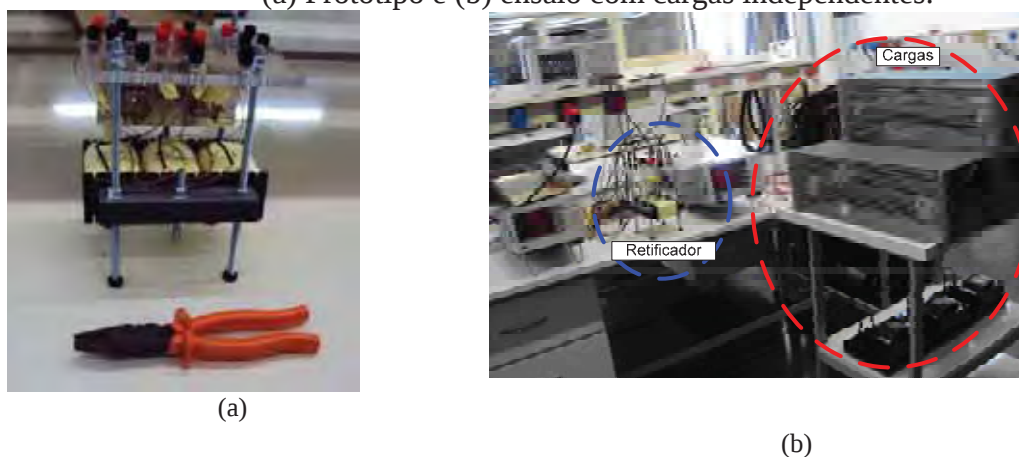
O peso para cada bobina neste caso é de aproximadamente 0,610 Kg. Assim, o peso total do cobre é de 1,830 Kg. O peso total do autotransformador (núcleo mais cobre) é então de 4,830 Kg, com um volume de 1.485 cm^3 e densidade de potência (W/pol^3) de 28.

7.4 RESULTADOS DO ENSAIO COM CARGAS INDEPENDENTES

7.4.1 Topologia Delta

Após a etapa de projeto vem à fase de implementação do retificador projetado. A Figura 141(a) apresenta foto do protótipo para topologia Delta. Na Figura 141 (b) é apresentado o ensaio do retificador com cargas independentes.

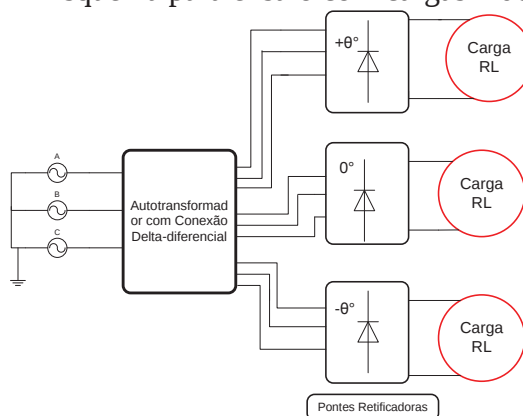
Figura 141 - Retificador Delta-diferencial configuração C de 18 pulsos
(a) Protótipo e (b) ensaio com cargas independentes.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 142 apresenta um esquema simplificado do ensaio com cargas independentes.

Figura 142 - Esquema para ensaio com cargas independentes.

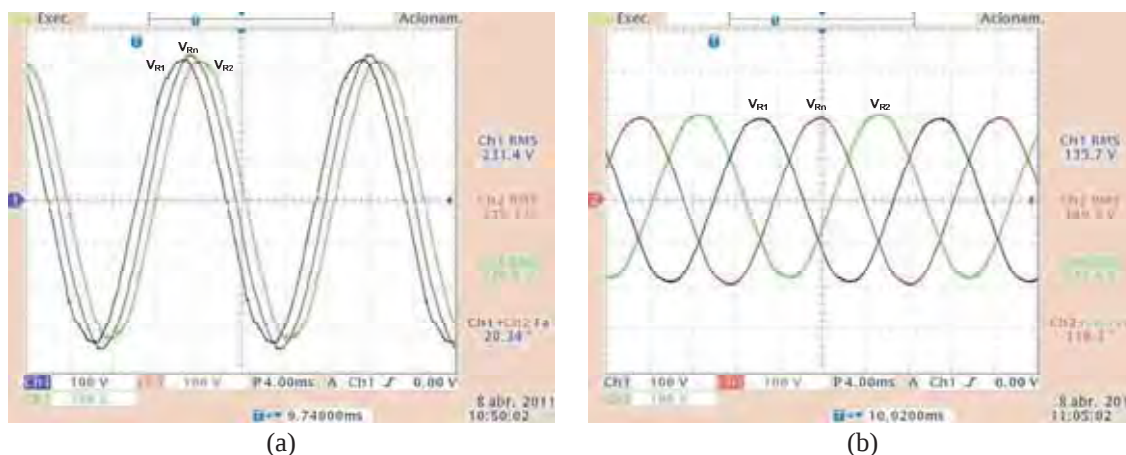


Fonte: Dados do autor.

A Figura 143 apresenta resultados a partir de ensaios realizados para o retificador com três cargas R-L independentes. São três conjuntos de cargas R-L com resistências de $120\ \Omega$ e indutâncias de $300\ \text{mH}$. A Figura 143 (a) apresenta as tensões secundárias V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} . Estas tensões estão defasadas entre si de 20° e cada uma faz parte de um sistema trifásico como o sistema V_{Rn} , V_{Sn} e V_{Tn} apresentado na Figura 143 (b).

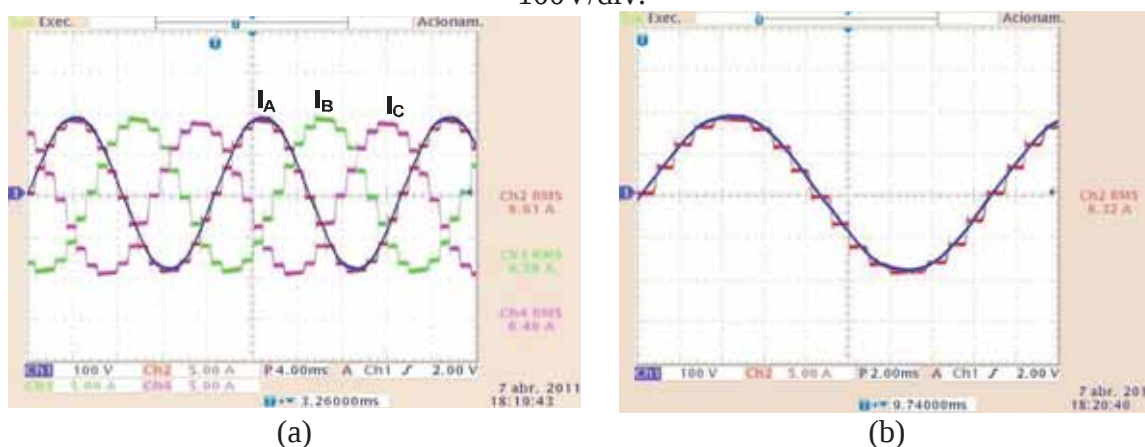
A Figura 144 (a) mostra as correntes na rede de alimentação. As correntes são simétricas e de mesma amplitude, apresentam 18 níveis em um período de rede. A Figura 144 (b) apresenta a corrente e a tensão em uma das fases da rede de alimentação mostrando que estão em fase, portando o fator de deslocamento para este retificador é praticamente unitário.

Figura 143 - Tensões secundárias: (a) V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} e (b) sistema de tensões secundário V_{Rn} , V_{Sn} e V_{Tn} , escalas 4ms/div e 100V/div .



Fonte: dados do autor.

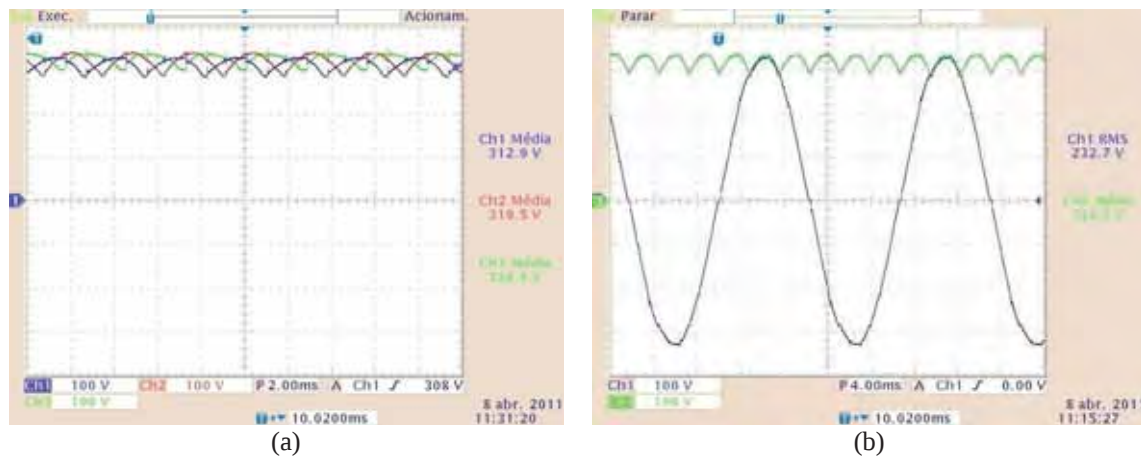
Figura 144 - Correntes na rede e tensão de fase: (a) Correntes I_A , I_B , I_C e tensão V_a , escalas 4ms/div , 5A/div , 100V/div (b) tensão e corrente na fase A, escalas 2ms/div , 5A/div , 100V/div .



Fonte: Dados do autor.

A Figura 145 (a) apresenta a tensão de seis pulsos na saída de cada ponte retificadora, já a Figura 145 (b) a tensão na saída retificadora '+ θ° ' e a tensão de linha V_{RS1} .

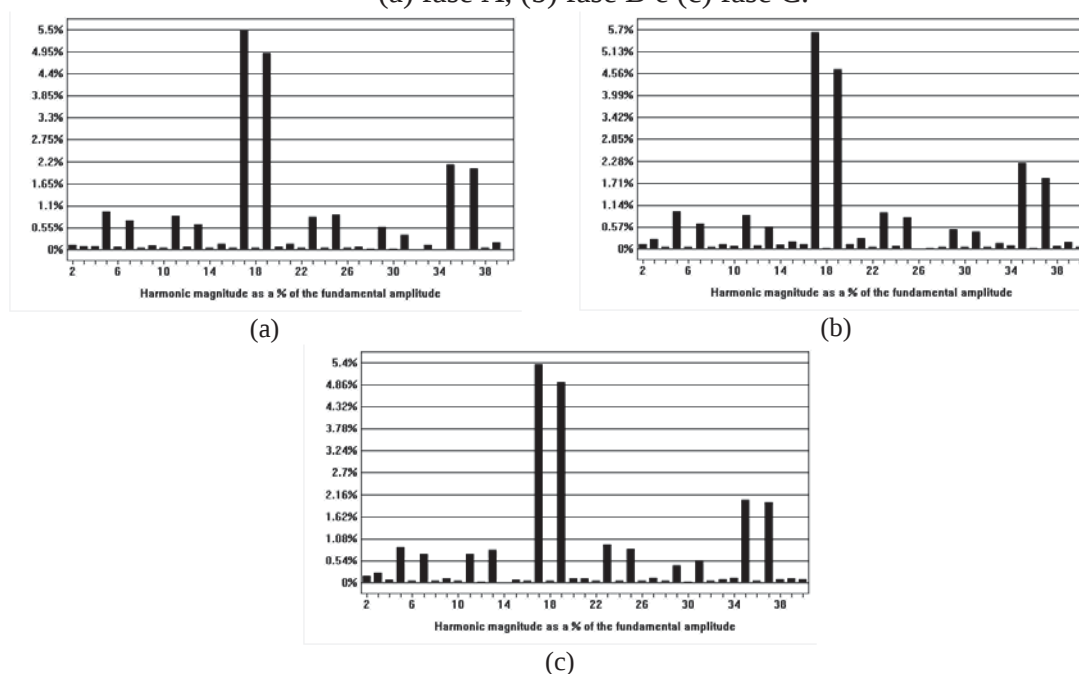
Figura 145 - Tensões retificadas : (a) tensão em cada uma das saídas das pontes, escalas 2ms/div, 100V/div (b) tensão retificada e tensão secundária de linha, escalas 4ms/div, 100V/div.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 146 apresenta resultados para distorção harmônica total de corrente para as três fases da rede.

Figura 146 - Distorção Harmônica de corrente retificador com topologia Delta (a) fase A, (b) fase B e (c) fase C.



Fonte: Dados do autor.

A tabela 11 apresenta alguns resultados para DHT de tensão e corrente, FP e FD (fator de deslocamento) para as três fases da rede.

Tabela 11 - Análise Harmônica para cargas independentes e topologia Delta.

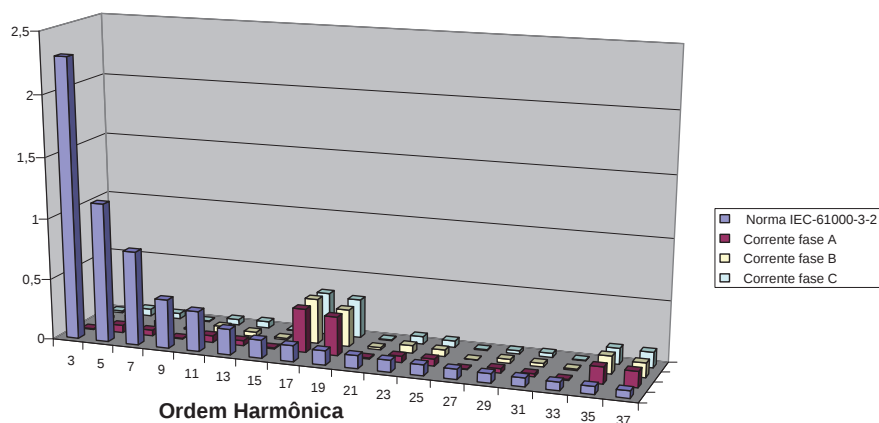
	Fase A (6,52 A)	Fase B (6,55 A)	Fase C (6,52 A)
DHT_v (%)	1,28	1,69	1,50
DHT_i (%)	8,24	8,20	8,12
FP	0,996	0,996	0,997
FD	0,999	0,999	0,999

Fonte:

A Figura 147 apresenta um gráfico de barras para a comparação das harmônicas de corrente individuais presentes no retificador, com a norma internacional IEC – 61000 – 3 - 2. Observa-se que apenas as harmônicas $K \cdot 18 \pm 1$ ($K=1,2,3,\dots$) não se enquadram à norma. Estas harmônicas podem ser facilmente filtradas através de filtros sintonizados ou até mesmo de um filtro passa baixa, já que são harmônicas de frequência distantes da componente fundamental (acima de 1k Hz).

Figura 147 - Comparação entre retificador Delta com cargas independentes e a Norma IEC – 61000 – 3 - 2 para harmônicas individuais de corrente.

Conteúdo Harmônico Conversor Delta-diferencial (Cargas independentes)



Fonte: Dados do autor.

7.4.2 Topologia Estrela

O retificador com topologia Estrela e configuração C é apresentado na Figura 148.

Figura 148 - Retificador Estrela-diferencial configuração A de 18 pulsos.



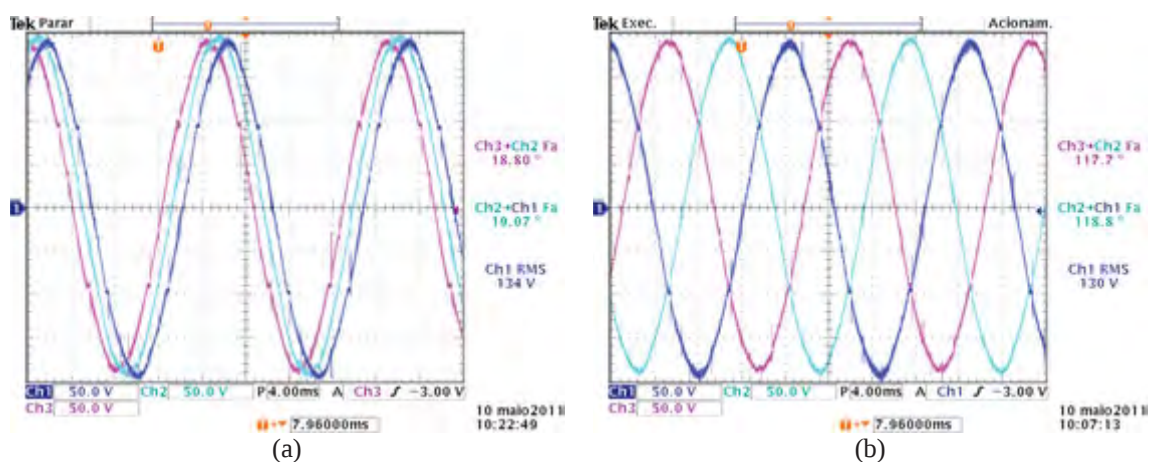
Fonte: Dados do autor.

O esquema para o ensaio deste retificador com cargas independentes é o mesmo mostrado na Figura 142, basta substituir o autotransformador com conexão Delta pelo com conexão Estrela. Foram utilizados também os mesmos valores para as cargas.

A Figura. 149 (a) apresenta as tensões secundárias V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} , para mostrar a defasagem de 20° entre as tensões dos três sistemas trifásicos. Na Figura 149 (b) é apresentado o sistema trifásico resultante V_{R1} , V_{S1} e V_{T1} .

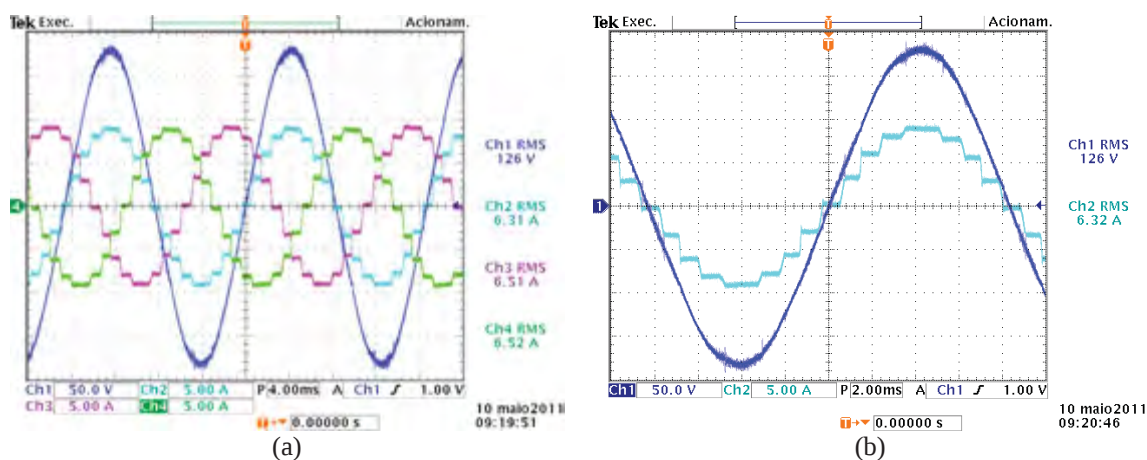
A Figura 150 (a) apresenta as correntes na rede de alimentação. Elas são simétricas e de mesma amplitude, apresentam 18 níveis em um período da rede. A figura 150 (b) mostra a corrente e a tensão em uma das fases da rede de alimentação.

Figura 149 Tensões resultantes secundárias : (a) tensões V_{R1} , V_{R2} e V_{Rn} , (b) sistema de tensões trifásicas '1', escalas 4ms/div, 50 V/div.



Fonte: Dados do autor.

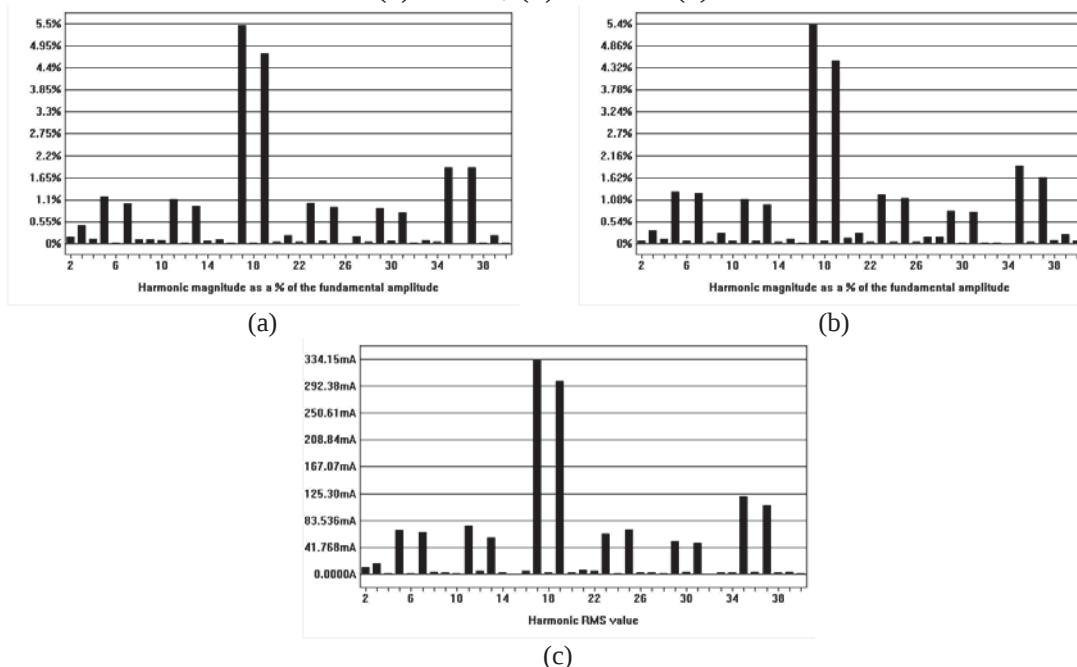
Figura 150 - Correntes na rede e tensão de alimentação : (a) Correntes I_A , I_B , I_C e tensão V_a , escalas 4ms/div, 50V/div, 5A/div (b) tensão e corrente na fase A, escalas 2ms/div, 50V/div e 5A/div.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 151 apresenta alguns resultados para distorção harmônica total de corrente nas três fases da rede de alimentação.

Figura 151 - Distorção Harmônica de corrente retificador com topologia Estrela (a) fase A, (b) fase B e (c) fase C.



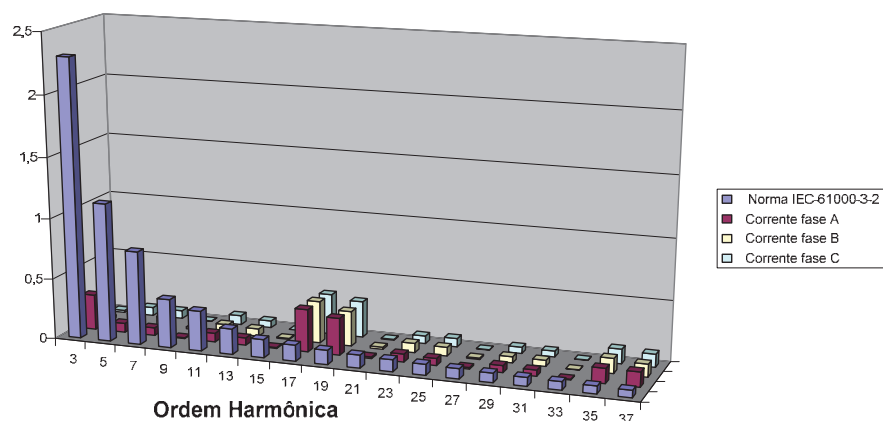
Fonte: Dados do autor.

A Figura 152 apresenta o gráfico de barras para o retificador com topologia Estrela e configuração A em comparação com a norma internacional IEC-61000-3-2.

Observa-se neste caso que também apenas as harmônicas $K \cdot 18 \pm 1$ ($K=1,2,3\dots$) não se enquadram a norma.

Figura 152 - Comparação entre retificador Estrela com cargas independentes e a Norma IEC – 61000 – 3 – 2 para harmônicas individuais de corrente.

Conteúdo Harmônico Conversor Estrela-diferencial (Cargas independentes)



Fonte: Dados do autor.

A Tabela 12 apresenta alguns resultados para DHT de tensão e corrente, FP e FD (fator de deslocamento) para as três fases da rede para o retificador com topologia Estrela.

Tabela 12 - Análise Harmônica para cargas independentes e topologia Estrela.

	Fase A (6,44 A)	Fase B (6,44 A)	Fase C (6,43 A)
DHT_v (%)	1,45	1,47	1,39
DHT_i (%)	8,27	8,12	8
FP	0,995	0,997	0,994
FD	0,999	0,999	0,999

Fonte:

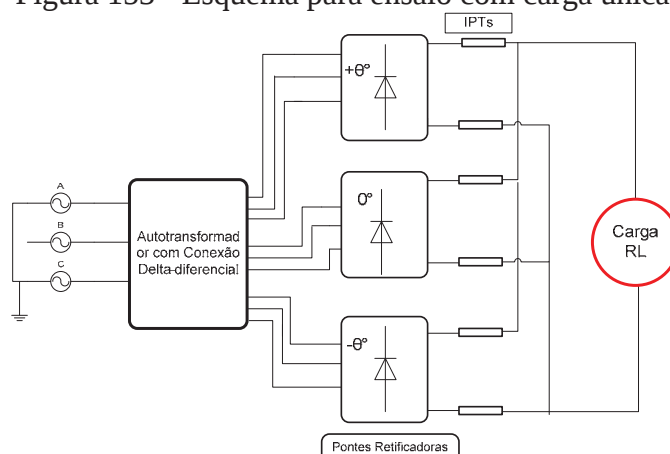
7.5 RESULTADOS DE ENSAIO COM CARGA ÚNICA

7.5.1 Topologia Delta

A Figura. 153 apresenta um esquema simplificado do ensaio com pontes em paralelo (carga única). É válido observar que os indutores utilizados foram projetados de acordo com [34, 81].

Para uma tensão média na carga de 315 V, corrente média em cada ponte retificadora de 2,7 A e variação de corrente de 5%, o valor mínimo de indutância para os IPTs foi de 105 mH. Com estes valores o peso para cada IPT foi de 0,8 kg.

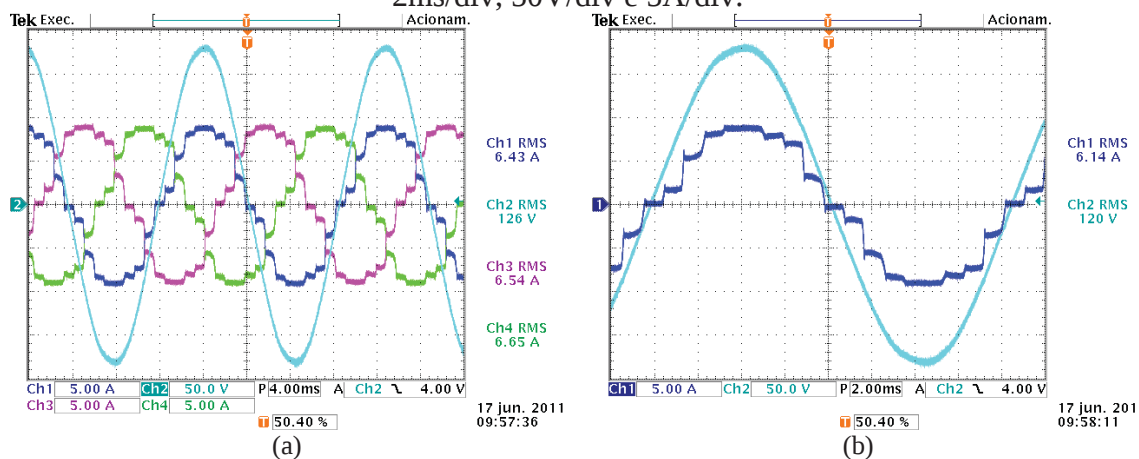
Figura 153 - Esquema para ensaio com carga única.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 154 apresenta resultados a partir de ensaios realizados com o retificador Delta e única carga R-L. A resistência utilizada foi de $40\ \Omega$ e indutância de 300 mH. A Figura 154 (a) apresenta as correntes nas três fases da rede de alimentação, simétricas entre si. A Figura 154 (b) mostra a corrente e a tensão em uma das fases da rede em maiores detalhes. O deslocamento entre a tensão e a corrente é maior devido à incorporação de elementos indutivos (IPTs) ao sistema.

Figura 154 - Resultados com pontes em paralelo para topologia Delta: (a) correntes e tensão na rede, escalas 4ms/div, 50V/div, 5A/div (b) detalhes da corrente e tensão na fase A, escalas 2ms/div, 50V/div e 5A/div.



Fonte: Dados do autor.

Resultados relacionados à DHT_i são apresentados na Figura 155. São apresentados gráficos que relacionam harmônicas de corrente em porcentagem da corrente fundamental para as três fases da rede de alimentação.

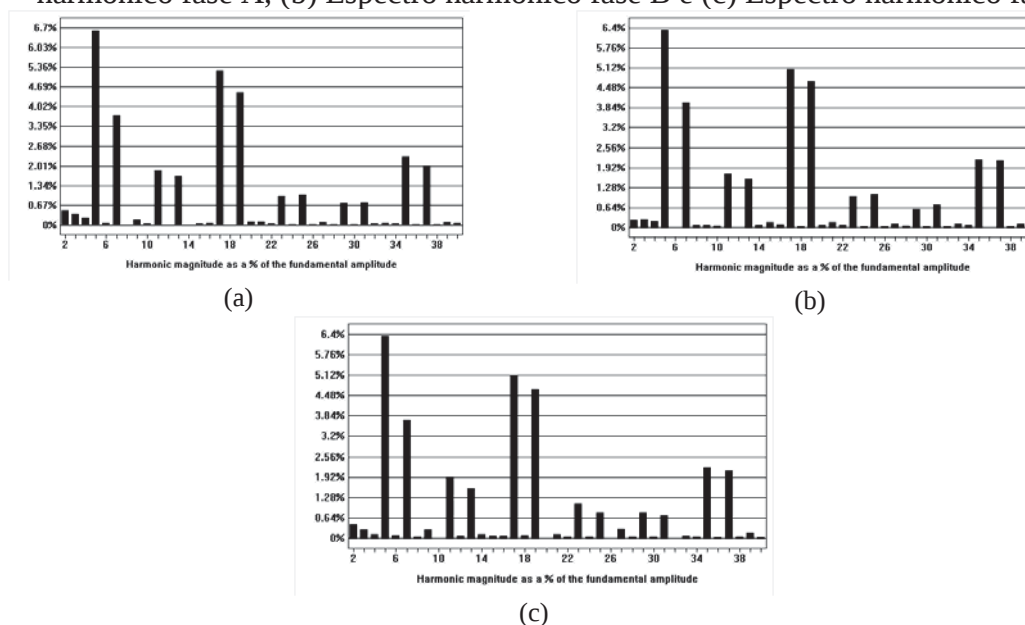
Os dados relacionados à qualidade de energia nas três fases da rede são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise Harmônica para carga única e topologia Delta.

	Fase A (6,53 A)	Fase B (6,51 A)	Fase C (6,49 A)
DHT_v (%)	0,93	0,96	1,026
DHT_i (%)	11,17	11,05	11
FP	0,986	0,987	0,989
FD	0,994	0,996	0,996

Fonte: dados do autor.

Figura 155 - Distorção harmônica total de corrente, topologia Delta e carga única (a) Espectro harmônico fase A, (b) Espectro harmônico fase B e (c) Espectro harmônico fase C.

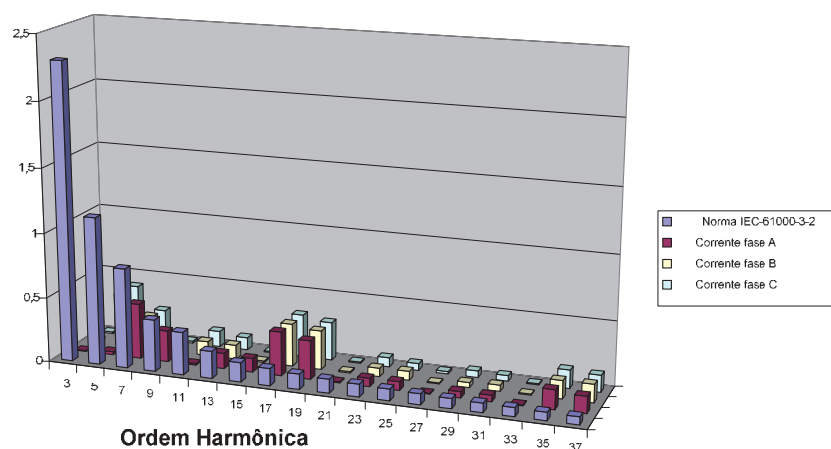


Fonte: Dados do autor.

A comparação dos harmônicos individuais de corrente, presentes no retificador proposto, e a norma internacional IEC – 61000 – 3 – 2 é apresentada na Figura 156 em forma de gráfico de barras. Observa-se que apenas as harmônicas $K \cdot 18 \pm 1$ ($K=1,2,3,\dots$) não se enquadram a norma ainda, porém, houve um aumento significativo em algumas componentes harmônicas como 7ª e 9ª.

Figura 156 - Comparação entre retificador Delta com cargas única e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

Conteúdo Harmônico Conversor Delta-diferencial (Cargas única)

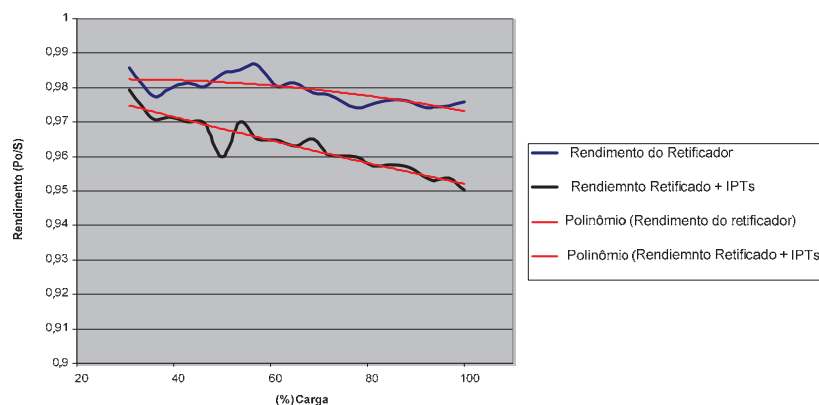


Fonte: Dados do autor.

A Figura 157 apresenta as curvas de rendimento para o retificador com conexão Delta-diferencial obtida através dos ensaios com cargas independentes e carga única.

Figura 157 - Curvas de rendimento para o retificador com topologia Delta.

Rendimento para o Retificador de 18 pulsos com Conexão Delta-diferencial.



Fonte: Dados do autor.

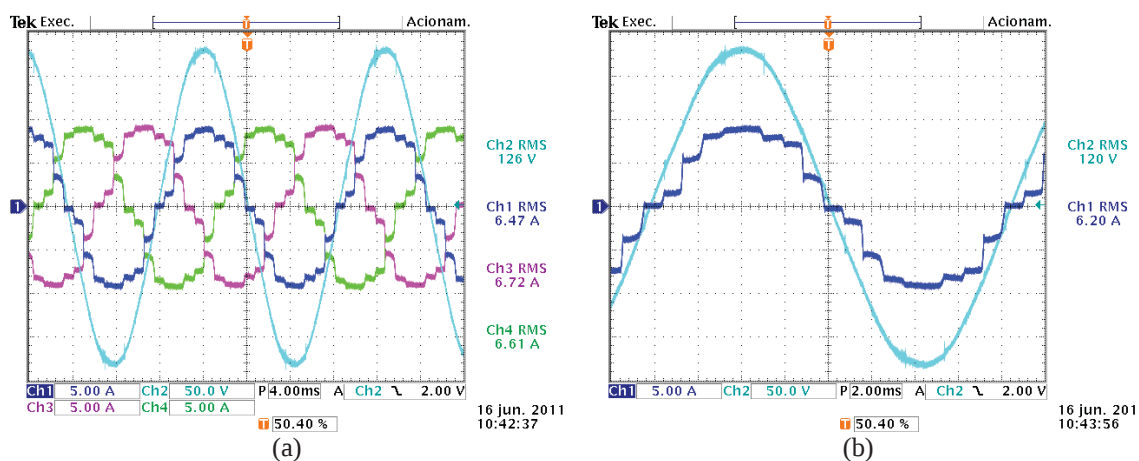
7.5.2 Topologia Estrela

O esquema simplificado do ensaio é o mesmo apresentado na Figura 153 basta mudar a topologia multipulso.

A Figura 158 apresenta resultados a partir de ensaios realizados com o retificador Estrela e carga R-L com os mesmos valores utilizados no ensaio com o retificador com conexão Delta. A Figura 158 (a) apresenta as correntes na rede e a tensão em uma das fases da

mesma. A Figura 158 (b) mostra a corrente e a tensão em uma das fases da rede em maiores detalhes.

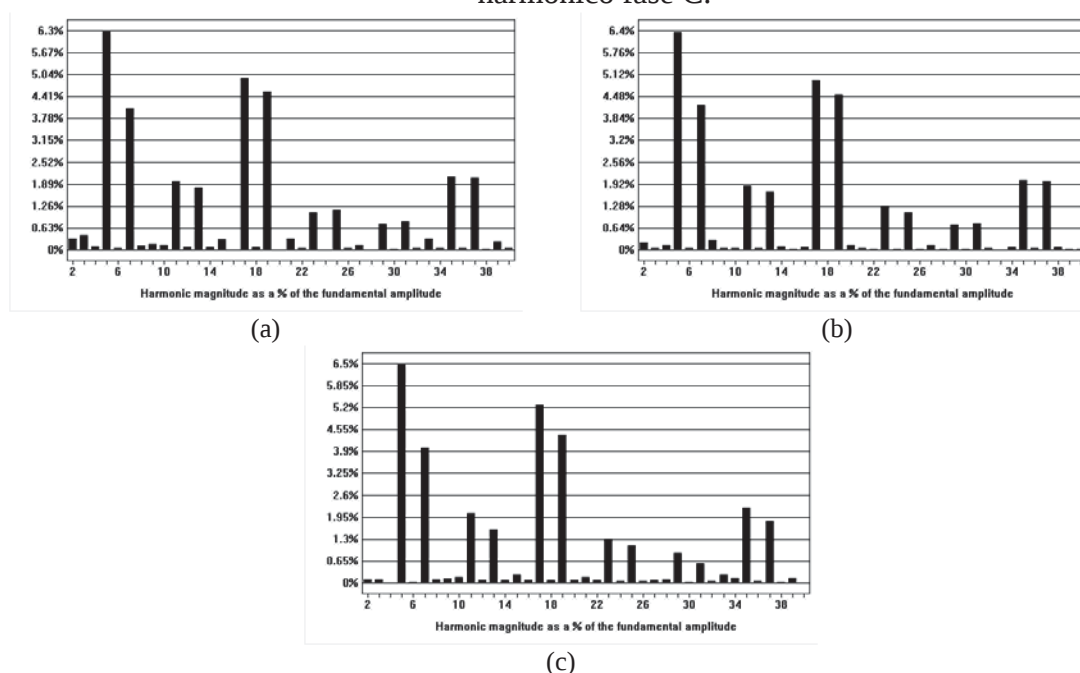
Figura 158 - Resultados com pontes em paralelo para topologia Estrela
(a) correntes e tensão na rede, escalas 4ms/div, 50V/div, 5A/div (b) detalhes de uma correntes e tensão na rede, escalas 2ms/div, 50V/div, 5A/div.



Fonte: Dados do autor.

Esta topologia apresentou resultados semelhantes com relação à qualidade de energia, estes resultados são apresentados na Figura 159.

Figura 159 - Distorção harmônica total de corrente para o retificador com topologia Estrela e carga única a) Espectro harmônico fase A, b) Espectro harmônico fase B e c) Espectro harmônico fase C.



Fonte: Dados do autor.

Resultados para DHT de tensão e corrente, FP e FD (fator de deslocamento) para as três fases da rede são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Análise Harmônica para carga única e topologia Estrela.

	Fase A (6,58 A)	Fase B (6,68 A)	Fase C (6,65 A)
DHT_v (%)	1,26	1,13	1,25
DHT_i (%)	11,03	11,08	11,19
FP	0,990	0,987	0,990
FD	0,996	0,995	0,998

Fonte: dados do autor.

A Figura 160 apresenta o gráfico de barras comparativo. Apenas as harmônicas $K \cdot 18 \pm 1$ ($K=1,2,3...$) não se enquadram a norma, porém, houve um aumento significativo em algumas componentes harmônicas como 5ª e 7ª neste caso.

A Figura 161 apresenta as curvas de rendimento para o retificador com conexão Estrela-diferencial, obtidas através dos ensaios com cargas independentes e carga única.

Figura 160 - Comparação entre retificador Estrela com carga única e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

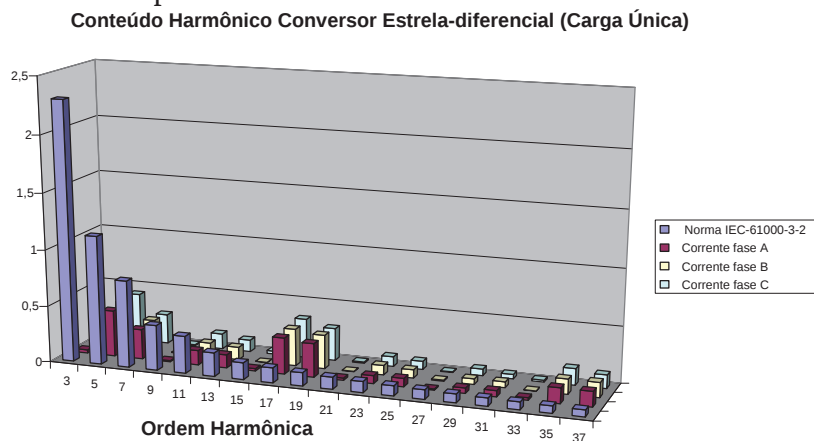
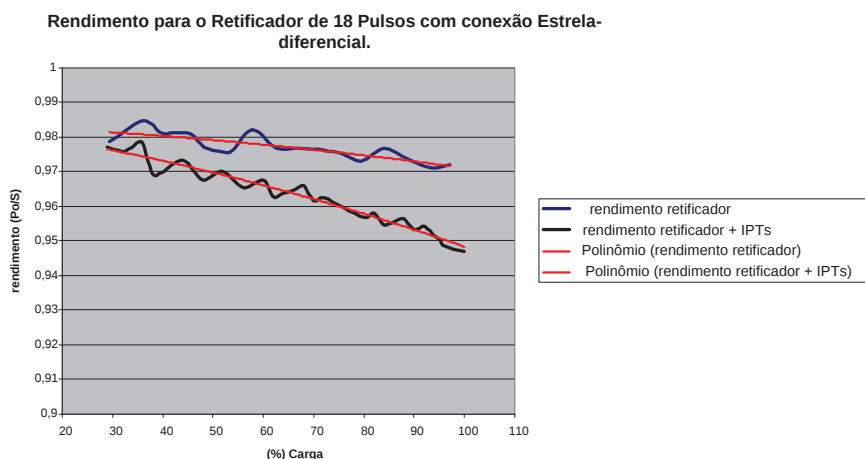


Figura 161 - Curvas de rendimento para o retificador com topologia Estrela.

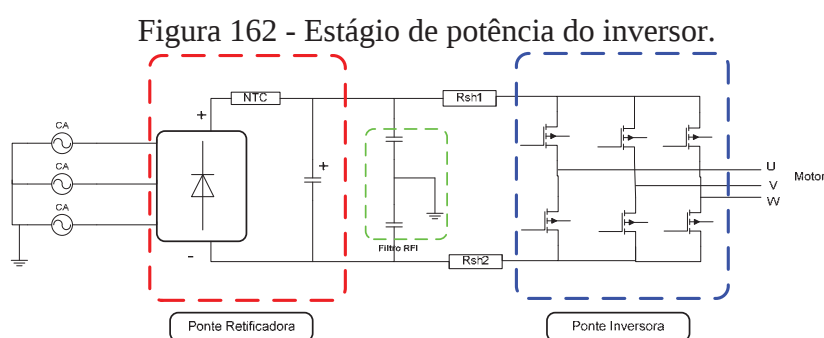


Fonte: Dados do autor.

7.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM OS INVERSORES COMERCIAIS

7.6.1 Ensaio Inversor 1

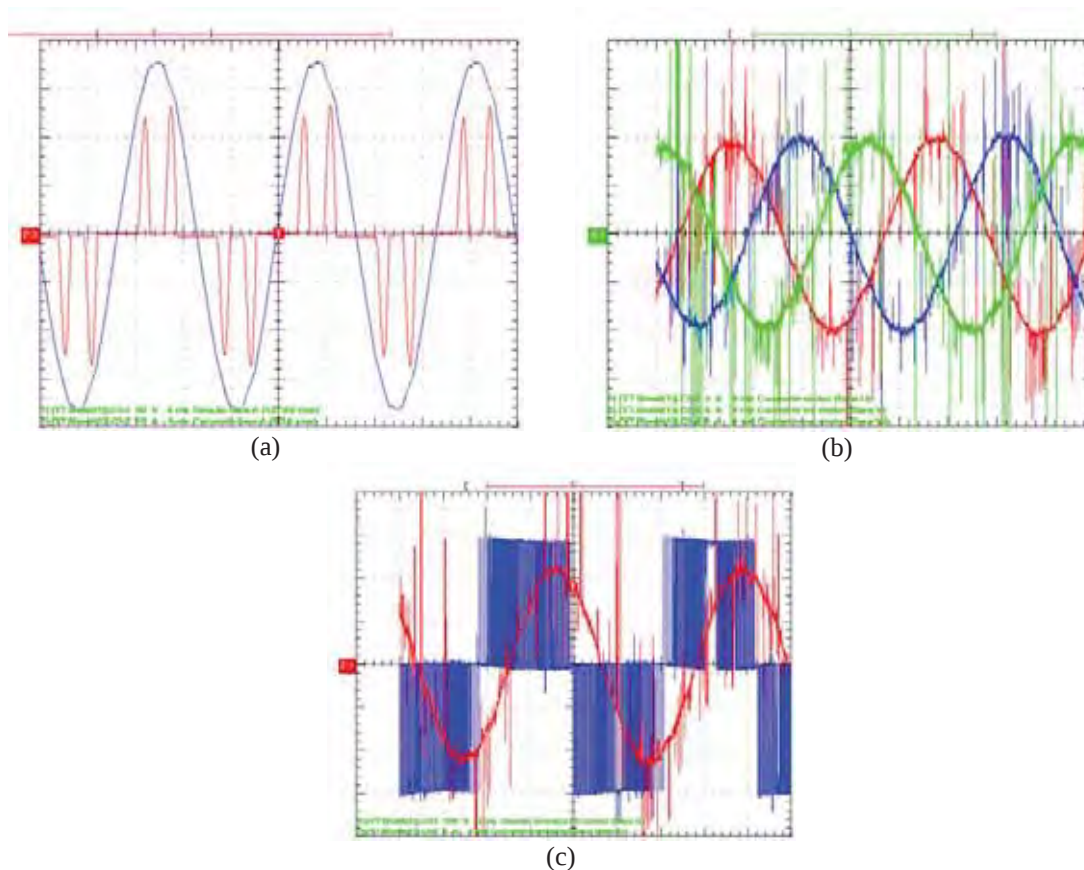
A figura 162 apresenta o estágio de potência de um inversor comercial.



Fonte: Weg (2006).

Como os retificadores propostos foram projetados para substituir o estágio CA-CC do inversor trifásico comercial, ensaios com carga foram realizados com o inversor a fim de, verificar a corrente que este equipamento drena da rede. A Figura 163 (a) apresenta a corrente pulsada, típica de um inversor de frequência, e a tensão em uma das fases da rede de alimentação.

Figura 163 - Formas de ondas do inversor : (a) Corrente drenada para rede por um inversor trifásico, escalas, 5ms/div, 10A/div, 50V/div (b) Correntes no motor, escalas 4ms/div, 5A/div (c) tensão e corrente, escalas 4ms/div, 5A/div, 100V/div.



Fonte: Dados do autor.

As Figuras 163 (b) e (c) apresentam as correntes e a tensão de saída do inversor, ou seja, que alimentam o motor.

Ensaio foram realizados a plena carga e a carga reduzida (20% carga máxima). A Tabela 15 apresenta resultados relacionados à qualidade de energia como taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente e fator de potência para o inversor CFW 08. É válido observar que os demais inversores em teste apresentam características semelhantes com relação às formas de onda de tensão e corrente, sendo assim, os resultados relacionados à qualidade da energia na rede apresentam pouca variação.

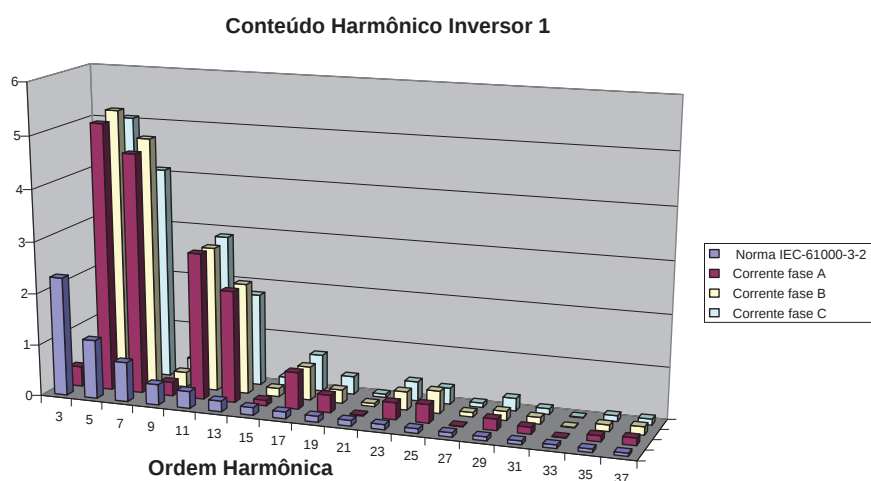
Tabela 15 - Análise harmônica para o inversor 1

20% carga	Fase A (1,8 A)	Fase B (2,05 A)	Fase C (1,93 A)
DHT _v (%)	1,26	1,05	0,94
DHT _i (%)	186,8	182,1	184,3
FP	0,504	0,48	0,49
Plena carga	Fase A (9,24 A)	Fase B (10,2 A)	Fase C (9,33 A)
DHT _v (%)	1,16	1,08	1,15
DHT _i (%)	131,5	128,9	132,4
FP	0,64	0,61	0,6

Fonte:

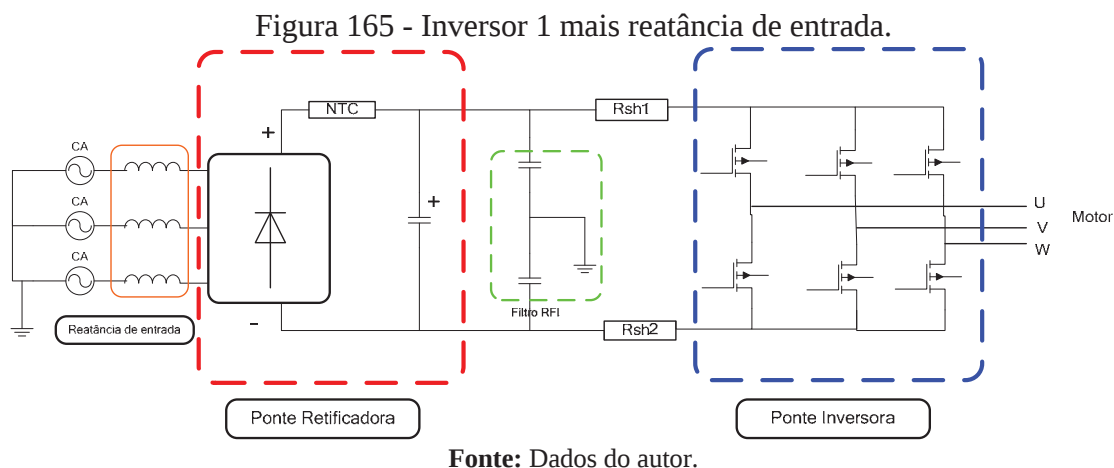
Comparando com a norma na Figura 164, inversores comerciais injetam elevado conteúdo harmônico de corrente a rede de alimentação.

Figura 164 - Comparação entre inversor e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.



7.6.2 Ensaio Inversor 1 com reatância de entrada

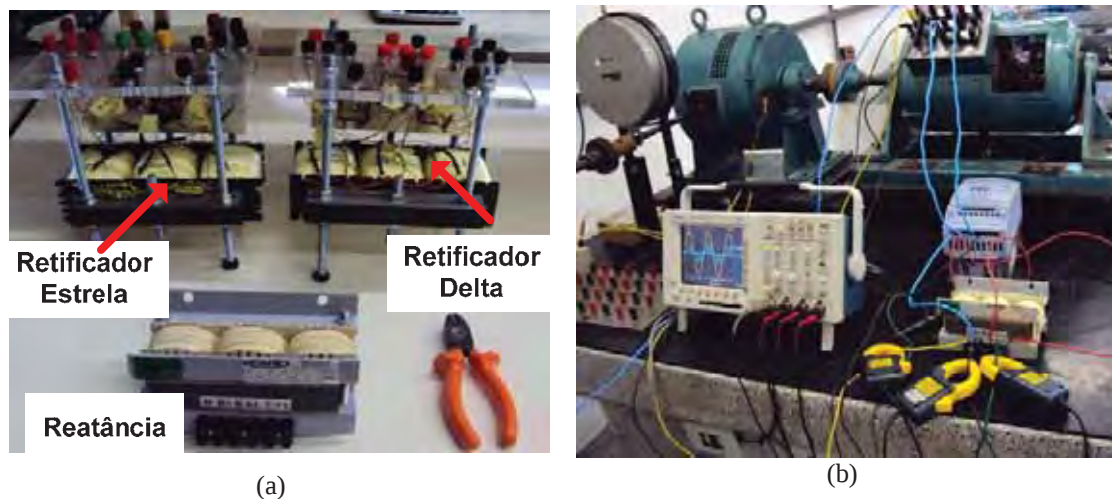
A Figura 165 apresenta um diagrama de blocos para o arranjo inversor mais reatância de entrada.



Na Figura 166 (a) é mostrada a reatância de entrada, de uso comercial, especificada para o inversor 1, juntamente com os retificadores propostos. Observa-se da figura que o filtro de entrada apresenta aproximadamente o mesmo tamanho do autotransformador que compões os retificadores propostos.

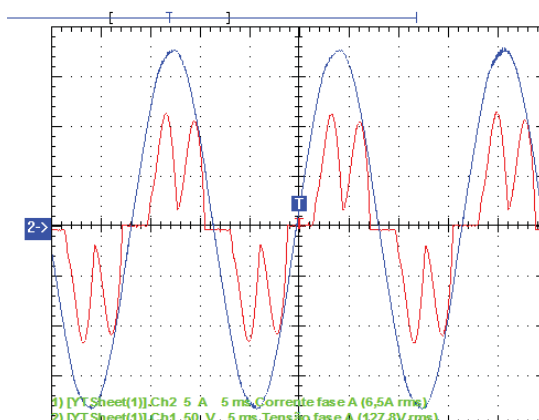
A Figura 166 (b) apresenta uma foto do ensaio do inversor com a reatância de entrada o motor e a carga (freio).

Figura 166 - (a) Retificadores e reatância de entrada e (b) Ensaio Inversor (CFW08) com reatância de entrada.



A Figura 167 apresenta a corrente e a tensão em uma das fases da rede para ensaio a plena carga. A corrente neste caso foi suavizada.

Figura 167 - Corrente drenada da rede pelo inversor trifásico 1 com reatância de entrada, escalas 5ms/div, 5A/div, 50V/div.



Fonte: Dados do autor.

A Tabela 16 apresenta resultados relacionados à qualidade de energia para os ensaios a plena carga e com carga reduzida.

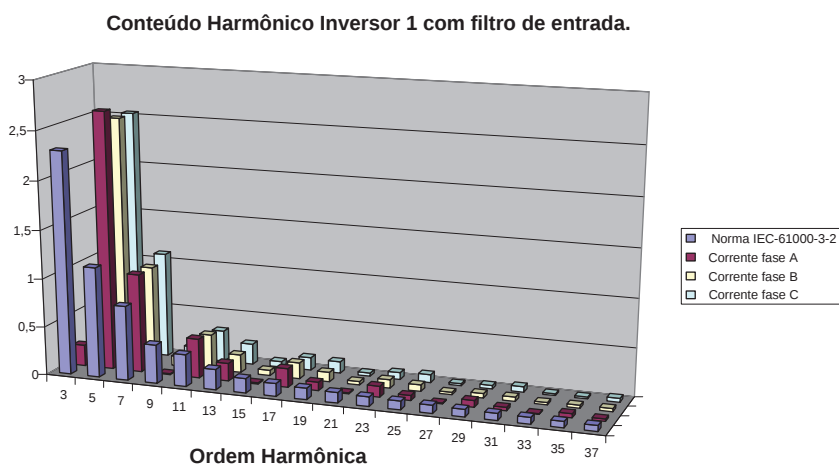
Tabela 16 - Análise harmônica para o inversor 1 mais reatância de entrada.

20% carga	Fase A (1,31 A)	Fase B (1,49 A)	Fase C (1,49 A)
DHT _v (%)	1,04	1,08	0,92
DHT _i (%)	99,5	95,6	94,7
FP	0,73	0,70	0,72
Plena carga	Fase A (6,5 A)	Fase B (6,62 A)	Fase C (6,7 A)
DHT _v (%)	0,98	1,17	1,00
DHT _i (%)	51,4	47,64	47
FP	0,87	0,86	0,89

Fonte: dados do autor.

Comparando com a norma na Figura 168, apesar da reatância melhorar um pouco da distorção harmônica de corrente ela ainda é muito elevada.

Figura 168 - Comparação entre inversor 1 com reatância de entrada e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

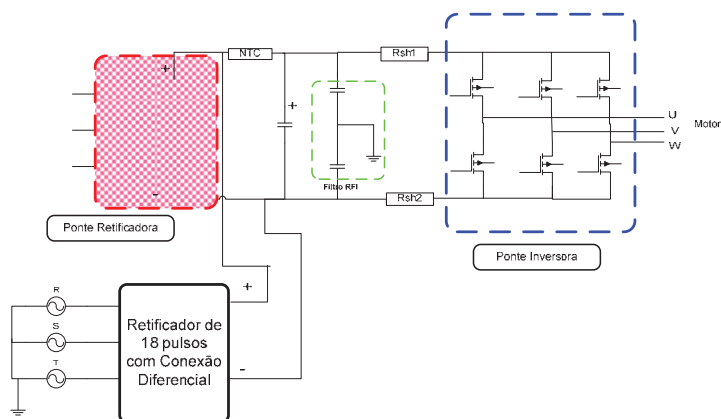


Fonte: Dados do autor.

7.6.3 Ensaios para o inversor 1: aplicação para retrofit

A Figura 169 apresenta o esquema para o ensaio do inversor com um dos retificadores propostos.

Figura 169 - Esquema para o ensaio do inversor associado ao retificador proposto.

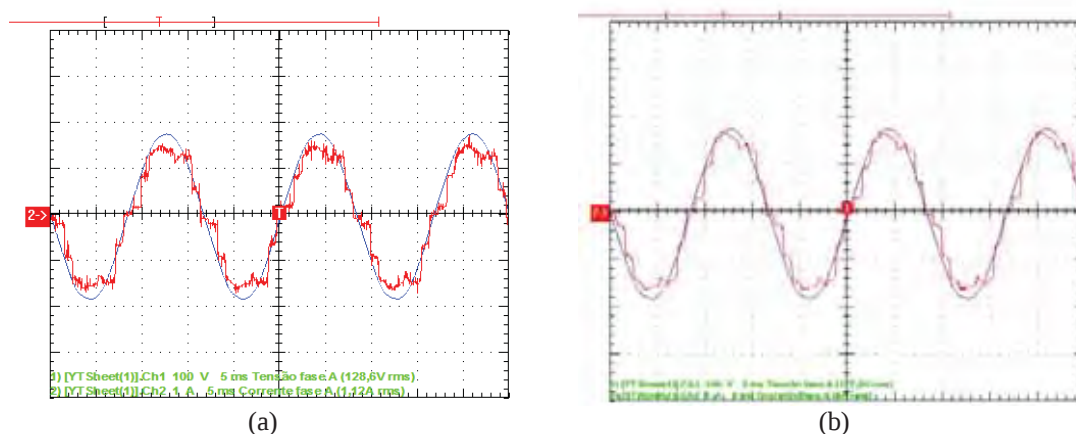


Fonte: Dados do autor.

- **Topologia Delta.**

A Figura 170 apresenta a corrente e a tensão em uma das fases da rede quando o retificador Delta-diferencial proposto substitui a ponte de seis pulsos do inversor.

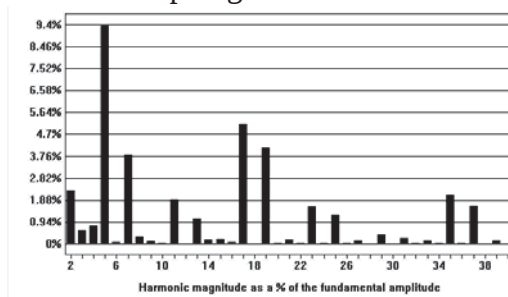
Figura 170 - Corrente e tensão topologia Delta e inversor 1: (a) 20% carga, escalas 5ms/div, 1A/div, 100V/div (b) plena carga, escalas 5ms/div, 5A/div, 100V/div.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 171 apresenta o gráfico das correntes harmônicas em função da corrente fundamental para a fase A de alimentação da rede. É importante dizer que os resultados para as demais fases são semelhantes ao apresentado para fase A.

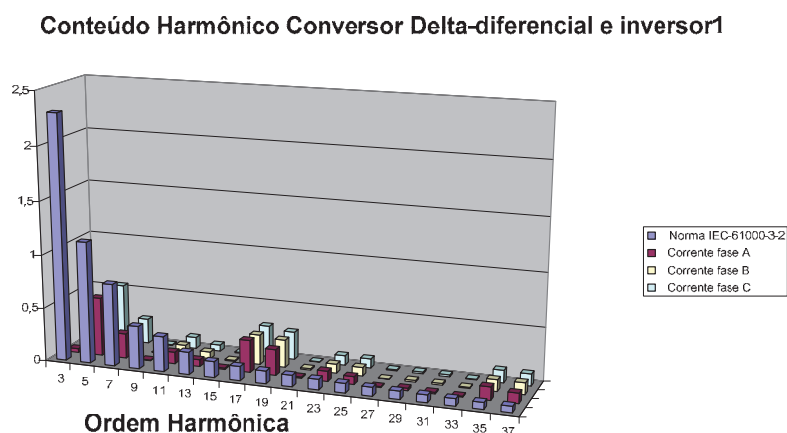
Figura 171 - Distorção harmônica total de corrente para o ensaio inversor 1 com retificador com topologia Delta.



Fonte: Dados do autor.

A Figura 172 apresenta uma comparação entre os componentes harmônicos existentes no sistema utilizando o retificador proposto e a norma IEC – 61000 – 3 – 2.

Figura 172 - Comparação entre inversor mais retificador Delta e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.



Fonte: Dados do autor.

Para o retificador Delta e inversor 1 os resultados relacionados à qualidade de energia entregue a rede são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Análise harmônica para o inversor 1 mais retificador Delta.

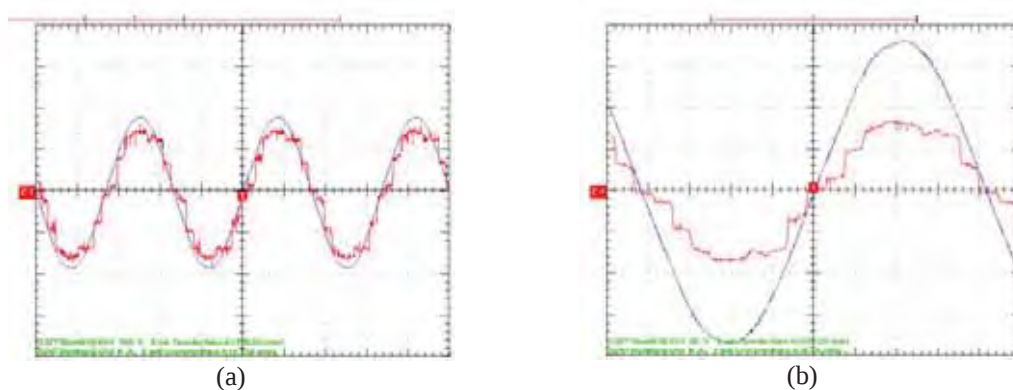
20% carga	Fase A (1,12 A)	Fase B (1,15 A)	Fase C (1,14 A)
DHT _v (%)	1,13	1,06	0,947
DHT _i (%)	15,6	14,89	15,6
FP	0,987	0,985	0,979
FD	0,994	0,994	0,994
Plena carga	Fase A (6 A)	Fase B (6 A)	Fase C (6,1 A)
DHT _v (%)	1,16	1,13	0,99
DHT _i (%)	13	12,3	12,6
FP	0,982	0,984	0,991
FD	0,995	0,995	0,996

Fonte: dados do autor.

- **Topologia Estrela.**

A Figura 173 apresenta a corrente e a tensão em uma das fases da rede para a topologia Estrela e inversor 1.

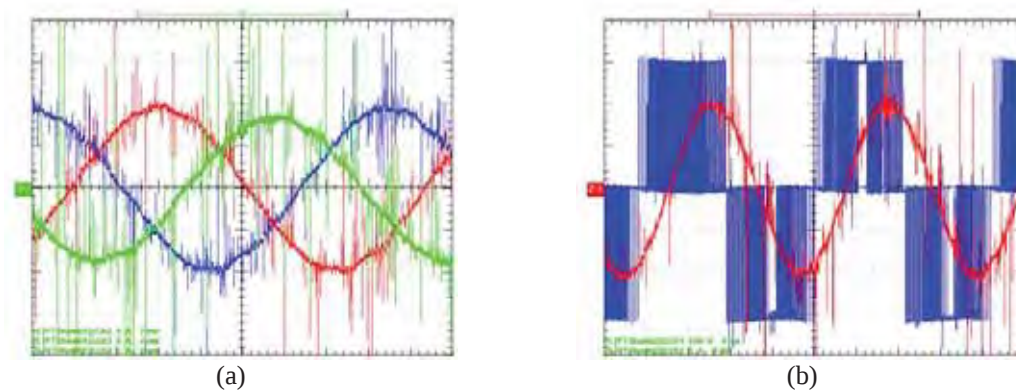
Figura 173 - Corrente e tensão topologia Estrela e inversor 1: (a) 20% carga, escalas 5ms/div, 1A/div, 100V/div (b) plena carga, escalas 2ms/div, 5A/div, 50V/div.



Fonte: Dados do autor.

As correntes e a tensão que alimentam o motor a plena carga são apresentadas na Figura 174.

Figura 174 - Formas de onda do inversor 1 mais retificador Delta proposto a plena carga (a) Correntes, escalas 2ms/div, 5A/div (b) tensão e corrente, escalas 4ms/div, 5A/div, 100V/div.



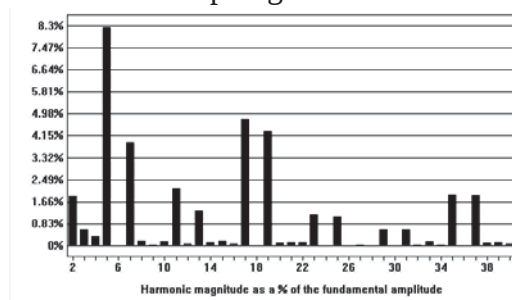
Fonte: Dados do autor.

A Figura 175 apresenta o gráfico das correntes harmônicas em função da corrente fundamental para a fase A de alimentação da rede.

A Tabela 18 apresenta resultados relacionados à qualidade de energia quando é introduzido ao sistema o retificador de 18 pulsos com topologia Estrela proposto e apresentado na figura 171.

A Figura 176 apresenta uma comparação entre os componentes harmônicos existentes no sistema utilizando o retificador Estrela e a norma IEC – 61000 – 3 – 2.

Figura 175 - Distorção harmônica total de corrente para o ensaio inversor 1 mais retificador com topologia Estrela.



Fonte: Dados do autor.

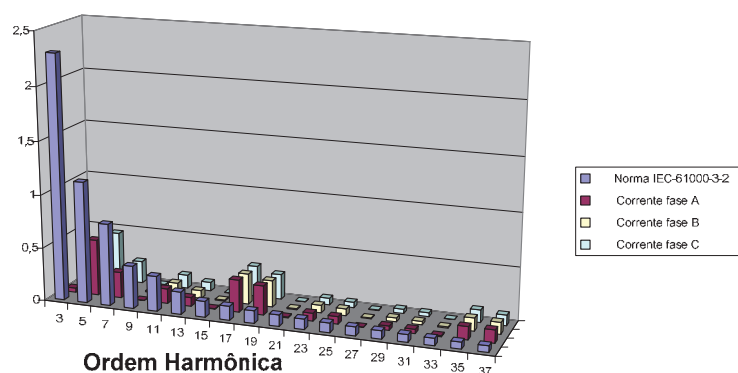
Tabela 19 - Análise harmônica para o inversor 1 mais retificador Estrela.

20% carga	Fase A (1,12 A)	Fase B (1,15 A)	Fase C (1,13 A)
DHT _v (%)	1,7	1,63	1,52
DHT _i (%)	12,6	12,3	12,3
FP	0,98	0,982	0,979
FD	0,990	0,995	0,992
Plena carga	Fase A (6,4 A)	Fase B (5,8 A)	Fase C (6 A)
DHT _v (%)	1,2	1,22	1,28
DHT _i (%)	12,09	12,2	11,8
FP	0,988	0,989	0,989
FD	0,993	0,996	0,995

Fonte: dados do autor

Figura 176 - Comparação entre inversor 1 mais retificador Estrela e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

Conteúdo Harmônico Conversor Estrela-diferencial Inversor 1.



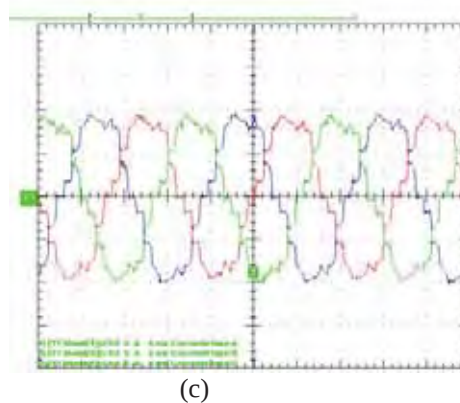
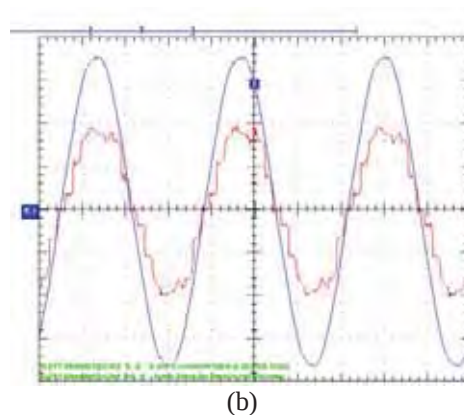
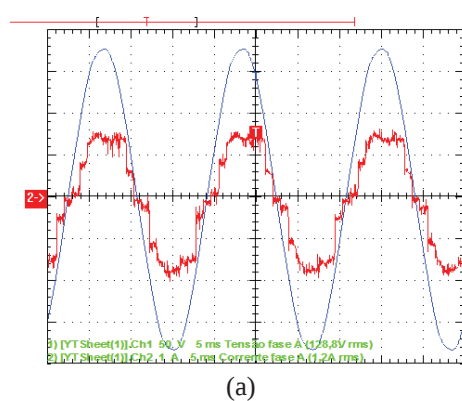
Fonte: Dados do autor.

7.6.4 Ensaio inversor 2: aplicação para retrofit

- **Topologia Delta.**

A corrente e tensão apresentadas na Figura 177 (a), (b) e (c) apresentam características semelhantes às apresentadas para o caso com o inversor 1.

Figura 177 - Corrente e tensão para o ensaio com inversor 2 e retificador com topologia Delta
(a) 20% carga, escalas 5ms/div, 1A/div, 50V/div (b) plena carga, escalas 5ms/div, 5A/div, 50V/div e (c) Correntes na rede de alimentação 5ms/div, 5A/div.



Fonte: Dados do autor.

A Tabela 20 apresenta resultados relacionados à qualidade de energia para o sistema retificador de 18 pulsos com topologia Delta associado ao inversor 2.

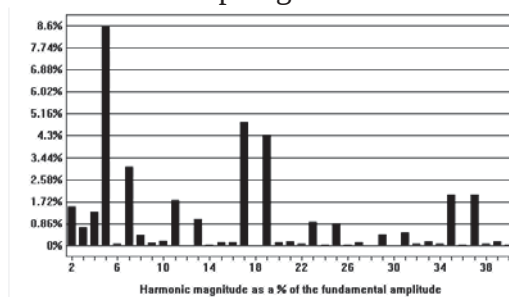
Tabela 20 - Análise harmônica para o inversor 2 mais retificador Delta.

20% carga	Fase A (1,12 A)	Fase B (1,15 A)	Fase C (1,14 A)
DHT _v (%)	1,13	1,06	0,947
DHT _i (%)	15,6	14,89	15,6
FP	0,987	0,985	0,979
FD	0,994	0,994	0,994
Plena carga	Fase A (6 A)	Fase B (6 A)	Fase C (6,1 A)
DHT _v (%)	1,16	1,13	0,99
DHT _i (%)	13	12,3	12,6
FP	0,982	0,984	0,991
FD	0,995	0,995	0,996

Fonte: dados do autor.

A Figura 178 apresenta o gráfico das correntes harmônicas em porcentagem da corrente fundamental para a fase A de alimentação da rede.

Figura 178 - Distorção harmônica total de corrente para o ensaio inversor 2 mais retificador com topologia Delta.

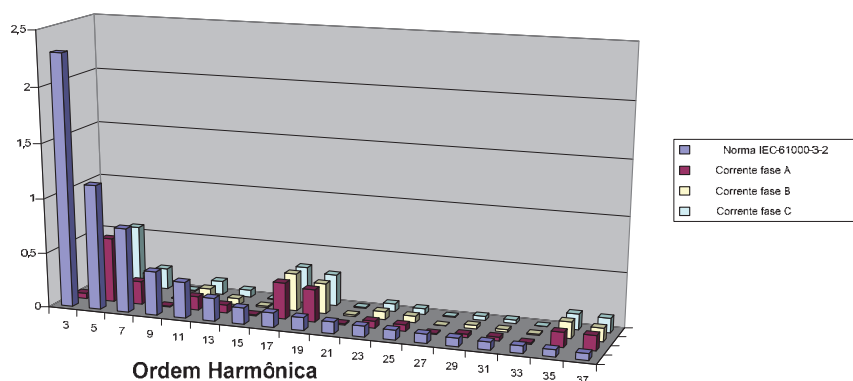


Fonte: Dados do autor.

O gráfico comparativo da Figura 179, facilita a análise das componentes harmônicas individuais de correntes. Existem alguns valores acentuados para 5ª e 7ª harmônicas, porém, esses valores não ultrapassam a norma IEC – 61000 – 3 – 2.

Figura 179 - Comparação entre inversor (CFW09) mais retificador Delta e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

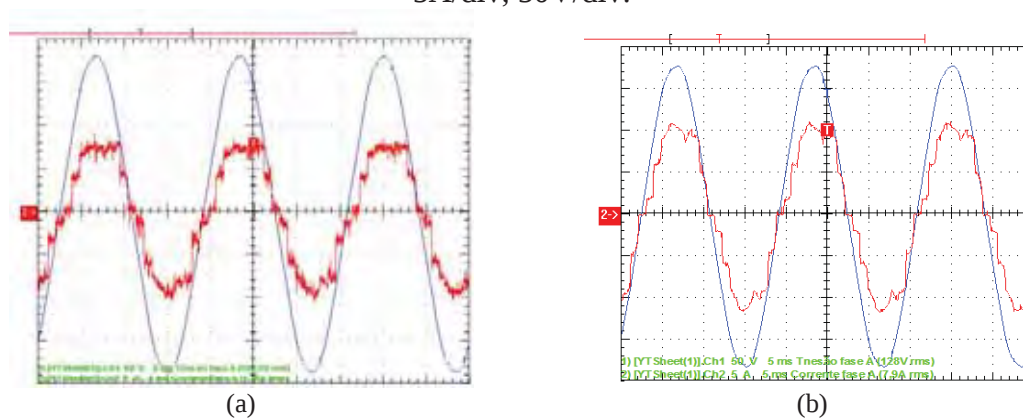
Conteúdo Harmônico Inversor 2 com Conversor Delta-diferencial.



- **Topologia Estrela.**

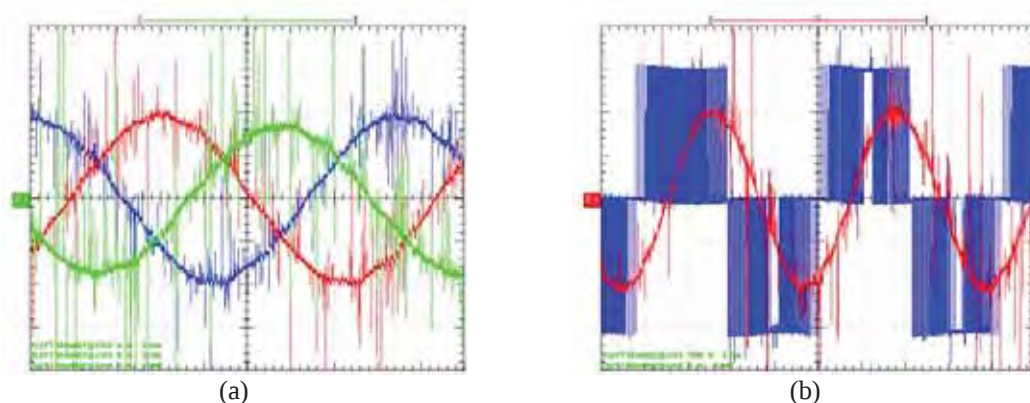
Como foi apresentado para a topologia Delta, na Figura 180 é apresentado a corrente e a tensão quando ocorre a substituição da ponte retificadora pelo retificador multipulsos com topologia Estrela.

Figura 180 - Corrente e tensão para o ensaio com o inversor 2 e retificador com topologia Estrela a) 20% carga, escalas 5ms/div, 1A/div, 50V/div b) plena carga, escalas 5ms/div, 5A/div, 50V/div.



As correntes e a tensão que alimentam o motor são apresentadas na Figura 181 a plena carga. O retificador proposto não altera nenhuma característica do inversor apenas melhora a corrente drenada para a rede de alimentação.

Figura 181 - Formas de ondas do inversor 2 mais retificador proposto Estrela a plena carga (a) Correntes, escalas 2ms/div, 5A/div (b) tensão e corrente, escalas 4ms/div, 5A/div, 100V/div.

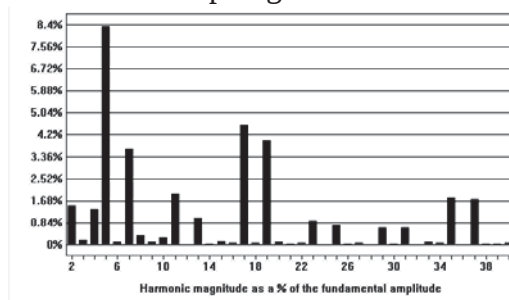


Fonte: Dados do autor.

É apresentado o gráfico para as harmônicas individuais de corrente para apenas uma das fases da rede na Figura 182, uma vez que, para as demais fases os resultados são semelhantes. Na Tabela 21 são apresentados resultados gerais, para a qualidade de energia na rede, obtidos no ensaio a plena carga e a 20% da carga. O fator de potência para os dois casos ficou em torno de 0,99 e a DHT_i abaixo de 15%.

Para este caso o gráfico que apresenta a comparação entre os componentes harmônicos e a norma é apresentado na Figura 183.

Figura 182 - Distorção harmônica total de corrente para o ensaio inversor 2 mais retificador com topologia Estrela.



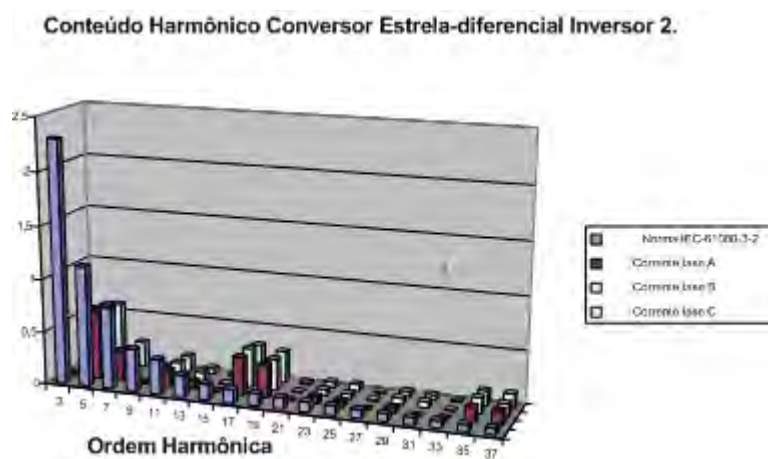
Fonte: Dados do autor.

Tabela 21 - Análise harmônica para o inversor 2 mais retificador Estrela.

Plena carga	Fase A (7,9 A)	Fase B (7,7 A)	Fase C (7,3 A)
DHT _v (%)	1,3	1,3	1,1
DHT _i (%)	11,7	11,8	11,5
FP	0,989	0,986	0,994
FD	0,991	0,994	0,995
20% carga	Fase A (1,26 A)	Fase B (1,26 A)	Fase C (1,5 A)
DHT _v (%)	1,58	1,6	1,41
DHT _i (%)	14,36	14,05	14,3
FP	0,979	0,988	0,987
FD	0,987	0,993	0,993

Fonte: dados do autor.

Figura 183 - Comparação entre inversor 2 mais retificador Estrela e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

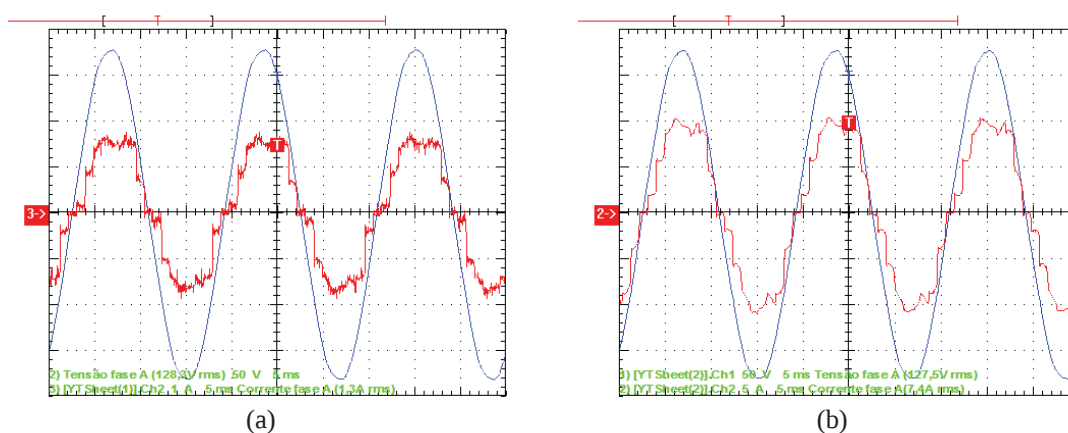


7.6.5 Ensaio inversor 3: aplicação para retrofit

- **Topologia Delta.**

A Figura 184 apresenta a corrente e a tensão em uma das fases da rede. Observa-se grande semelhança nas correntes drenadas para a rede quando os retificadores propostos são adicionados ao sistema aos três inversores testados.

Figura 184 - Corrente e tensão para o ensaio com inversor 3 e retificador com topologia Delta
(a) 20% carga, escalas 5ms/div, 1A/div, 50V/div (b) plena carga, escalas 5ms/div, 5A/div, 50V/div.



Fonte: Dados do autor.

Para a fase A o gráfico que contem as harmônicas individuais de corrente, obtido pela análise harmônica através do software Wavestar é apresentado na Figura 185.

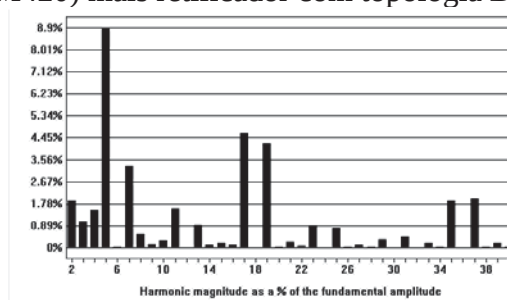
A Tabela 22 apresenta resultados relacionados à qualidade de energia para o sistema retificador de 18 pulsos com topologia Delta associado ao inversor 3.

Tabela 21 - Análise harmônica para o inversor 3 mais retificador Delta.

20% carga	Fase A (1,3 A)	Fase B (1,2 A)	Fase C (1,2 A)
DHT _v (%)	1,1	1,2	1,03
DHT _i (%)	15,8	15,4	15,8
FP	0,961	0,982	0,983
FD	0,994	0,995	0,995
Plena carga	Fase A (7,47 A)	Fase B (7.2 A)	Fase C (7 A)
DHT _v (%)	1,06	1,16	1
DHT _i (%)	12,23	12,26	11,8
FP	0,985	0,986	0,996
FD	0,994	0,995	0,995

Fonte: dados do autor.

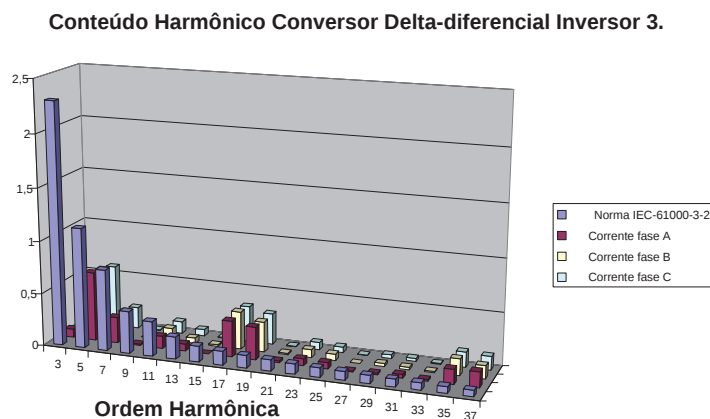
Figura 185 - Distorção harmônica total de corrente para o ensaio inversor (Siemens – MM420) mais retificador com topologia Delta.



Fonte: Dados do autor.

O gráfico da Figura 186 é de suma importância, pois, através dele é possível observar quais harmônicas individuais de corrente se enquadram ou não a norma internacional IEC – 61000 – 3 – 2.

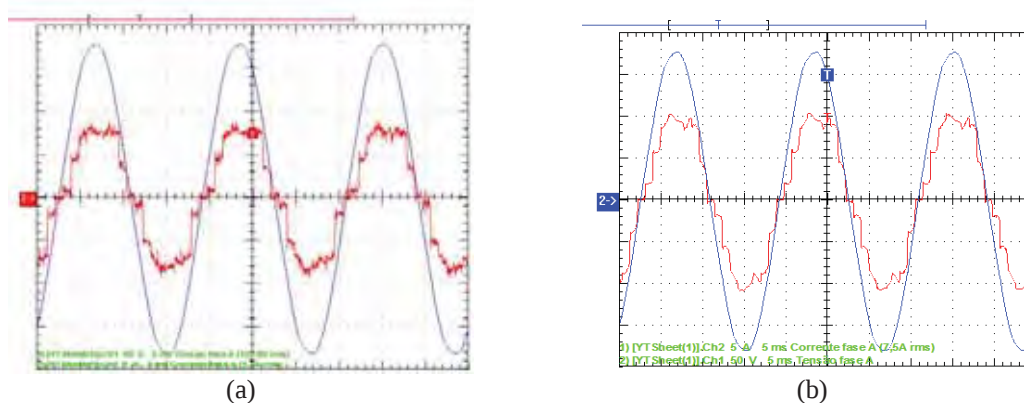
Figura 186 - Comparação entre inversor 2 mais retificador Delta e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.

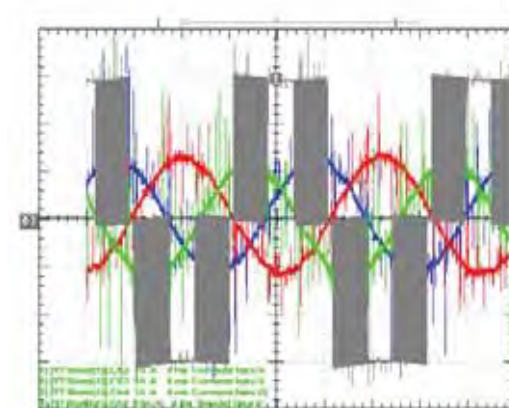


- **Topologia Estrela.**

A Figura 187 apresenta a corrente e a tensão em uma das fases da rede, nas Figuras 187 (a) e (b) observa-se a corrente para carga reduzida e a plena carga, já a Figura 187 (c) mostra a tensão e corrente no inversor. Estes resultados apresentam o bom funcionamento do inversor quando seu retificador foi substituído pelo retificador multipulso projetado.

Figura 187 - Corrente e tensão para o ensaio com inversor 2 e retificador com topologia Delta
(a) 20% carga, escalas 5ms/div, 1A/div, 50V/div (b) plena carga, escalas 5ms/div, 5A/div, 50V/div e (c) Correntes e tensão no inversor, escalas 4ms/div, 10A/div, 100V/div.





(c)

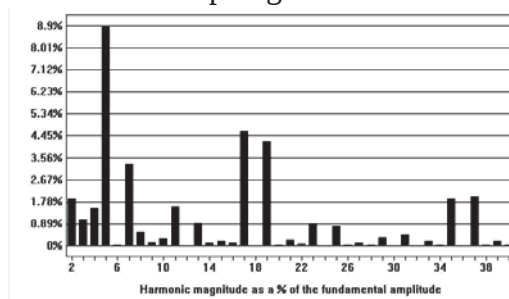
Fonte: Dados do autor.

Para o inversor 3, as correntes e tensão que alimentam o motor são apresentadas na Figura 187 (c). Como foi observado anteriormente o retificador proposto não altera as características de funcionamento do inversor apenas melhora a corrente drenada da rede de alimentação.

A Figura 188 apresenta o gráfico das correntes harmônicas em função da corrente fundamental para a fase A. Para as demais fases os resultados são semelhantes. Na Tabela 22 são apresentados resultados obtidos no ensaio a plena carga e a 20% da carga.

A Figura 189 apresenta uma comparação entre os componentes harmônicos existentes no sistema utilizando com retificador proposto e a norma IEC – 61000 – 3 – 2.

Figura 188 - Distorção harmônica total de corrente para o ensaio inversor 3 mais retificador com topologia Estrela.



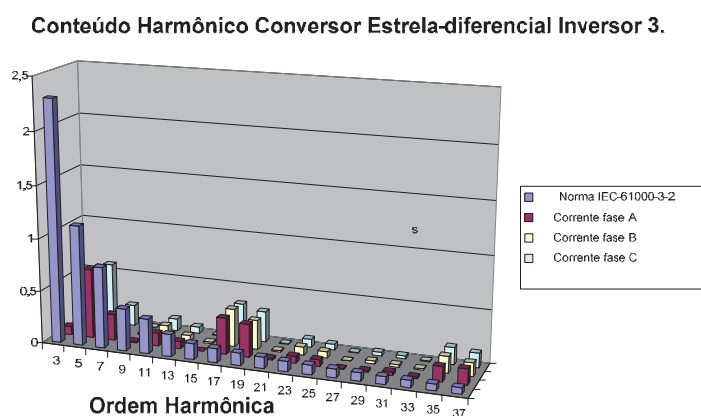
Fonte: Dados do autor.

Tabela 22 – Análise harmônica para o inversor 3 mais retificador Estrela.

Plena carga	Fase A (7,5 A)	Fase B (7,25 A)	Fase C (7,1 A)
DHT _v (%)	1,06	1,13	1,03
DHT _i (%)	12,3	12,28	12
FP	0,985	0,987	0,994
FD	0,994	0,995	0,995
20% carga	Fase A (1,2 A)	Fase B (1,2 A)	Fase C (1,2 A)
DHT _v (%)	1,11	1,26	1,05
DHT _i (%)	15,7	15,5	15,4
FP	0,964	0,981	0,983
FD	0,994	0,995	0,995

Fonte: dados do autor.

Figura 189 - Comparação entre inversor 3 mais retificador Estrela e a Norma IEC-61000-3-2 para harmônicas individuais de corrente.



7.7 CONCLUSÕES

O procedimento de projeto realizado para os retificadores apresentados seguem a metodologia descrita no capítulo 5 com o auxílio dos gráficos para peso do núcleo e do cobre apresentados. Foi possível escolher a configuração que apresentasse menor peso para a estrutura retificadora para esta aplicação específica.

Este capítulo apresentou os passos para a implementação de retificadores de 18 pulsos com conexão diferencial. Todos os dados necessários para a construção dos retificadores propostos foram apresentados, tais como: bitola de fio, tamanho do núcleo, número de espiras

entre outros. Assim, foram apresentados dois projetos, um para o retificador de 18 pulsos com topologia Delta e configuração C e outro para o retificador de 18 pulsos com topologia Estrela e configuração A. Os retificadores foram projetados para tensão de entrada de 127/220 V, frequência de 60 Hz, tensão média na saída de 315 V e potência de 2,5 kW.

Ensaio preliminares foram realizados com os retificadores com cargas independentes e com única carga. Comparando os dois casos, observa-se que a inclusão dos IPTs no ensaio com única carga influenciou na DHT_i e no rendimento dos retificadores. Em média a DHT_i foi de 8% sem IPTs e 11% com IPTs, além disso o rendimento caiu de 98% para 95%. Apesar disso, o rendimento continuou elevado e os retificadores ainda apresentam apenas suas harmônicas características ($K \cdot 18 \pm 1$) fora da norma IEC – 61000 – 3 – 2.

As formas de onda de corrente na rede de alimentação, obtidas nos ensaios com os três inversores comerciais, tradicionalmente usados em acionamentos elétricos, e aplicando os retificadores propostos como *retrofit*, mostram uma grande melhora nas mesmas, pois se assemelham à forma senoidal, logo apresenta baixa distorção harmônica total de corrente.

Comparando as respostas para os três inversores, quando foi realizada a substituição de seus retificadores convencionais pelos retificadores propostos, observou-se que os retificadores multipulsos apenas melhoraram a corrente na rede de alimentação e não influenciando no funcionamento dos inversores. Os ensaios mostraram que para todos os casos a DHT_i em média foi de 15%, o FP de 0,982 com 20% de carga e 12% para DHT_i , 0,989 a plena carga.

Foram obtidos também resultados quando uma reatância de entrada foi introduzida ao sistema. Esta reatância de entrada, também de uso comercial, foi adquirida para operar junto com o inversor 1. Comparando os pesos das estruturas, retificadores multipulsos e reatância de entrada, os retificadores propostos apresentaram pesos próximos de 5kg a reatância de entrada apresenta um peso de 2 kg. Com relação a DHT_i e ao FP utilizando apenas a reatância de entrada os valores encontrados foram 100% e 0,7 para 20% de carga e 50% e 0,89 a plena carga, respectivamente.

Conclui-se que houve uma melhora significativa DHT_i na rede e o FP foi elevado quando os retificadores propostos substituíram os sistemas retificadores dos inversores comerciais. A reatância de entrada é um método convencional para melhorar a qualidade de energia que o sistema proporciona a rede, apresenta cerca de 40% do peso dos retificadores propostos, porém se mostra bem menos eficaz com relação a redução de DHT_i e em elevar o FP.

Capítulo 8

8.1 CONCLUSÕES

Retificadores CA-CC de seis pulsos são largamente utilizados em inúmeras aplicações industriais. Eles geram elevada DHT_i e apresentam um pobre FP. Dentre as técnicas para correção do FP e eliminação do conteúdo harmônico os retificadores multipulsos são estruturas robustas e de elevada confiabilidade. Promovem uma grande redução na DHT_i e proporcionam um elevado FP ao sistema. Além disso, apresentam baixa ondulação de tensão na saída.

Uma das vantagens dos retificadores multipulsos é a não utilização de elementos chaveados. Assim, elimina problemas com interferências eletromagnéticas devido ao chaveamento em elevadas frequências e apresenta baixo nível de complexidade, pois não necessitam de técnicas de controle sofisticadas. Contudo, os retificadores multipulsos podem ser associados a conversores CC-CC chaveados para a regulação de tensão e eliminação de IPTs, reduzindo assim, o peso da estrutura e até mesmo para reduzir ainda mais o conteúdo harmônico na rede elétrica quando necessário.

Os retificadores multipulsos podem ser constituídos por transformadores isolados ou não-isolados. Retificadores não isolados apresentam menor peso e volume, tornando-se tornam mais atrativos para aplicações embarcadas. As topologias Estrela ou Delta-diferenciais generalizadas apresentam como vantagem o peso e volume reduzidos, além da possibilidade de escolha da tensão média na saída. Quando se pensa em *retrofit*, existe a necessidade da flexibilidade na obtenção da tensão de saída, assim, as topologias diferenciais generalizadas se apresentam como uma boa escolha.

Inúmeros trabalhos sobre retificadores multipulsos são apresentados na literatura, logo, a classificação dos mesmos, que foi apresentada no capítulo dois desta tese, é uma forma de reunir estes trabalhos.

Retificadores multipulsos são estruturas que ainda agregam muito peso e volume ao sistema a que são incorporados. Em estruturas multipulsos isoladas não é possível obter a redução destes parâmetros, porém, com a utilização dos autotransformadores essa redução no peso e volume torna-se possível.

A Tabela 2.1 apresentou a taxa kVA para inúmeras topologias de autotransformador, onde se destacam os retificadores de 12 pulsos com conexão Estrela-diferencial (menor taxa

kVA 21,3%) e o retificador de 18 pulsos com conexão Delta-diferencial (menor taxa kVA 16,9%).

A complexidade dos retificadores multipulsos está na conexão do transformador. O grande número de enrolamentos em retificadores com elevados números de pulsos dificultam a construção do transformador, porém, retificadores de 18 pulsos apresentam ótimos resultados relacionados à qualidade de energia e nível médio de complexidade na construção de sua estrutura.

Conexões diferenciais permitem a obtenção de retificadores de 12 e 18 pulsos através de diferentes configurações. Com o auxílio de análises matemáticas e diagramas fasoriais expressões generalizadas foram descritas para as diferentes configurações apresentadas. O equacionamento foi de grande importância para a geração de planilhas com valores para tensões e correntes em todos os enrolamentos do autotransformador e posteriormente a análise do peso nessas estruturas.

Apenas para uma das configurações Delta e Estrela foi realizada a unificação das equações de tensão e corrente. Este desenvolvimento teve por finalidade mostrar a possibilidade de se obter expressões únicas que reunissem ambas topologias. Com o equacionamento unificado torna fácil e rápido o projeto para retificadores com estas configurações. Com base neste equacionamento foi desenvolvido o programa MultiTrafo que apresenta formas de onda, valores de tensão, corrente, relações de espiras, FP, DHT_i, além, do projeto físico, tamanho de núcleo, bitola de fio, número de espiras para os retificadores de 12 e 18 pulsos com topologias Delta e Estrela, nas configurações A e C. O equacionamento unificado facilitou o desenvolvimento do programa, com equações simples e diretas para tensão e corrente.

Com base no equacionamento desenvolvido para as diferentes configurações, planilhas foram desenvolvidas, onde foram obtidos valores de tensão, corrente, taxa kVA, peso do núcleo, peso do cobre para as diferentes configurações das duas topologias estudadas. Através destas planilhas, gráficos foram obtidos para análises que buscassem critérios para a escolha da melhor topologia de retificador multipulso com conexão diferencial de transformador, a ser utilizada nas mais diversas aplicações.

Pode-se concluir desses gráficos que o peso do cobre apresenta-se constante e que a curva para o peso total do retificador segue o comportamento da curva do peso do núcleo e esta, por sua vez, apresenta o mesmo comportamento da curva para taxa kVA para uma potência fixa. Além disso, observou-se que para potências abaixo de 6 kW existem regiões onde o peso se iguala para os diferentes tamanhos de lâminas, porém, para potências ≥ 6 kW a

lâmina de 5 cm se torna a melhor opção para toda a faixa de relação de tensão, exceto quando a relação for igual a 1, neste caso o peso é praticamente o mesmo para os três tamanhos de lâminas.

Sendo o foco principal o estudo do peso das estruturas, deve-se lembrar que quando as pontes são colocadas em paralelo e são necessários elementos adicionais ,chamados IPTs. Estes elementos agregam peso e volume à estrutura, pois, são adicionados às saídas positiva e negativa em cada uma das pontes retificadoras no caso dos retificadores não-isolados, tornando-se muitas vezes mais pesados que os próprios autotransformadores.

Na etapa final do trabalho, foi realizada a análise e construção de dois retificadores de 18 pulsos, um com topologia Delta e outro Estrela, para a aplicação como *retrofit* em diferentes inversores de frequência comerciais. Com o auxílio das análises para peso realizadas em capítulos anteriores, foram escolhidas as configurações A e C para a tensão média na saída desejada. Resultados de simulação comprovaram os resultados apresentados pelo programa MultiTrafo. Além disso, as formas de onda validam a operação do conversor como um mitigador de harmônicos. É fácil observar que a corrente na rede de alimentação não é mais pulsada, corrente característica de um conversor de seis pulsos, mas apresenta uma forma de onda mais próxima da senoidal.

Dos resultados obtidos, conclui-se que os retificadores multipulsos, apesar de melhorarem efetivamente a DHT_i , ainda não se enquadram totalmente a norma internacional IEC-61000-3-2, existindo ainda as componentes harmônicas características de cada retificador, este problema, porém, poderia ser resolvido adicionando filtros sintonizados ou um filtro passa baixa ao sistema.

Foram projetados e implementados dois retificadores de 18 pulsos um com topologia Delta e configuração C e outro com topologia Estrela e configuração A. Os retificadores foram projetados para tensão de entrada de 127/220 V, frequência de 60 Hz, tensão média na saída de 315 V e potência de 2,5 kW.

Os resultados experimentais mostraram que os retificadores apresentam bom rendimento, atingindo 97% com pontes independentes e 95% com pontes em paralelo.

Com relação a DHT_i para os dois retificadores foi obtido 8% para pontes independentes e 11% para pontes em paralelo. Observou-se uma influência dos IPTs na DHT_i . Apesar deste aumento, apenas as componentes harmônicas características destes retificadores ainda não se enquadram a norma.

Quando os retificadores foram incorporados ao sistema, alimentando a ponte inversora nos inversores de frequência, foi possível comprovar uma grande melhora na forma de onda

da corrente de entrada quando comparada com a corrente obtida quando a ponte inversora era alimentada pela ponte retificadora de seis pulsos existente no inversor.

Os três inversores apresentaram respostas semelhantes, não houve nenhuma alteração com relação ao funcionamento dos mesmos, apenas significativas e visíveis melhoras com relação à qualidade da energia na rede elétrica. Os ensaios mostraram que para todos os casos a DHT_i em média foi de 15%, o FP de 0,982 com 20% carga e 12% para DHT_i , 0,989 a plena carga.

Com o intuito de obter resultados comparativos foram realizados ensaios com o inversor 1, sem o *retrofit*, com reatância de entrada e com *retrofit*. Resultados apenas utilizando o inversor, sem a substituição da ponte convencional mostram que a DHT_i foi muito elevada cerca de 130% e FP muito baixo 0,64. Quando a reatância de entrada foi incorporada ao sistema a DHT_i diminuiu para 50% e o FP aumentou para 0,89. Porém, quando a ponte de seis pulsos foi substituída por um dos retificadores multipulsos, a DHT_i foi em média de 12% e FP de 0,989, todos os ensaios foram realizados a plena carga.

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que os retificadores propostos proporcionaram uma melhora significativa com relação à DHT_i e o FP. Apesar de apresentar melhoras quando a reatância de entrada foi utilizada os resultados para DHT_i ainda foram elevados e o FP baixo. Além disso, os retificadores propostos apresentam pesos próximos da reatância de entrada e melhores resultados com relação à qualidade de energia na rede elétrica.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros propõem-se a continuidade no desenvolvimento do software, estendendo-o para as demais configurações das topologias Estrela e Delta, a fim de torná-lo completo e disponibilizá-lo para a utilização em aulas da graduação e pós.

Estudar a possibilidade de serem adicionados filtros ao sistema, assim como as vantagens e desvantagens que estes elementos adicionais gerariam ao sistema.

Utilizar diferentes técnicas para otimização do peso, volume e custo das estruturas multipulsos.

Adicionar ao sistema estágios CC-CC para diferentes finalidades, regulação de tensão, eliminação de IPTs, isolamento em alta frequência e melhora na qualidade de energia. Estes estágios poderiam ser conversores *boost*, SEPIC, *full-bridge*, *push-pull* conectados às saídas

retificadoras, a fim de, analisar as vantagens e desvantagens de cada uma delas em especial o conversor SEPIC.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-61000-3-2:** Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current up to and including 16A . Geneva, 1998.
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE-519:** Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. New York, 1992.
- [3] BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST:** qualidade de energia. Brasília, 2008. (Módulo 8). Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 19 jun. 2008.
- [4] FREITAS, L. C. G. et al. Programmable PFC based hybrid multipulse rectifier for ultra clean power application. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 21, n. 4, p. 959-966, 2006.
- [5] FREITAS, L. C. G. et al. Performance evaluation of a novel hybrid multipulse rectifier for utility interface of power electronic converter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 54, n. 6, p. 3030-3041, 2007.
- [6] FREITAS, L. C. G. A. et al. Programmable PFC based hybrid multipulse power rectifier with sinusoidal input line current imposed by digital controller. In: **APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE – APEC**, 22., 2007, Anaheim. **Proceedings...** Anaheim: IEEE, 2007. p. 1356-1361.
- [7] SOARES, J. O.; CANESIN, C. A.; FREITAS, L. C. A true programmable HPF hybrid three-phase rectifier. In: **POWER ELECTRONICS SPECIALIST CONFERENCE – PESC**, 39., 2008, Rhodes. **Proceedings...** Rhodes: IEEE, 2008. p. 3843-3849.
- [8] FREITAS, L. C. G. et al. Multipulse power rectifier without using multiphase transformers. In: **INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY – IECON**, 31., 2005, Raleigh. **Proceedings...** Raleigh: IEEE, 2005. p. 519-524.
- [9] FREITAS, L. C. G. et al. Proposal of hybrid rectifier structure with HPF and low THD suitable for front-end trolleybuses system supplied by AC distribution networks. In: **ENERGY CONVERSION CONGRESS AN EXPOSITION – ECCE**, 1., 2009, San Jose. **Proceedings...** San Jose: IEEE, 2009. p. 451-458.
- [10] FONT, C. H. I.; BARBI, I. A new high power factor bidirectional hybrid three-phase rectifier. In: **APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION – APEC**, 1., 2006, Dallas. **Proceedings...** Dallas: IEEE, 2006. p. 1300-1306.
- [11] NUSSBAUMER, T.; KOLAR, J. W. Improving mains current quality for three-phase three-switch buck-type PWM rectifier. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 21, n. 4, p. 967-973, 2006.

- [12] LEE, B. S. et al. A robust three-phase active power-factor-correction and harmonic reduction for high power. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 46, n. 3, p. 483-494, 1999.
- [13] PIRES, V. F.; SILVA, J. F. Three-phase single-stage four-switch PFC buck-boost type rectifier. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 52, n. 2, p. 444-453, 2005.
- [14] KALPANA, R.; SINGH, B.; BHUVANESWARI, G. A 12 kW three –phase modular converter with unity power factor for telecom power supplies. In: POWER ELECTRONICS INDIA INTERNATIONAL CONFERENCE ON – IICPE, 2., 2011, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: IEEE, 2011. p. 1-7.
- [15] CHOI, S.; BAE, Y. A new unity power factor telecom rectifier system by active wave shaping technique. In: INDUSTRY APPLICATION CONFERENCE – IAS, 1.2005, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: IEEE, 2005. p. 918-922.
- [16] CHOI, S. A Three-phase unity power factor diode rectifier with active input current shaping. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 52, n. 6, p. 1711-1714, 2006.
- [17] ASHIDA, I.; ITOH, J-I. A novel three-phase pfc rectifier using a harmonic current injection method. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 23, n. 2, p. 715-722, 2007.
- [18] KAMNARN, U.; CHUNGKAG, V. Analysis and design of a modular three-phase AC-to-DC converter using CUK rectifier module with nearly unity power factor and fast dynamic response. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 24, n. 8, p. 2000-2012, 2009.
- [19] SINGH, B. et al. A review of three phase improved power quality AC-DC converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 51, n. 3, p. 641-660, 2004.
- [20] PAICE, D. A. **Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power**. New York: IEEE, 1996. 202 p.
- [21] SINGH, B. et al. Multipulse AC/DC converters for improving power quality: a review. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 23, n. 1, p. 260-281, 2008.
- [22] SEIXAS, F. J. M.; OLIVEIRA, P. S.; GONÇALVES, V. A. A. Utilização da conexão zigzag de transformadores em retificadores de múltiplos pulsos. In: WORLD CONGRESS IN COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION - WCCSETE, 1., 2006, Santos. **Proceedings...** Santos: COPEC, 2006. p. 1131-1136.

- [23] GUARIZZO, E. O.; SEIXAS, F. J. M.; OLIVEIRA, P. S. Análise do retificador de 12 pulsos utilizando a conexão polígono de transformadores. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 14., 2006, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: p. 1-7. 1 CD-ROOM.
- [24] OLIVEIRA, P. S.; SEIXAS, F. J. M. Associações de retificadores multipulsos com conexão zigzag. In: INTERNATIONAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION - INTERTECH, 10., 2008, Santos. **Proceedings...** Santos: COPEC, 2008. p. 508-512.
- [25] MORÁN, L; DIXON, J. Active power filters. In: _____. **Power electronics handbook**. Maryland Heights: Academic Press, 2007. p. 1067-1101.
- [26] EL-KHOLY, E. E. Three-phase active power filter based on current controlled source inverter. **International Journal of Electric Power & Energy System**, Amsterdam, v. 28, n. 8, p. 537-547, 2006.
- [27] ADELSALAM, A. K. et al. Comparative study of AC side passive and active filters for medium voltage PWM current source rectifier. In: POWER ELECTRONICS MACHINE AND DRIVES - PEMD, 4., 2008, York. **Proceeding...** York: IEEE, 2008. p. 578 - 582.
- [28] RIBEIRO, E. R. **Filtros ativos série para a compensação de harmônicas de tensão**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [29] EID, A. et al. Active power filters for harmonic cancelation in conventional and advanced aircraft electric power systems. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 79, n. 1, p. 80-88, 2009.
- [30] LIN, B.-R.; YANG, B.-R.; TSAI H.-R. Analysis and operation of hybrid active filter for harmonic elimination. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 62, n. 3, p. 191-200, 2002.
- [31] SEIXAS, F. J. M.; BARBI, I. A robust 12kW three-phase rectifier using a 18-pulse autotransformer and isolated DC-DC converters. In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE - COBEP, 6., 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SOBRAEP, 2001. p. 686-691.
- [32] SEIXAS, F. J. M.; BARBI, I. A 12 kW three-phase low THD rectifier with high-frequency isolation and regulated DC output. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 19, n. 2, p. 371-377, 2004.
- [33] SEIXAS, F. J. M.; BARBI, I. A new three-phase low THD power supply with high-frequency isolation and 60V/200A regulated DC output. In: POWER ELECTRONICS SPECIALIST CONFERENCE – PESC, 32., 2001, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, 2001. p. 1629-1634.

- [34] SEIXAS, F. J. M. **Conversores CA-CC de 12 kW com elevado fator de potência utilizando autotransformador com conexão diferencial de múltiplos pulsos**. 2001. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2001.
- [35] SEIXAS, F. J. M.; BARBI, I. A new 12 kW three-phase 18-pulse high power factor AC-DC converter with regulated output voltage for rectifier units. In: TELECOMMUNICATION ENERGY CONFERENCE - INTELEC, 21., 1999, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen: IEEE, 1999. p. 1-8.
- [36] BADIN, A. A.; BARBI, I. Unity power factor isolated three-phase rectifier with split DC-bus based on the scott transformer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 23, n. 3, p. 1278-1287, 2008.
- [37] RENDUSARA, D. A. et al. A. Design considerations for 12-pulse diode rectifier system operating under voltage unbalanced and pre-existing voltage distortion with some corrective measures. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 32, n. 6, p. 1293-1303, 1996.
- [38] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. Harmonic mitigation using 12 – pulse AC-DC converter in vector – controlled induction motor drives. **IEEE Transactions Power Delivery**, New York, v. 21, n. 3, p. 1483-1492, 2006.
- [39] KAMATH, G. R.; RUNJAN, B.; WOOD, R. A compact autotransformer based 12 pulse rectifier circuit. In: INDUSTRY ELECTRONIC SOCIETY CONFERENCE - IECON, 27., 2001, Denver. **Proceedings...** Denver: IEEE, 2001. p. 1344-1349.
- [40] SINGH, B. et al. Power quality improvements in isolated twelve – pulse AC-DC converters using delta/ double polygon transformer. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE – PESC, 27., 2007, Orlando. **Proceedings...** Orlando: IEEE, 2007. p. 2848-2853.
- [41] CHOI, S.; ENJETI, P.N.; PITEL, I. J. Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 11, n. 6, p. 680-690, 1996.
- [42] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. A novel polygon-based 18-pulse AC-DC converter for vector controlled induction motor drives. **IEEE Transactions. on Power Electronics**, New York, v. 22, n. 2, p. 488-497, 2007.
- [43] SINGH, B.; GARG, V. Scott-connected autotransformer based multipulse AC-DC converters for power quality improvement in vector controlled induction motor drives. In: POWER ELECTRONICS AND DRIVES SYSTEMS – PEDS, 5., 2005, Malaysia. **Proceedings...** Malaysia: IEEE, 2005. p. 1491-1496.
- [44] SIBGH, B.; GARG, V.; BHUVANESWARI, G. A novel t-connected autotransformer-based 18-pulse converter for harmonic mitigation in adjustable induction motor drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 54, n. 5, p. 2500-2511, 2007.

- [45] SIBGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. An 18 - pulse converter for power quality improvement in vector controlled induction motor drives. In: INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATION CONFERENCE - ICIEA, 1., 2006, Singapore. **Proceedings...** Singapore: IEEE, 2006. p. 1-6.
- [46] KAMATH, G. R.; BENSON, D.; WOOD, R. A novel autotransformer based 18 pulse rectifier circuit. In: APPLIED ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 14., 2002, Dallas. **Proceedings...** Dallas: IEEE, 2002. p. 795-801.
- [47] OGUCHI, K. Autotransformer – based 18 – pulse rectifiers without using DC – side interphase transformers: classification and comparison. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL DRIVES, AUTOMATION AND MOTION - SPEEDAM, 19., 2008, Ischia. **Proceedings...** Ischia: IEEE, 2008. p. 760-765.
- [48] BURGOS, P.; UAN-ZO-LI, A.; LAUCAUX, F. et al. New step-up and step-down 18-pulse direct asymmetric autotransformer rectifier units. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE – PESC, 36., 2005, Recife. **Proceedings...** Recife: IEEE, 2005. p. 1149-1155.
- [49] LEE, S.; ENJETI, P. N.; PITEL, I. J. An optimized active interphase transformer for auto-connected 12-pulse rectifiers results in clean input power. In: APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION – APEC, 5., 1997, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: IEEE, 1997. p. 666-671.
- [50] SEFA, I.; ALTIN, N. A novel approach to determine the interphase transformer inductance of 18 pulse rectifier. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 50, n. 10, p. 2495-2503, 2009.
- [51] BHIDE, R. S.; KULKAMI, S. V. Analysis of parallel operation of converters with interphase transformer. In: INDIA INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS - IICPE, 2., 2006, Chennai. **Proceedings...** Chennai: IEEE, 2006. p. 193-196.
- [52] SCHAEFER, J. **Rectifier circuits: theory and design**. Norwalk: John Wiley and Sons, 1965. 335 p.
- [53] SUN, J. Small – signal modeling of multipulse rectifier for more – electric aircraft applications. In: POWER ELECTRONICS SPECIALIST CONFERENCE – PESC, 39., 2008, Rhodes. **Proceedings...** Rhodes: IEEE, 2008. p. 302-308.
- [54] GONÇALVES, V. A. **Redução de harmônicos de corrente em retificadores de múltiplos pulsos – generalização das conexões diferenciais**. 2006. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2006.
- [55] FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, P. S.; SEIXAS, F. J. M. A family of autoconnected transformers for 12-and 18 – pulse converters – generalization for delta and wye. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 26, n. 7, p. 2065-2068, 2011.

- [56] OLIVEIRA, P. S.; FERNANDES, R. C.; SEIXAS, F. J. M. Família de retificadores multipulsos com topologias diferenciais de transformadores. **Revista SBA - Controle & Automação**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 23-28, 2011.
- [57] GONÇALVES, V. A.; SEIXAS, F. J. M. Generalization of the y-differential autotransformer. **Electric Power System Research**, Amsterdam, v. 72, n. 5, p. 271-394, 2006.
- [58] SEIXAS, F. J. M.; GONÇALVES, V. A. Generalization of the delta-differential autotransformer for 12 and 18-pulse converters. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE - PESC, 36., 2005, Recife. **Proceedings...** Recife: IEEE, 2005. p. 460-466.
- [59] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. Multipulse improved – power – quality AC – DC convertors for vector – controlled induction – motor drives. **IEE Electric Power Applications**, New York, v. 153, n. 1, p. 88-96, 2006.
- [60] RENDUSARA, D. Design considerations for 12/24 pulse auto-connected rectifiers for large VA, PWM drive systems. In: APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION – APEC, 7., 1999, Dallas. **Proceedings...** Dallas: IEEE, 1999. p. 903-909.
- [61] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. Pulse multiplication in AC - DC converters for harmonics mitigation in vector controlled induction motor drives. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, New York, v. 21, n. 2, p.342 – 352, 2006.
- [62] LEE, B. S.; ENJETI, P. N.; PITEL, I. A new 24 pulse diode rectifier system for Ac motor drives provides clean power utility interface with low KVA components. In: INDUSTRY APPLICATION CONFERENCE, 31., 1996, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 1996. p. 1024-1031.
- [63] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. et al. K. A tapped delta autotransformer based 24 – pulse AC – DC converter for variable frequency induction motor drives. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS – ISIE, 5., 2006, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IEEE, 2006. p. 2046-2051.
- [64] SINGH, B.; GAIROLA, S. A Fork connected auto-transformer-based 24-pulse AC-DC converter. In: INDIA INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS – CPE, 2., 2006, Chennai. **Proceedings...** Chennai: IEEE, 2006. p. 183-187.
- [65] SINGH, B.; BHUVANESWARI, G.; GARG, V. T. Connected autotransformer-based 24-pulse AC-DC converter for variable frequency induction motor drives. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New York, v. 21, n. 3, p. 663-672, 2006.
- [66] MASLIN, A. J.; SHARON; JONES, G. F. **Electrical induction apparatus**. US Patent 2 307 527, 5. Jan. 1943.

- [67] CHOI, S.; LEE, B. S.; ENJETI, P. N. New 24-pulse rectifier systems for utility interface of high-power AC motor drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 33, n. 2, p. 531-541, 1997.
- [68] OLIVER, G. et al. Novel transformer connection to improve current sharing in high - current DC rectifier. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 31, n. 1, p.127-133, 2005.
- [69] SINGH B. et al. Star connected autotransformer based 30 pulses AC - DC converter for power quality improvement in vector controlled induction motor drives. In: POWER INDIA CONFERENCE, 1., 2006, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: IEEE, 2006. p. 1-6.
- [70] SINGH, B.; GARG, V.; BHUVANESWARI, G. An improved power quality 30 – pulse AC – DC for varying loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 22, n. 2, p. 1179-1187, 2007.
- [71] SINGH, B.; GAIROLA, S. Design and developed of a 36 – pulse AC – DC converter for vector controlled induction motor drive. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND DRIVES SYSTEMS - PEDS, 7., 2007, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok: IEEE, 2007. p. 694-701.
- [72] SINGH, B.; GARG, V.; BHUVANESWARI, G. Autotransformer based nine – phase AC – DC converter for harmonic mitigation in induction motor drives, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONIC - ISIE, 5., 2006, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IEEE, 2006. p. 2439-2444.
- [73] OGUCHI, K.; KUBOTA, T.; HOSHI, N. Asymmetrical nine – phase step – up/down diode rectifier with 18 – step input currents, In: INDUSTRY APPLICATION - IAS, 40., 2005, Hong Kong. **Proceedings...** Kong Kong: IEEE, 2005. p. 177-184.
- [74] SINGH, B.; GARG, V.; BHUVANESWARI, G. Power quality improvements using delta – polygon connected autotransformer based nine – phase AC – DC converter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY TECHNOGY – ICIT, 8., 2006, Mumbai. **Proceedings...** Mumbai: IEEE, 2006. p. 2719-2724.
- [75] SINGH, B.; GARG, V.; BHUVANESWARI, G. Polygon connected 15 – phase AC – DC converter for power quality improvement, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, DRIVES AND ENERGY SYSTEMS – PEDS, 6., 2006, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: IEEE, 2006. p. 1-5.
- [76] FERNANDES, R. C. **Retificador trifásico de 18 pulsos com estágio CC controlado por histerese constante**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- [77] OLIVEIRA, P. S. et al. Aplicativo para projeto e simulação de retificadores multipulsos utilizando a linguagem de programação. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING EDUCATION - IGIP, 40., 2011, Santos. **Proceedings...** Santos: COPEC, 2011. p. 687-691.

- [78] OLIVEIRA, P. S.; SEIXAS, F. J. M.; FERNANDES, R. C. Otimização dos retificadores multipulsos com conexão delta – diferencial. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION – ICECE, 6., 2009, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: COPEC, 2009. p. 738-742.
- [79] OLIVEIRA, P. S.; SEIXAS, F. J. M.; FERNANDES, R. C. Otimização dos retificadores multipulsos com conexão Y – diferencial. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION – ICECE, 6., 2009, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: COPEC, 2009. p. 743-747.
- [80] OLIVEIRA, P. S.; SEIXAS, F. J. M.; FERNANDES, R. C. Optimization of multipulse converters with delta and Y – differential connections. In: POWER ELECTRONICS CONFERENCE - COBEP, 10., 2009, Bonito. **Anais...** Bonito: SOBRAEP, 2009. p. 901-907.
- [81] MCLYMAN, W. C. **Transformer and inductor design handbook**. New York: Marcel Bekken and Basel, 1988. 422 p.
- [82] MCLYMAN, W. C. **High reliability magnetic devices design and fabrication**. New York: Marcel Bekken and Basel, 2002. 522 p.
- [83] WEG AUTOMAÇÃO. **CFW08 vector inverter**: manual usuário. Jaraguá do Sul, 2000. 206 p. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/Inversor-de-Frequencia-CFW-08>>. Acesso em: 15 set. 2010.
- [84] WEG AUTOMAÇÃO. **CFW09 frequency inverter**: manual usuário. Jaraguá do Sul, 2000. 359 p. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/Inversor-de-Frequencia-CFW-09>>. Acesso em: 15 set. 2010.
- [85] SIEMENS. **Micromaster**: parameters list. Munich, 2006. 196 p. Disponível em: <<http://www.automation.siemens.com/mcms/standard-drives/en/low-voltage-inverter/micromaster-4/micromaster-420/Pages/micromaster-420.aspx>>. Acesso em: 17 set. 2010.
- [86] SIEMENS. **Micromaster 420**: operating instructions. Munich, 2006. 30 p. Disponível em: <<http://www.automation.siemens.com/mcms/standard-drives/en/low-voltage-inverter/micromaster-4/micromaster-420/Pages/micromaster-420.aspx>>. Acesso em: 17 set. 2010.