

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA

**ESTUDO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MULTIPULSOS DE
ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA E REDUZIDA
DISTRORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE NO
CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.**

ELCIO PARREIRA DE FREITAS

ORIENTADOR: MARCO AURÉLIO GONÇALVES DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM – 258A/06

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA**

**ESTUDO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MULTIPULSOS DE
ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA E REDUZIDA DISTORÇÃO
HARMÔNICA DE CORRENTE NO CONTEXTO DA QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA.**

ELCIO PARREIRA DE FREITAS

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DE REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADO POR:

**Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Luiz Carlos de Freitas, Dr. (UFU)
(Examinador Externo)**

**Prof. Ivan Camargo, Dr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)**

BRASÍLIA, 05 DE MAIO DE 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

FREITAS, ELCIO PARREIRA DE

Estudo do Retificador Híbrido Multipulsos de Elevado Fator de Potência e Reduzida Distorção Harmônica de Corrente no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. [Distrito Federal] 2006.

xvii, 117p., 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Retificador Híbrido

2. Retificador Multipulsos

3. Correção de Fator de Potência

4. Distorção Harmônica.

I. ENE/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREITAS, E. P. (2006). Estudo do Retificador Híbrido Multipulsos de Elevado Fator de Potência e Reduzida Distorção Harmônica de Corrente no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, publicação PPGENE.DM-258A/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, DF, 117p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Elcio Parreira Freitas.

TÍTULO: Estudo do Retificador Híbrido Multipulsos de Elevado Fator de Potência e Reduzida Distorção Harmônica de Corrente no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.

GRAU: Mestre

ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Elcio Parreira Freitas
SQN 114 Bloco D, Apto 306, Asa Norte.
70.764-040 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que me apoiou em todos os momentos dessa jornada, abrindo mão de momentos de nosso convívio, dividindo o nosso tempo entre o desempenho das atividades profissionais e o mestrado. Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, em especial ao meu orientador Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, aos meus colegas do curso de Mestrado que me ajudaram a trilhar esse caminho difícil. Agradeço em especial à minha esposa que me apoiou e incentivou em todos os momentos, até que pudéssemos chegar a esse momento que compartilhamos juntos.

DEDICATÓRIA

Ofereço aos meus pais (in memoriam) que dedicaram toda sua vida à educação e à formação de seus filhos, superando as dificuldades para que pudéssemos concluir a nossa jornada.

RESUMO

ESTUDO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MULTIPULSOS DE ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA E REDUZIDA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.

Autor: Elcio Parreira de Freitas

Orientador: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, abril de 2006.

Sistemas de energia têm sido bastante afetados pelo aumento da utilização das cargas não-lineares nos sistemas de distribuição. Essas cargas são alimentadas por estruturas retificadoras que injetam conteúdos harmônicos em toda a rede. Quando se trata de cargas de potências mais elevadas, os retificadores de 12-pulsos e seus múltiplos são as melhores alternativas para a redução das distorções harmônicas da corrente de entrada, por garantirem um bom desempenho do conjunto retificador.

Vários estudos apresentam diversas estruturas que garantem um bom desempenho. Entretanto, isso só é possível através do uso de transformadores desfasadores e transformadores de interfase (IPT's). Essas estruturas apresentam grande robustez, mas, em contrapartida, apresentam um custo bastante elevado, limitando seu uso para aplicações em potências mais elevadas.

A tese de doutorado [Gomes, 2006] propõe uma inovadora topologia, onde a estrutura do retificador é composta por um retificador trifásico de 6-pulsos não-controlado convencional, associado a 03 retificadores monofásicos controlados. Os retificadores controlados são capazes de impor uma forma de onda de corrente de entrada, fazendo a composição dos 12-pulsos ou mais, garantindo a redução da DHT_1 na corrente de entrada e um elevado fator de potência, assim como nos retificadores de 12-pulsos convencionais, porém, sem a necessidade da utilização dos transformadores de interfase (IPT's) e transformadores desfasadores, proporcionando uma redução de 20% a 30% no custo final do retificador.

A estrutura retificadora proposta apresenta um custo bastante reduzido, pois os retificadores de 6-pulsos não-controlados convencionais processam entre 50% e 80% da

potencia total de saída, dependo da DHT_I desejada da corrente de entrada, tornando a sua estrutura robusta e bastante reduzida.

Esse trabalho vem colaborar com essa idéia inovadora, analisando o comportamento do retificador no contexto da qualidade da energia. Seus efeitos na rede quanto ao atendimento às normas e recomendações de distorção harmônica, bem como o seu comportamento diante distorções preexistentes na própria fonte de alimentação.

Essa dissertação de mestrado propõe estudar o retificador híbrido, o impacto que causa à rede, quais os benefícios em relação aos Retificadores Multipulsos convencionais, bem como qual a melhor forma de modelar a corrente para obter a potência desejada, com o menor nível de distorção harmônica da corrente de entrada. Para isso, a presente dissertação apresenta procedimentos que visam à implementação computacional desses modelos, utilizando o programa de simulação *SPICE* para avaliar o desempenho do retificador proposto no contexto da qualidade da energia. Depois de concluída a fase de simulações, um protótipo de 6 kW foi montado no laboratório, visando validar os resultados das simulações.

ABSTRACT

STUDY OF THE HYBRID RECTIFIER MULTIPULSOS DE HIGHT FACTOR OF POWER AND REDUCED HARMONIC DISTORTION OF TENSION IN THE CONTEXT OF THE QUALITY OF THE ENERGY.

Author: Elcio Parreira de Freitas

Supervisor: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira.

Program of After-graduation in Electric Engineering.

Brasilia, month of April of 2006.

Systems of energy have been sufficiently affected for the increase of the use of nonlinear loads in the distribution systems. These loads are fed by rectifying structures that inject harmonic contents in all the net. When one is about loads of raised powers more, the rectifiers of 12-pulses and its multiples are the best alternatives for the reduction of the harmonic distortions of the entrance chain, for guaranteeing a good performance of the rectifying set.

Some studies present diverse structures that guarantee a good performance, however, this is only possible through the use of balancing transformer and interphase transformer of (IPT's). These structures present great robustness, but, on the other hand present a sufficiently high cost, limiting its use for applications in raised powers more.

A thesis of doctored [Gomes, 2006] considers an innovative topology, where the structure of the rectifier is composed for conventional an three-phase rectifier of 6-pulses not-controlled, associate the 03 controlled single-phase rectifiers. The controlled rectifiers are capable to more impose a form of entrance chain wave, making the composition of the 12-pulses or, guaranteeing the reduction of the DHT_I in the chain of entrance and one raised power factor, as well as in the rectifiers of conventional 12-pulses, however, without the necessity of the use of transforming of interphase (IPT' s) and the transforming defasadores, providing a 20% reduction 30% in the final cost of the rectifier.

The rectifying structure proposal presents a sufficiently reduced cost, therefore the rectifiers of 6-pulses not controlled conventional process between 50% and 80% of harness exit total, depend on the desired DHT_I of the entrance chain, becoming its robust structure and sufficiently reduced.

This work of comes to collaborate with this innovative idea, analyzing the behavior of the rectifier in the context of the quality of the energy. Its effect in the net how much to the attendance to the norms and recommendations of harmonic distortion, as well as its behavior ahead preexisting distortions in the proper source of feeding.

This work considers to study the hybrid rectifier, the impact that cause to the net, which the benefits in relation to conventional the Multipulsos Rectifiers, as well as which the best shape form of the chain to get the desired power, with the lesser level of harmonic distortion of the entrance chain. For this, the present work presents procedures that they aim at to the computational implementation of these models, using the program of simulation SPICE to evaluate the performance of the rectifier considered in the context of the quality of the energy. After concluded the simulation phase, an archetype of 6 kW was mounted in the laboratory, aiming at to validate the results of the simulations.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	INTRODUÇÃO	6
2.2	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	8
2.3	NORMAS E RECOMENDAÇÕES	10
2.4	SOLUÇÕES POSSÍVEIS	15
2.4.1	Técnicas passivas	15
2.4.1.1	Retificador trifásico com filtro indutivo no lado CA.....	16
2.4.1.2	Retificador trifásico com filtro indutivo no lado CC.....	17
2.4.2	Técnicas ativas	18
2.4.2.1	Retificadores trifásicos não-controlados associados a conversor CC-CC.	18
2.4.2.2	Retificador trifásico controlado a tiristor.....	19
2.4.2.3	Retificadores PWM.....	20
2.4.2.4	Retificadores multipulsos.....	23
2.4.2.5	Retificadores trifásicos híbridos.....	28
2.5	SOLUÇÃO ADOTADA	29
2.6	A DESENVOLVER.....	31
3.	ESTUDO DO RETIFICADOR	32
3.1	DESCRIÇÃO DO LABORATÓRIO.....	32
3.2	DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	35
3.2.1	Retificador de 6-pulsos não-controlados em ponte de Graetz.....	37
3.2.2	Retificadores controlados.	37
3.2.3	Estratégia de Controle.	38
3.2.4	Transformador	43
3.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	43
3.4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	50
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
4.1	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	54
4.1.1	Caso 00 – Base – Tensão puramente senoidal.....	54
4.1.2	Caso 01 – Tensão com 5% de distorção na 5ª harmônica.....	56
4.1.3	Caso 02 – Tensão com 10% de distorção na 5ª harmônica.....	58
4.1.4	Caso 03 – Tensão com 5% de distorção na 7ª harmônica.....	60

4.1.5 Caso 04 – Tensão com 10% de distorção na 7ª harmônica.....	61
4.1.6 Caso 05 – Tensão com 5% de distorção na 11ª harmônica.....	63
4.1.7 Caso 06 – Tensão com 10% de distorção na 11ª harmônica.....	65
4.1.8 Caso 07 – Tensão com 5% de distorção na 13ª harmônica.....	66
4.1.9 Caso 08 – Tensão com 10% de distorção na 13ª harmônica.....	68
4.1.10 Caso 09 – Tensão com 5% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.....	70
4.1.11 Caso 10 – Tensão com 10% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.....	71
4.1.12 CONCLUSÃO	73
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	73
4.2.1 Caso 00 – Base – Tensão puramente senoidal.....	74
4.2.2 Caso 01 – Tensão com 5% de distorção na 5ª harmônica.....	75
4.2.3 Caso 02 – Tensão com 10% de distorção na 5ª harmônica.....	76
4.2.4 Caso 03 – Tensão com 5% de distorção na 7ª harmônica.....	77
4.2.5 Caso 04 – Tensão com 10% de distorção na 7ª harmônica.....	78
4.2.6 Caso 05 – Tensão com 5% de distorção na 11ª harmônica.....	79
4.2.7 Caso 06 – Tensão com 10% de distorção na 11ª harmônica.....	80
4.2.8 Caso 07 – Tensão com 5% de distorção na 13ª harmônica.....	81
4.2.9 Caso 08 – Tensão com 10% de distorção na 13ª harmônica.....	82
4.2.10 Caso 09 – Tensão com 5% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.....	83
4.2.11 Caso 10 – Tensão com 10% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.....	84
4.2.12 CONCLUSÃO	85
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA	85
5. CONCLUSÕES.....	92
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	95

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 – Níveis de tensões harmônicas para sistemas de potência de baixa e média tensão (expressos como porcentagem da tensão nominal).
- Tabela 2.2 – Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal.
- Tabela 2.3 – Classificação e Limites de Distorção de Tensão Para Consumidores Individuais (Sistemas de Baixa Tensão)
- Tabela 2.4 – Limites de distorção harmônica de corrente (I_h) em % de IL.
- Tabela 2.5 – Base para determinação dos limites de distorção harmônica de corrente.
- Tabela 2.6 – limites da IEC-61000-3-4 – Distorção harmônica de corrente.
- Tabela 3.1 – Dados do RHM ajustados para as simulações.
- Tabela 3.2 – Casos Estudados na Simulação e Ensaio Experimental.
- Tabela 3.3 – Parâmetros ajustados do protótipo do RHM.
- Tabela 4.1 – Gráficos das DHT_l das correntes de entrada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito com Carga não-linear.....	5
Figura 2.2 – Carga não-linear – Curva da Tensão.....	6
Figura 2.3 – Carga não-linear – Curva da Corrente.....	6
Figura 2.4 – Corrente x Tensão.....	6
Figura 2.5 – Retificador Trifásico em Ponte de Graetz.....	8
Figura 2.6 – Tensão e Corrente na entrada do Retificador Trifásico em Ponte de Graetz.....	8
Figura 2.7 – Retificador Trifásico com filtro indutivo no lado CA.....	15
Figura 2.8 – Tensão e corrente na entrada do retificador trifásico com filtro indutivo CA. ...	16
Figura 2.9 – Retificador Trifásico com filtro indutivo no lado CC.....	16
Figura 2.10 – Tensão e corrente na entrada do retificador trifásico com filtro indutivo CC. .	16
Figura 2.11 – Retificador Trifásico Não-Controlado Associado a um Conversor CC-CC.....	17
Figura 2.12 – Nova conexão de Transformadores para melhorar a divisão de corrente em retificadores de altas correntes.....	19
Figura 2.13 – Conversor Boost Modo de Condução Contínua.....	20
Figura 2.14 – Retificador PWM trifásico clássico.....	21
Figura 2.15 – Retificador PWM trifásico unidirecional.....	21
Figura 2.16 – Dois conversores 6 pulsos separados combinando para formar um conversor 12 pulsos alimentando 02 cargas iguais.....	23
Figura 2.17 – Dois conversores 6-pulsos separados combinando para formar um conversor de 12-pulsos alimentando a mesma carga.....	24
Figura 2.18 – Arranjo de conversores sem utilizar o Transformador de Interfase.....	25
Figura 2.19 – Retificador 12 Pulsos convencional.....	26
Figura 2.20 – Retificador híbrido multipulsos utilizando conversores Boost.....	27
Figura 2.21 – Diagrama de Blocos Esquemático do Novo Retificador Híbrido Multipulsos.....	29
Figura 2.22 – RHM – CPF utilizando o Conversor Boost.....	31
Figura 3.1 – Ensaio no laboratório da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.....	33
Figura 3.2 – Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica – UNB.....	33
Figura 3.3 – Fonte Califórnia Instruments – Série IX.....	34
Figura 3.4 – Protótipos desenvolvidos na Universidade Federal de Uberlândia – UFU.....	35
Figura 3.5 – RHM com conversor Boost – montado no laboratório de qualidade da energia da Universidade de Brasília – UNB.....	36
Figura 3.6 – Retificador 6 pulsos não-controlados de ponte de Graetz.....	37

Figura 3.7 – Conversores monofásicos Boost.....	38
Figura 3.8 – Conversor monofásico Bosst.....	38
Figura 3.9 – Diagrama de blocos esquemático da estratégia de controle PWM em malha fechada – Corrente de 12-pulsos imposta.....	39
Figura 3.10 – Forma de onda teórica da corrente de entrada i_{a1} e i_{a2}	40
Figura 3.11 – Formas de onda teórica do RHM. a) 12-pulsos; b) Trapezoidal; c) 20 pulsos; d) Senoidal.....	41
Figura 3.12 – Controle implementado em laboratório para impor correntes de 12 pulsos na rede CA de alimentação.....	42
Figura 3.13 – Transformador Isolador.....	43
Figura 3.14 – Retificador não-controlado – Ret-1.....	44
Figura 3.15 – Transformador Isolador.....	45
Figura 3.16 – Conversor monofásico – Fase A.....	46
Figura 3.17 – Conversor monofásico – Fase B.....	46
Figura 3.18 – Conversor monofásico – Fase A.....	46
Figura 3.19 – Estratégia de controle – Fase A.....	47
Figura 3.20 – Estratégia de controle – Fase B.....	47
Figura 3.21 – Estratégia de controle – Fase C.....	48
Figura 3.22 – RHM – Montado no laboratório de qualidade da energia da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.....	52
Figura 3.23 – Ensaio do Retificador.....	54
Figura 3.24 – Fonte Auxiliar de Controle.....	54
Figura 4.1 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.....	56
Figura 4.2 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).....	56
Figura 4.3 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	56
Figura 4.4 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	57
Figura 4.5 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.....	57
Figura 4.6 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).....	58
Figura 4.7 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	58
Figura 4.8 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	58
Figura 4.9 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.....	59
Figura 4.10 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).....	59
Figura 4.11 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	60
Figura 4.12 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$..	60

Figura 4.13 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	61
Figura 4.14 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	61
Figura 4.15 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	62
Figura 4.16 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	62
Figura 4.17 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	63
Figura 4.18 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	63
Figura 4.19 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	63
Figura 4.20 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	64
Figura 4.21 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	64
Figura 4.22 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	65
Figura 4.23 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	65
Figura 4.24 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	65
Figura 4.25 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	66
Figura 4.26 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	66
Figura 4.27 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	66
Figura 4.27 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	67
Figura 4.28 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	67
Figura 4.29 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	68
Figura 4.30 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	68
Figura 4.31 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	68
Figura 4.32 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	69
Figura 4.33 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	69
Figura 4.34 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	70
Figura 4.35 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	70
Figura 4.36 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	70
Figura 4.37 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	71
Figura 4.38 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	71
Figura 4.39 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	72
Figura 4.40 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	72
Figura 4.41 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	73
Figura 4.42 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).	73
Figura 4.43 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	73
Figura 4.44 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$	74
Figura 4.45 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	75

Figura 4.46 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	76
Figura 4.47 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	76
Figura 4.48 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	77
Figura 4.49 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	77
Figura 4.50 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	78
Figura 4.51 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	78
Figura 4.52 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	79
Figura 4.53 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	79
Figura 4.54 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	80
Figura 4.55 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	80
Figura 4.56 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	81
Figura 4.57 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	81
Figura 4.58 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	82
Figura 4.59 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	83
Figura 4.60 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	83
Figura 4.61 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	84
Figura 4.62 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	84
Figura 4.63 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.	85
Figura 4.64 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$...	85
Figura 4.65 – Gráfico do Fator de potência. Experimental.	89
Figura 4.66 – Gráfico da Potência ativa total de saída. Experimental.....	90
Figura 4.67 – Gráfico da Potência Ativa dissipada em cada fase. Experimental.....	90
Figura 4.68 – Gráfico da DHTI total da corrente de entrada das fases A, B e C. Computacional.....	91
Figura 4.69 – Gráfico do DHTI total da corrente de entrada das fases A, B e C. Experimental.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica;
CA	- Corrente Alternada;
CC	- Corrente Contínua;
GCOI	- Grupo Coordenador para Operação Interligada.
GCPS	- Grupo Coordenador para Proteção do Sistema.
$I_{a(in)}$	- Corrente CA de alimentação do RHM (fase A).
I_{a1}	- Corrente CA de alimentação do Ret-1 (fase A).
$I_{b(in)}$	- Corrente CA de alimentação do RHM (fase B).
I_{b1}	- Corrente CA de alimentação do Ret-1 (fase B).
$I_{c(in)}$	- Corrente CA de alimentação do RHM (fase C).
I_{c1}	- Corrente CA de alimentação do Ret-1 (fase C).
IEC	- International Electrotechnical Commission.
IEEE	- Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
IPT	- Transformador de Interfase
kW	- Kilowatt;
ONS	- Operador Nacional do Sistema;
PFC	- Power Factor Correction.
RHM	- Retificador Híbrido Multipulsos;
Ret-1	- Retificador de 6-pulsos não-controlado
Ret-2	- Retificador controlado.
UPS	- Uninterruptible Power Supply (Fonte de Alimentação Contínua);

1. INTRODUÇÃO GERAL

As últimas décadas foram marcadas pelo crescente desenvolvimento tecnológico, onde predominou a utilização de cargas não-lineares em todos os setores de distribuição de energia elétrica. São eles hospitais, comércio, indústria e residências, que até então não apresentavam maiores problemas no tocante à qualidade da energia elétrica. Essa evolução se deu graças ao grande avanço tecnológico, que foi alavancado pela grande evolução da eletrônica de potência. A evolução tecnológica viabilizou o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos com maior eficiência e flexibilidade, além da forma compacta que esses dispositivos tomaram. Entretanto, essa evolução não veio sozinha, trouxe consigo alguns inconvenientes, como a distorção harmônica na corrente de entrada dos sistemas de alimentação em corrente alternada [Santos et al, 2001], [Galhardo, Pinho, 2003].

Como se sabe, as cargas não-lineares são alimentadas por meio de retificadores monofásicos ou trifásicos, dependendo da potência. As estruturas dos retificadores drenam grande quantidade de conteúdo harmônico, o que leva a um aumento de distorção harmônica nos sistemas de distribuição [Ray, Davis, Weatherhogg, 1988], [Pice, 1996]. Em consequência disso, aliada ao fato do baixo fator de potência apresentado pelas cargas não-lineares, as concessionárias enfrentam problemas de queda de rendimento e, conseqüentemente, prejuízos financeiros bastante significativos. À medida que vão se consolidando os avanços tecnológicos, torna-se extremamente necessário o controle do conteúdo harmônico de corrente nos sistemas de distribuição.

O controle do fator de potência é exercido de forma global em sistemas elétricos, sem qualquer restrição no que diz respeito à taxa de distorção harmônica individual das cargas não-lineares. Isso se deve ao fato de que não temos normas técnicas brasileiras em vigor. Essa falta de controle leva o sistema elétrico nacional a conviver com perdas e conseqüentemente prejuízos financeiros bastante significativos.

Neste contexto, as normas internacionais (IEC, 1998 e 2000), têm sido adotadas em aplicações monofásicas e trifásicas de baixas potências, e vêm sendo utilizadas para impor restrições nos níveis de distorção causados por sistemas retificadores. Em função dessas restrições, o conversor *Boost* se tornou uma opção clássica para operar como retificador de elevado fator de potência, para aplicações de alguns poucos kW [Dixon, 1988].

Vários estudos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos sob o controle do órgão regulador ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica e do Operador Nacional do Sistema (ONS), com a finalidade de criar diretrizes que possam servir de parâmetros para a criação de Normas e Padrões da Qualidade de Energia do Sistema Elétrico Brasileiro [GCOI/SCEL e GCPS/CTST, 1997], [ONS, 2002].

A criação das Normas e Padrões é essencial para que possam ser estabelecidos parâmetros de Qualidade da Energia, de forma qualitativa e quantitativa. Desse modo, são reconhecidos os esforços feitos pelos centros de pesquisa, fabricantes, concessionárias, universidades etc., voltados para temas como:

- Qualidade de fornecimento da energia elétrica;
- Propagação dos distúrbios nos sistemas elétricos; e
- Níveis de suportabilidade dos equipamentos elétricos e eletroeletrônicos, bem como os efeitos sobre eles causados pelos distúrbios.

Alguns sistemas retificadores de alta potência são os grandes responsáveis pelo aparecimento de harmônicas em vários níveis no sistema elétrico. Nesse contexto, os retificadores de 12-pulsos e seus múltiplos vêm sendo utilizados, se apresentando como ótimas opções técnicas para a redução de distorção harmônica da corrente de entrada e, conseqüentemente, elevado fator de potência. Os retificadores de 12-pulsos realmente garantem um bom desempenho do conjunto retificador. Entretanto, isso só se torna possível mediante a utilização de transformadores defasadores e transformadores de interfase.

Apesar de os retificadores de 12-pulsos terem as vantagens mencionadas anteriormente, eles apresentam muitas desvantagens devido à utilização dos transformadores defasadores que, apesar da robustez, torna a sua estrutura bastante volumosa e de custo elevado, limitando a sua utilização para aplicações de algumas dezenas de kW.

Também, a utilização dos transformadores de interfase representa uma grande desvantagem devido à complexidade de projeto, que torna o seu custo muito elevado. Isso se deve à presença de harmônicas de tensão, que provoca mudanças na tensão do

barramento CC, tornando o projeto dos transformadores de interfase bastante complexos [Guimarães *et al*, 1995].

Para compensar a presença dessas harmônicas de tensão em sistemas desequilibrados, faz-se necessária a utilização de filtros, o que torna a estrutura dos retificadores ainda mais volumosa e cara.

Após diversas pesquisas, uma tese de doutorado [Gomes, 2006] ofereceu uma alternativa que possibilita contornar esses problemas. Essa tese de doutorado propõe uma nova concepção de retificador híbrido multipulsos, composta de um retificador de 6-pulsos não-controlado convencional, associado a retificadores controlados (chaveados) conectados em paralelo com cada fase do retificador de 6-pulsos convencional.

Neste contexto, essa dissertação de mestrado propõe estudar o retificador híbrido, o impacto que causa à rede, quais os benefícios em relação aos Retificadores Multipulsos convencionais, bem como qual a melhor forma de modelar a corrente para obter a potência desejada, com o menor nível de distorção harmônica da corrente de entrada. Para isso, a presente dissertação apresenta procedimentos que visam à implementação computacional desses modelos, utilizando o programa de simulação *SPICE* para avaliar o desempenho do retificador proposto no contexto da qualidade da energia. Depois de concluída a fase de simulações, um protótipo de 6 kW foi montado no laboratório, visando validar os resultados das simulações.

Uma análise sob a ótica da Qualidade de Energia permite verificar os benefícios que o Retificador Híbrido Multipulsos pode propiciar em determinadas aplicações. Com isso, pode ser estabelecida uma análise comparativa entre o Retificador Híbrido Multipulsos de Elevado Fator de Potência composto de um retificador não-controlado convencional, associado a três conversores *Boost* alimentados por um transformador trifásico de baixa frequência, ligados em paralelo, com outras soluções adotadas para reduzir os níveis de distorção harmônica na corrente de entrada.

Ainda, são estabelecidas as vantagens e desvantagens operacionais, tecnológicas e econômicas relativas à utilização do novo retificador Híbrido Multipulsos, quando comparado com os Retificadores Multipulsos clássicos que usam transformadores

defasadores associados a transformadores de interface e transformadores bloqueadores de correntes harmônicas. Para ilustrar o trabalho serão apresentados resultados de simulações e ensaios experimentais, no sentido de comprovar as características operacionais relatadas.

O objetivo desse trabalho de mestrado é investigar o comportamento do Retificador Híbrido Multipulsos – RHM de elevado fator de potência e baixa taxa de distorção harmônica de corrente de entrada. Nesse contexto, a presente dissertação analisa o comportamento da rede elétrica quando o RHM é inserido no sistema, visando verificar quais os efeitos e compará-los com os efeitos causados pelos retificadores multipulsos clássicos.

Dessa forma, esse trabalho contribui para novas pesquisas, visando desenvolvimentos de novas tecnologias de equipamentos, que possam conviver com pequenos distúrbios, e ao mesmo tempo deixem de ser os grandes vilões para os sistemas de distribuição.

Ao longo desse trabalho são apresentados ao leitor os problemas verificados, as pesquisas de soluções, as possíveis soluções, suas vantagens e desvantagens. Também são apresentados os conceitos básicos, as técnicas ativas e passivas apresentadas em literaturas especializadas, utilizadas no sentido de suavizar os problemas de distorção harmônica da corrente de entrada. Destaca-se entre as soluções, a estrutura de retificadores trifásicos PWM, dos retificadores multipulsos e retificadores híbridos multipulsos.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

O capítulo 2 tem como objetivo, apresentar ao leitor os problemas relacionados com as distorções harmônicas, as pesquisas de possíveis soluções adotadas para resolver esses, suas vantagens e desvantagens. Também são mostradas as técnicas passivas e ativas apresentadas em literaturas especializadas e utilizadas no sentido de suavizar os problemas de distorção harmônica da corrente de entrada.

Destaca-se entre as soluções encontradas para minimizar o problema das distorções harmônicas presentes na rede pela inserção de cargas não-lineares, a estrutura de retificadores trifásicos PWM, dos retificadores multipulsos e retificadores híbridos multipulsos. Os conceitos básicos, vantagens e desvantagens de cada um são apresentados neste capítulo.

O capítulo 3 apresenta o retificador estudado, destacando os detalhes construtivos, com fotos do protótipo de 6kW montado. Também são apresentados os laboratórios do Núcleo de Eletrônica de Potência – NUEP da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU e o laboratório de Qualidade da Energia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, onde foram realizados os ensaios experimentais e as montagens. A descrição dos ensaios é mostrada, juntamente com o esquema elétrico do retificador não controlado, do conversor *Boost*, dos parâmetros ajustados e a estratégia de controle utilizada. Também são descritos os ensaios computacionais, com os circuitos simulados, as condições de ensaio e os casos estudados. São adotadas situações possíveis de ocorrer dentro de um sistema elétrico de distribuição, onde as variações na tensão de alimentação estão presentes.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, analisando caso a caso, comparando os resultados experimentais e os computacionais. A análise é baseada no caso base que apresenta as condições ideais de fornecimento de energia. Os resultados são ilustrados com figuras e gráficos obtidos nos ensaios experimentais e computacionais, que servem como parâmetros comparativos, visando validar a proposta.

Embora ao final de cada capítulo serem feitas algumas considerações, o capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações para pesquisas futuras. Também são ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas que esse trabalho pode oferecer, bem como sugestões que possam abrir discussões e pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse trabalho de pesquisa iniciou-se através de levantamentos bibliográficos acerca dos problemas relacionados com as distorções harmônicas no sistema elétrico em função do grande aumento de cargas não-lineares verificado na última década e, os mais diversos assuntos relacionados. Seguindo esta etapa, apresentamos na seqüência, um resumo das principais matérias publicadas onde são apresentadas diversas estruturas para reduzir o conteúdo harmônico na rede, demonstrando a grande preocupação que existe com o tema. Nessa busca são encontradas diversas publicações sobre o tema, realçando a importância desse trabalho.

2.1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de cargas não-lineares, verificada nas últimas décadas nos diversos setores de distribuição de energia (residencial, comercial e industrial), é fruto da notável evolução da eletrônica de potência. Tal evolução tem viabilizado o surgimento de novos dispositivos, com características mais compactas e eficientes. Ao mesmo tempo em que a eletrônica de potência vem evoluindo, começam a aparecer os inconvenientes causados por estes dispositivos que, operando em conexão com a rede de distribuição, drenam correntes com elevado conteúdo harmônico devido a sua característica não-linear. As figuras 2.1, 2.2 e 2.3 ilustram esse conceito. Para uma tensão senoidal aplicada à carga não-linear tem-se como resposta uma corrente distorcida. A tensão e a corrente variam de acordo com a curva mostrada na figura 2.4 [Galhardo, 2003].

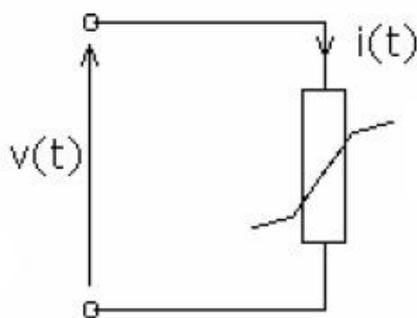


Figura 2.1 – Circuito com Carga não-linear
Fonte: [Galhardo, 2003]

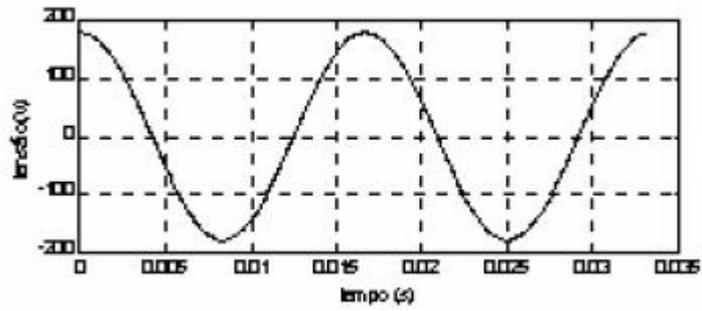


Figura 2.2 - Carga não-linear Curva da Tensão
 Fonte: [Galhardo, 2003]

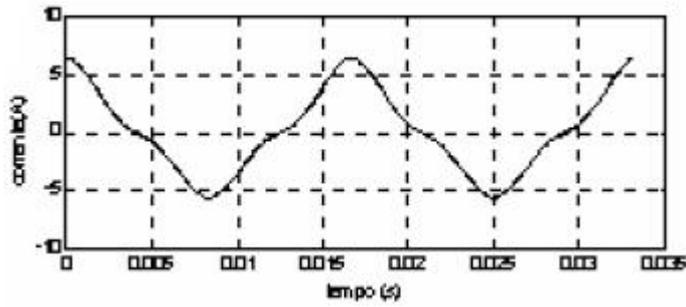


Figura 2.3 - Carga não-linear – Curva da Corrente
 Fonte: [Galhardo, 2003]

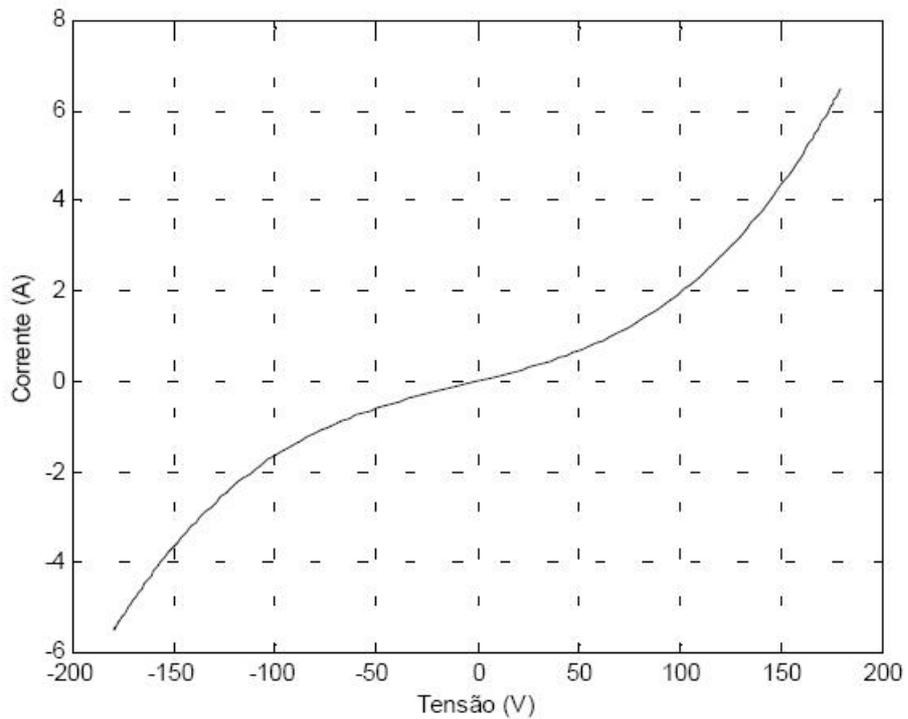


Figura 2.4 - Corrente x Tensão
 Fonte: [Galhardo, 2003]

2.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

No Brasil, o real conceito de fator de potência ainda tem sido entendido de uma forma um pouco equivocada, levando a um controle de forma global nos sistemas elétricos, pois a legislação brasileira não dispõe de mecanismo que possa impor restrições para a taxa de distorção individual de cargas não-lineares. Pequenas cargas não-lineares não interferem na qualidade da energia do sistema quando vistas isoladamente. Entretanto, à medida que novas cargas vão sendo inseridas no sistema, essas distorções se tornam expressivas, levando o sistema elétrico nacional a conviver com perdas substanciais. Tal situação tem causado perdas financeiras, que poderiam ser utilizadas em melhorias e até mesmo na expansão do sistema de geração e transmissão, bem como na melhoria e ampliação do sistema de distribuição.

A grande maioria das cargas não-lineares é conectada ao sistema através de um retificador em ponte completa, a diodo, a tiristor ou ainda mista (diodos e tiristores). A sua configuração pode ser monofásica ou trifásica, dependendo da potência da carga. Via de regra, para potências elevadas, as estruturas retificadoras necessitam de elevado volume de filtros capacitivos, para drenar o substancial conteúdo harmônico presente nessas estruturas. Em consequência da utilização desses filtros capacitivos, verifica-se uma redução do fator de potência e um aumento da distorção harmônica da tensão nos ramais de distribuição do sistema supridor de energia [Ray, Davis, Weatherhogg, 1988], [Rice, 1994].

As distorções harmônicas na tensão de alimentação e o reduzido fator de potência dessas cargas não-lineares têm apresentado consequências que vêm sendo objeto de inúmeras publicações, onde ficam evidenciados os prejuízos causados aos usuários e concessionários distribuidores de energia, comprometendo o desempenho do sistema como um todo [Santos et al, 2001], [Resende et al, 2003].

A ponte de *Graetz* (Figura 2.5), é uma configuração que vem sendo largamente utilizada em sistemas de telecomunicação, controle de velocidade de motores, UPS e outros, é a Ponte de *Graetz* com diodos e filtros capacitivos. Essa configuração conhecida como retificador não-controlado é a mais simples e não permite o controle da tensão no barramento CC. As formas de onda da corrente e tensão na entrada do retificador são mostradas na figura 2.6.

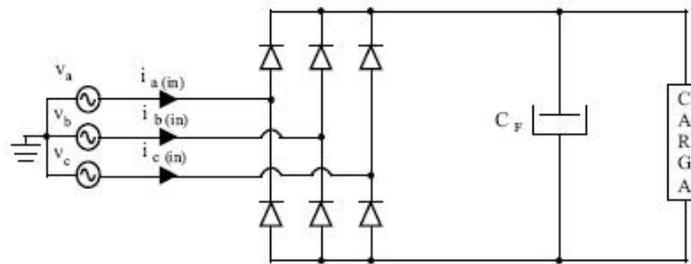


Figura 2.5 – Retificador Trifásico em Ponte de *Graetz*.

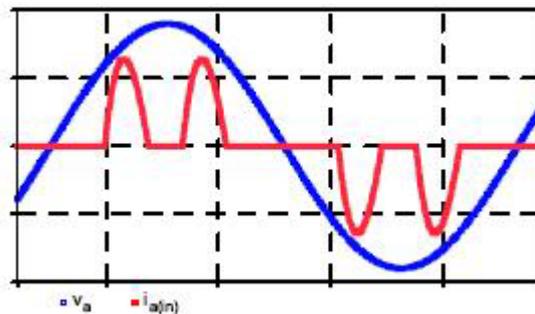


Figura 2.6 – Tensão e Corrente na entrada do Retificador Trifásico em Ponte de *Graetz*.

O resultado da utilização de estruturas retificadoras com volumosos filtros capacitivos é um aumento substancial de distorção harmônica ao longo de todo o sistema de distribuição [Ray, Davis, Weatherhogg, 1988], [Pice, 1996], [Schaffer, 1965], [Rice, 1994]. Essas distorções harmônicas provocam inúmeros problemas, tais como os relacionados a seguir [Autores, 2001], [Resende *et al*, 2003]:

- Perdas adicionais no sistema de transmissão e de distribuição devidas ao aumento das perdas jáulicas em função do alto índice de conteúdo harmônico;
- Ocorrência de sobretensões em bancos de capacitores utilizados para corrigir o fator de potência, que são capazes de danificar o próprio banco ou até mesmo os transformadores. Essas sobretensões são decorrências da ressonância entre os bancos instalados na rede;
- Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas e capacitores;
- Redução da vida útil de lâmpadas incandescentes, em face de sua sensibilidade às variações de tensão;
- Superdimensionamento de transformadores para compensar as perdas por histerese e correntes parasitas de *Focault* e o aquecimento adicional. Pesquisas comprovam que apenas 69% da potência nominal do transformador é aproveitada;
- Aumento de perdas nos condutores (efeito pelicular e de proximidade);

- Mal funcionamento de disjuntores termomagnéticos, devido ao aumento da temperatura interna provocada pela variação da corrente eficaz;
- Mal funcionamento dos disjuntores eletrônicos projetados para responder a valor de crista, devido à variação da corrente de crista;
- Interferências eletromagnéticas em sistemas de telecomunicações e circuitos eletrônicos; e
- Aumento da corrente de neutro.

2.3 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Cresce a cada dia, a preocupação com o comportamento dos dispositivos e equipamentos elétricos ligados ao sistema de potência com problemas de qualidade da energia. Nesse sentido, fica evidente a necessidade de estudos voltados para a melhoria dos equipamentos que serão incorporados à rede de distribuição.

Aplicações de equipamentos de cargas de estado-sólido continuam a crescer, especialmente pela sua capacidade de conservação de energia, e melhor controle que as tradicionais. Antes do ano 2000 estimava-se que de toda energia elétrica gerada, 60% era totalmente processada de algum modo através de métodos de estado-sólido [Santos, *et al*, 2001]. A natureza não-linear inerente à carga de equipamento de estado-sólido coloca demandas de correntes harmônicas e perdas no sistema elétrico de potência. Por isso, os meios para controlar estas demandas tornaram-se essenciais.

Basicamente, as grandezas que definem a qualidade da energia são tensão e frequência. Normas e recomendações, geralmente, destinam-se ao controle dessas grandezas, mantendo os níveis dentro dos limites aceitáveis por consumidor e concessionário distribuidor. Vale salientar que os padrões de desempenho estabelecidos aplicam-se a novas instalações da rede básica, e os requisitos mínimos não se aplicam diretamente às instalações preexistentes.

Neste contexto, algumas normas internacionais têm sido utilizadas para impor restrições em aplicações de retificadores (IEC, 1998 e 2000). Em função das restrições impostas pelas normas para as aplicações monofásicas e trifásicas em baixa potência, foi feito um trabalho especializado nos Estados Unidos que recomenda limites de tensão e corrente

harmônicas. Esse trabalho foi disponibilizado pelo IEEE em maio de 1993. Preparado por peritos no Grupo de Aplicações de Indústria é um valioso documento de referência e provavelmente será considerado por outros comitês de padronização ao redor do mundo. O documento, IEEE Std 519-1992, foi intitulado IEEE Standard 519-1992 – *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, (ISBN EU-55937-239-7).

Dentro da indústria, ele normalmente é referenciado simplesmente como o *IEEE Harmonics Spec* [*Power Electronic Converter Harmonics*]. Esta norma é aplicada a todos os tipos de conversores de potência estáticos usados na indústria e comércio de sistemas de potência. A *IEEE Standard 519-1992* estabelece procedimentos para o controle de harmônicas em sistemas de potência, juntamente com os limites recomendados para injeções de corrente harmônica de distorção que afetam os equipamentos, sistema de distribuição e telecomunicações. Espera-se que o sistema de energia elétrica seja suficientemente livre de distúrbios para ser uma fonte de potência para todos os usuários de eletricidade, conforme as recomendações da IEEE Std 519-1992.

No Brasil, não há uma norma regulamentada que estabeleça critérios e limites para a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Entretanto, cientes do problema, os órgãos regulamentadores têm se empenhado na busca de soluções e propostas destinadas a se atingir uma regulamentação nacional. Em fevereiro de 1993 foi emitido um documento “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, de autoria dos grupos de trabalhos, Grupo Coordenador para Operação Interligada – GCOI e Grupo Coordenador para Proteção do Sistema. – GCPS, onde foram estabelecidos critérios e procedimentos para o planejamento e a operação dos sistemas elétricos de potência. Tais diretrizes dizem respeito à avaliação e o controle das perturbações causadas por cargas não-lineares, intermitentes ou desequilibradas. Em novembro de 1997, este documento foi complementado por outro, denominado por “Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão Quanto ao Aspecto de Conformidade (Distorção Harmônica, Flutuação e Desequilíbrio de Tensão) [GGOI/SCEL e GCPS/CTST, 2003]”.

O ONS define os padrões de desempenho da rede básica e os requisitos mínimos para suas instalações. O desempenho sistêmico da rede básica de transmissão é quantificado a partir

da avaliação de um conjunto de quesitos que traduzem a qualidade da operação da mesma. Entre estes quesitos estão, por exemplo, a tensão, a frequência, e o nível de harmônicas entre outros. Pode-se estabelecer um ou mais indicadores que devem ser monitorados de forma a caracterizar o desempenho da rede básica referente a cada quesito. Entende-se por padrão, o valor desejado atribuído a cada indicador. Este valor pode ser um valor mínimo, máximo, médio, ou mesmo uma região compreendida entre os valores limites, dependendo da natureza do distúrbio e do indicador em questão [ONS, 2002].

De forma a assegurar que a Rede Básica atenda aos Padrões de Desempenho estabelecidos neste módulo 2 dos Procedimentos de Rede, faz-se necessário que o desempenho de cada um de seus elementos funcionais, seja resultante do atendimento a um conjunto de condicionantes técnicos previamente estabelecidos. Estes condicionantes técnicos, que podem ser quantificados por indicadores de natureza sistêmica, elétrica e mecânica, definem os “Requisitos Mínimos” para as instalações da Rede Básica [ONS, 2002].

Tabela 2.1 – Níveis de tensões harmônicas para sistemas de potência de baixa e média tensão (expressos como porcentagem da tensão nominal).

Fonte: [IEEE Std 519-1992]

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem h	Tensão Harmônica (%)	Ordem h	Tensão Harmônica (%)	Ordem h	Tensão Harmônica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+1,3 x (25/h)	>21	0,2	10	0,5
NOTA – DISTORÇÃO HARMONICA TOTAL (DHT): 8 %					

Tabela 2.2 – Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal.
 Fonte: [IEEE Std 519-1992]

TENSÃO NOMINAL DO PAC	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO – DHT_{V_n} (%)
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	5%
$V_n > 161 \text{ kV}$	10%

O IEEE possui uma hierarquia de documentos, desde os de caráter instrutivos até os mais regulamentadores, isto é, “Manuais”, “Práticas Recomendadas” e “Normas”. A IEEE Standard 519-1992 é utilizada para orientar projetos de sistemas elétricos, com destaque ao suprimento de cargas não-lineares. Além disso, são também empregados limites para a definição da adequabilidade operacional de instalações, ressaltando-se o seu funcionamento em regime permanente.

A responsabilidade de manter a qualidade da tensão em todo o sistema fica atribuída à concessionária. Nesse sentido, a tabela 2 apresenta os limites de distorção de tensão estabelecidos para diferentes níveis de tensão.

Tabela 2.3 – Classificação e Limites de Distorção de Tensão Para Consumidores Individuais (Sistemas de Baixa Tensão)
 Fonte: [IEEE Std 519-1992]

CLASSE DE SISTEMA	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT)
Aplicações Especiais	3%
Sistema de Geral	5%
Sistema Dedicado	10%

Tabela 2.4 – Limites de distorção harmônica de corrente (I_h) em % de I_L .
 Fonte: [IEEE Std 519-1992]

$V_n \leq 69$ kV						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD(%)
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69 kV < $V_n \leq 161$ kV						
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161$ kV						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tabela 2.5 – Base para determinação dos limites de distorção harmônica de corrente.
 Fonte: [IEEE Std 519-1992]

SCR ou PAC	Máxima Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)	Considerações Relacionadas
10	2.5 – 3.0	Sistema dedicado
20	2.0 – 2.5	1-2 Grandes consumidores
50	1.0 – 1.5	Poucos consumidores Relativamente grandes
100	0.5 – 1.0	5-20 Consumidores médios
1000	0.05 – 0.1	Muitos consumidores pequenos

Tabela 2.6 – limites da IEC-61000-3-4 – Distorção harmônica de corrente.
 Fonte: [IEEE Std 519-1992]

Ordem Harmônica n	Corrente Harmônica Admissível (I_n/I_1) (%)	Ordem Harmônica n	Corrente Harmônica Admissível (I_n/I_1) (%)
3	21,6	21	$\leq 0,6$
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	$\leq 0,6$
11	3,1	29	0,7
13	2,0	31	0,7
15	0,7	>31	0,6
17	1,2		
19	1,1	par	$\leq 8/n$ ou $\leq 0,6$

Deste modo, torna-se necessário desenvolver situações que permitam instalar cargas no sistema, respeitando os limites impostos pelas normas.

2.4 SOLUÇÕES POSSÍVEIS

Ao longo dos anos, diversas técnicas de redução do conteúdo harmônico da corrente CA de alimentação de retificadores foram introduzidas. As técnicas mais conhecidas podem ser divididas em duas categorias, a saber: técnicas passivas e ativas.

2.4.1 Técnicas passivas

As técnicas passivas são caracterizadas pela utilização de filtros indutivos e capacitivos juntos ou separadamente, no sentido de reduzir as distorções harmônicas e elevar o fator de potência. Esses filtros são instalados em paralelo com a carga produtora de harmônicas,

absorvendo-as e evitando que elas circulem pela fonte supridora. Geralmente, os filtros são ajustados sobre uma ordem próxima da harmônica que se deseja eliminar. Podem ser feitas várias ligações dos filtros em paralelo, quando desejamos uma redução forte da taxa de distorção sobre várias harmônicas. O filtro passivo permite uma compensação de energia reativa e, ao mesmo tempo, possui uma grande capacidade de filtragem de corrente.

Os filtros passivos quando utilizados isoladamente são vistos, às vezes, como dispositivos ultrapassados, se comparados aos filtros ativos. Por outro lado, o uso dos filtros ativos ainda enfrenta alguma resistência por não ser uma tecnologia totalmente dominada e por apresentar um custo de implantação elevado. Estes fatores limitam sua aplicação apenas às instalações de baixa potência. Atualmente, existe uma forte tendência para a concepção de supressores harmônicos híbridos, com o objetivo de aglutinar as vantagens econômicas e operacionais das tecnologias ativa e passiva.

2.4.1.1 Retificador trifásico com filtro indutivo no lado CA.

Caracterizada pela introdução de um indutor na entrada da ponte retificadora (Figuras 2.7 e 2.8), fazendo com que a distorção harmônica de corrente seja reduzida e o fator de potência melhorado. É simples, confiável, e apresenta baixo nível de perdas. Entretanto, os reatores são volumosos, pesados, apresentam resposta dinâmica pobre, e afetam a forma da componente fundamental, além de seu dimensionamento correto ser complicado [Lander, 2002].

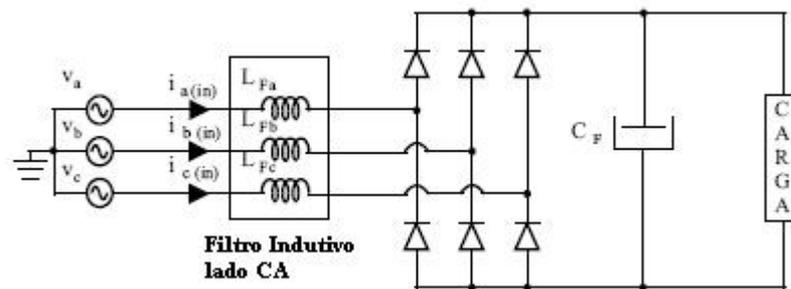


Figura 2.7 – Retificador Trifásico com filtro indutivo no lado CA.

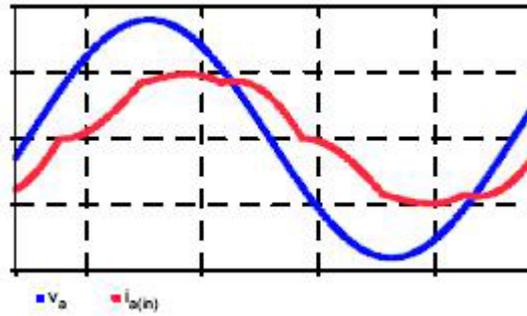


Figura 2.8 – Tensão e corrente na entrada do retificador trifásico com filtro indutivo CA.

2.4.1.2 Retificador trifásico com filtro indutivo no lado CC.

Esta configuração utiliza um filtro LC no lado CC (Figuras 2.9 e 2.10), sendo um filtro indutor bastante volumoso, pois precisa suportar a corrente máxima da carga sem que seu núcleo venha a saturar. Essa estrutura apresenta uma DHT_I da corrente de entrada em torno de 30%, e o fator de potência de 0,95 [Lander, 2002].

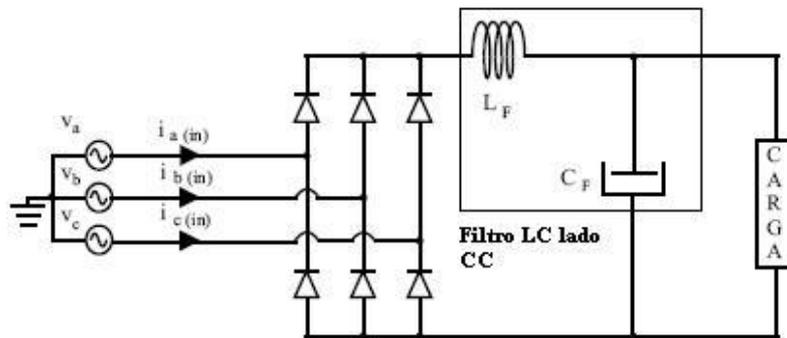


Figura 2.9 – Retificador Trifásico com filtro indutivo no lado CC.

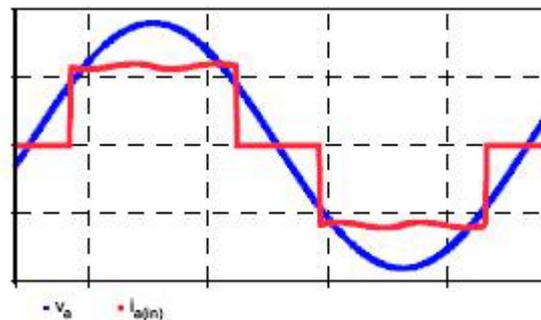


Figura 2.10 – Tensão e corrente na entrada do retificador trifásico com filtro indutivo CC.

2.4.2 Técnicas ativas

As técnicas ativas, também chamadas compensação ativa, caracterizam-se pela instalação de sistemas eletrônicos de potência em série ou paralelo com a carga não-linear, visando compensar as tensões e correntes harmônicas, geradas pela carga. Os filtros ativos permitem a filtragem das harmônicas sobre uma longa faixa de frequência e, se adaptam a qualquer tipo de carga. Entretanto, sua potência harmônica é limitada.

2.4.2.1 Retificadores trifásicos não-controlados associados a conversor CC-CC.

Esta técnica considera retificadores de 6-pulsos associados a conversores CC-CC, considerados de dois estágios (Figura 2.11) utilizados em aplicações industriais de baixa potência.

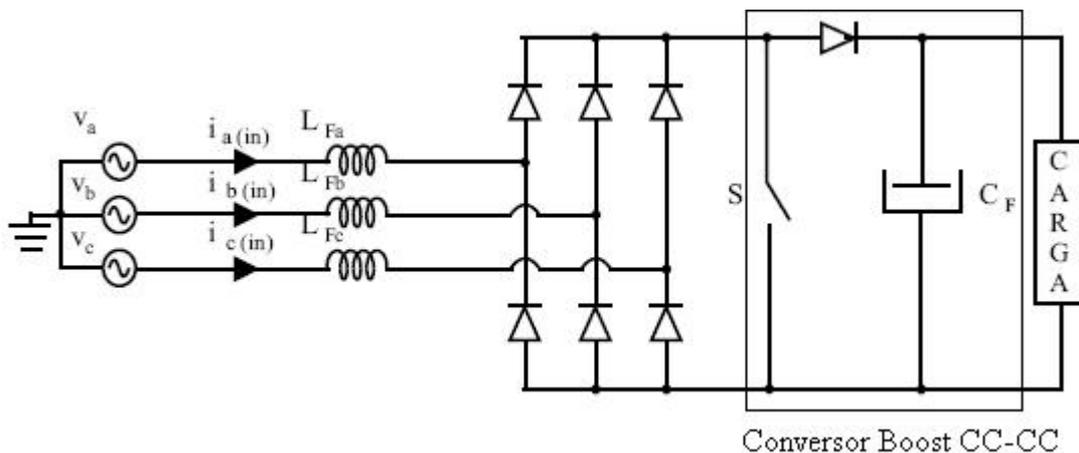


Figura 2.11 – Retificador Trifásico Não-Controlado Associado ao Conversor CC-CC.

Entre os conversores CC-CC para compor o segundo estágio, o mais utilizado é o conversor *Boost*, operando no modo de condução descontínua. A estratégia de controle utilizada é o *PWM*, que permite impor uma corrente de entrada com forma senoidal. Em função da alta frequência de chaveamento, a corrente de entrada será composta pela componente fundamental (60 Hz) somada às componentes harmônicas de alta frequência, que são múltiplas da frequência de chaveamento. Essas componentes harmônicas podem ser facilmente filtradas com o emprego de filtros LC inseridos antes dos indutores do conversor *Boost*. Isso porque a frequência de chaveamento é estabelecida na faixa de dezenas de kHz [Prasad, Ziogas, & Manias, 1991]. Essa estrutura eleva o fator de potência e reduz o DHT_I da corrente de entrada. Entretanto, essa estrutura apresenta algumas desvantagens, podendo-se destacar o grande esforço de corrente no interruptor em função

do modo de operação de condução descontínuo, limitando a sua utilização a aplicações para a faixa de dezenas de Watts [Prasad, Ziogas, 1991], [Prasad, Ziogas, 1992].

O recente avanço tecnológico na fabricação de semicondutores como, por exemplo, o *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)*, ou o *IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)*, contribuiu no sentido de permitir obter elevadas potências em tais estruturas. Entretanto, mesmo com a utilização desses semicondutores de capacidade superior, eles não são capazes de operar respeitando os níveis de DHT_I impostos pelas normas internacionais IEEE-519 e IEC-6100-3-2. Também, para aplicações na ordem de dezenas de kW, o rendimento não é satisfatório, uma vez que toda a potência será processada por um único conversor CC-CC.

2.4.2.2 Retificador trifásico controlado a tiristor.

A utilização dos retificadores trifásicos controlados a tiristor propicia o controle da tensão no barramento CC, além de serem robustos e possuírem excelentes características para acionamento de grandes motores CC, como os motores de trens de metrô. Por outro lado, esses retificadores são bastante complexos em função do circuito de acionamento dos tiristores, além de apresentam elevado DHT_I de corrente de entrada. Não obstante, é uma unanimidade em aplicações de potências elevadas (acima de 100 kW), por exemplo, em estações de Metrô, utilizando transformadores defasadores [Guimarães *et al*, 2005.], [Goldemberg, 2005].

A utilização dos transformadores defasadores é justificada pela necessidade de se reduzir o DHT_I de corrente. Em aplicações de baixas tensões (30V – 60V) e altas correntes (6000A), esses retificadores são imbatíveis [Oliver *et al*, 1995], uma vez que transformadores defasadores especiais foram desenvolvidos com o intuito de melhorar o DHT_I da corrente CA de entrada (Figura 2.12). Para esses fins, desenvolveram-se retificadores trifásicos totalmente controlados, extremamente robustos, drenando correntes praticamente senoidais da rede CA, propiciando o controle da tensão no barramento CC. Portanto, justificando emprego de tiristores, com circuitos de comando tão complexos e transformadores especiais volumosos, pesados e caros.

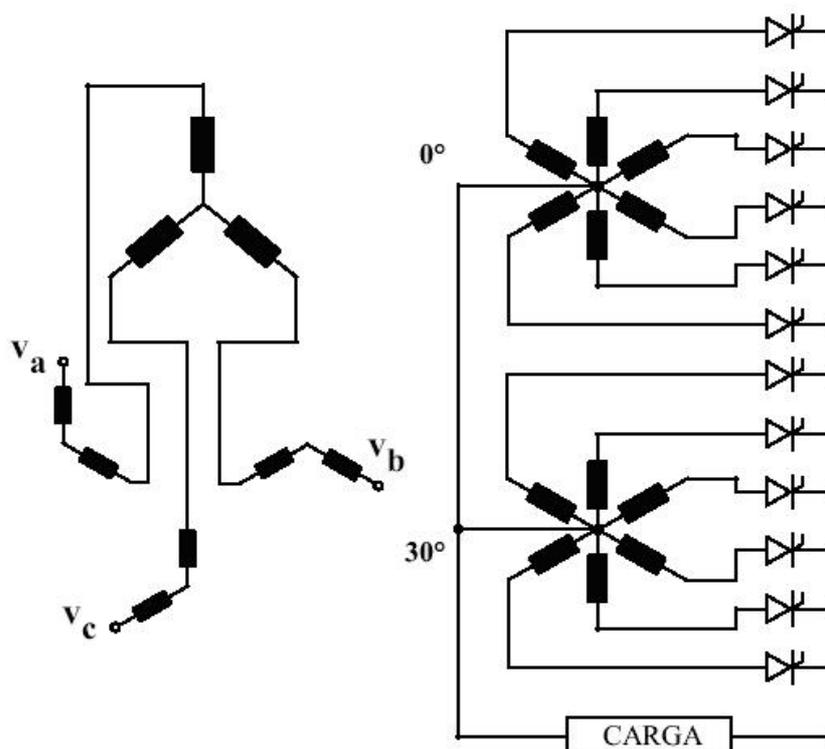


Figura 2.12 – Nova conexão de Transformadores para melhorar a divisão de corrente em retificadores de altas correntes.

Fonte: [Oliver *et al*, 1995].

2.4.2.3 Retificadores PWM

Os retificadores PWM a tiristor são amplamente utilizados em conversores CA-CC monofásicos, onde a tensão de saída é controlada pela variação do ângulo de disparo, ângulo de extinção ou ângulo simétrico, que apresenta apenas um pulso por ciclo da corrente de entrada do conversor. Nestes retificadores de dois pulsos, a 1ª harmônica significativa é a de 3ª ordem ($kn \pm 1$), sendo de difícil filtragem.

No controle da modulação PWM, as chaves do conversor são ligadas e desligadas várias vezes durante um semiciclo, e a tensão de saída é controlada pela variação da largura dos pulsos. Os sinais de gatilho são gerados através da comparação de uma onda triangular com sinal CC. Selecionando-se o número de pulsos por semiciclo, as harmônicas inferiores podem ser eliminadas ou reduzidas.

Os retificadores PWM (*Pulse Width Modulation*) são largamente empregados em conversores CA-CC monofásicos por apresentarem algumas vantagens destacadas a seguir.

- a) Operação com frequência fixa;
- b) Projetos precisos de filtros LC de alta frequência;
- c) Reduzida DHT_I da corrente CA de entrada;
- d) Elevado fator de potência; e
- e) Eliminação dos filtros da baixa frequência no lado CA.

São estruturas mais caras quando comparadas com as dos conversores CA-CC adotando técnicas de controle convencionais, mas extremamente atrativos em aplicações que exigem equipamentos de tamanho e peso reduzido.

Em aplicações de dezenas de Watts, os circuitos retificadores monofásicos PWM devem ser substituídos por circuitos trifásicos de alto fator de potência, amplamente utilizados para controle da corrente de entrada de retificadores monofásicos. O conversor *Boost* no modo de condução contínua é mostrado na Figura 2.13 [Borgonovo, Novaes, 2005].

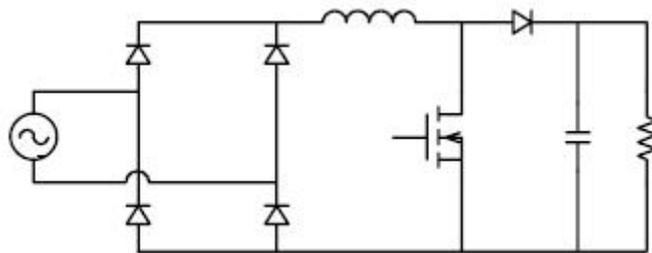


Figura 2.13 – Conversor *Boost* Modo de Condução Contínua.
Fonte: [Borgonovo, Novaes, 2005].

Os retificadores PWM apresentam estruturas bastante conhecidas pela sua vasta utilização, por exemplo, para alimentar inversores. Sua característica bidirecional prejudica sua confiabilidade em função do risco de curto-circuito no barramento CC de saída. Essa condição obriga a implementação do tempo morto para comandar as chaves, o que torna o projeto muito mais complexo. A estrutura mais conhecida é ilustrada (Figura 2.14).

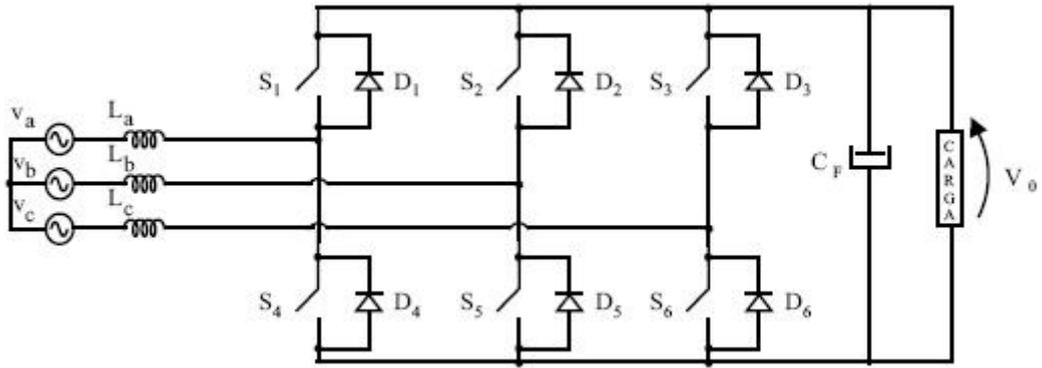


Figura 2.14 – Retificador *Boost* PWM trifásico bidirecional clássico.
 Fonte: [Borgonovo, Novaes, 2005].

Nesse contexto, surgem diversas variações topológicas, entre elas, o clássico retificador *Boost* PWM trifásico unidirecional (Figura 2.15), que apresenta um elevado fator de potência obtido pela conexão de três módulos monofásicos de conversor *Boost* conectado a cada fase do sistema de alimentação CA.

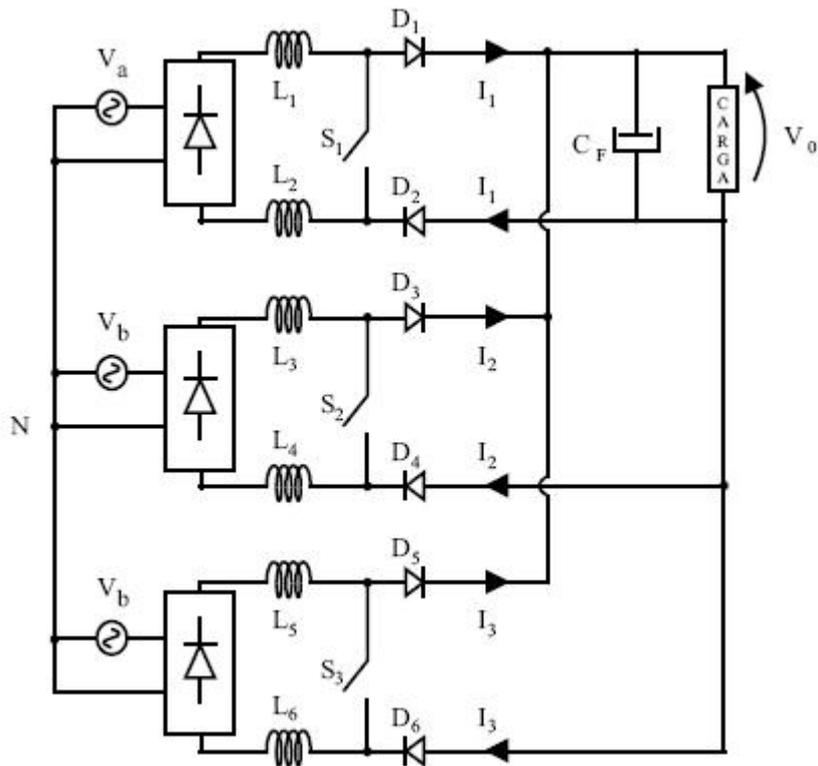


Figura 2.15 – Retificador PWM *Boost* trifásico unidirecional.
 Fonte: [Borgonovo, Novaes 2005].

O retificador PWM com estrutura unidirecional tornou-se uma das soluções mais atrativas quando não é necessário a bidirecionalidade, pois essa estrutura apresenta maior robustez, custo reduzido por utilizar um número menor de chaves, menor complexidade de projeto e, conseqüentemente, um custo menor. Entretanto, os retificadores PWM apresentam uma grande desvantagem, que limita a sua aplicação para potências médias (máximo de 10 kW), pois processam toda a potência transferida para carga, afetando o seu rendimento global, comprometendo a estrutura em função dos esforços a que ficam submetidos os dispositivos semicondutores.

Concluindo, em circuitos onde imperam sistemas trifásicos, o emprego de retificadores controlados PWM *Boost*, [Hahn, Enjeti, Pitel, 2002], [Lin, Yang, & Lee, 2003], [Spiazzi, Lee, 1997], apresentam as seguintes desvantagens:

- a) Utilização de grande número de interruptores e diodos ultra-rápidos;
- b) Circuitos para acionamento dos interruptores com controle bastante complexos;
- c) Custo de implantação muito elevado.

2.4.2.4 Retificadores multipulsos.

O termo “multipulsos” é usado para retificadores que operam em sistemas trifásicos e que tenham mais de 6-pulsos de corrente por ciclo. O método multipulsos envolve conversores múltiplos conectados de tal forma que as harmônicas geradas por um conversor são canceladas pelas harmônicas geradas por outro conversor. Dessa forma, certas harmônicas são eliminadas da fonte de alimentação. Esses conversores multipulsos fornecem uma simples e efetiva técnica para redução das harmônicas produzidas no sistema de potência pelos próprios conversores. Sua utilização nas indústrias tem uma trajetória crescente. O crescimento do uso de conversores para acionamento a frequência variável estimulou o desenvolvimento do método multipulsos em aplicações de potência inferiores a 100 kW [Pice, 1996]. Os sistemas multipulsos apresentam duas grandes vantagens.

- Redução da corrente harmônica CA de entrada; e
- Redução da oscilação da tensão CC de saída.

A redução do conteúdo harmônico da corrente CA na entrada é importante se levar em conta o impacto que ele causa ao sistema de potência como um todo. Um conversor analisado de forma isolada não causa distúrbios no sistema, entretanto, quando se soma a outros, pode comprometer bastante o sistema. Ele também pode ser essencial para atender os limites de distorção impostos pelas normas internacionais [Pice, 1996].

O Método multipulsos é caracterizado por utilizar conversores múltiplos ou dispositivos semicondutores, com uma carga CC comum. Entretanto, a utilização de transformadores defasadores é essencial. Esses transformadores fornecem um mecanismo para o cancelamento de harmônicas de correntes pares. Em princípio, o método multipulsos pode ser com conversores multipulsos, mas com cargas separadas (Figura 2.16). O circuito mostra duas cargas separadas, alimentadas por dois conversores, cada um deles tendo seu próprio transformador. Um conversor em ponte é alimentado por um transformador Δ/Y que produz três fases no secundário com tensões defasadas em 30° em relação à tensão de entrada de linha. O outro é alimentado por um transformador Δ/Δ , não apresentando, portanto, nenhuma defasagem em relação ao enrolamento primário do transformador [Pice, 1996].

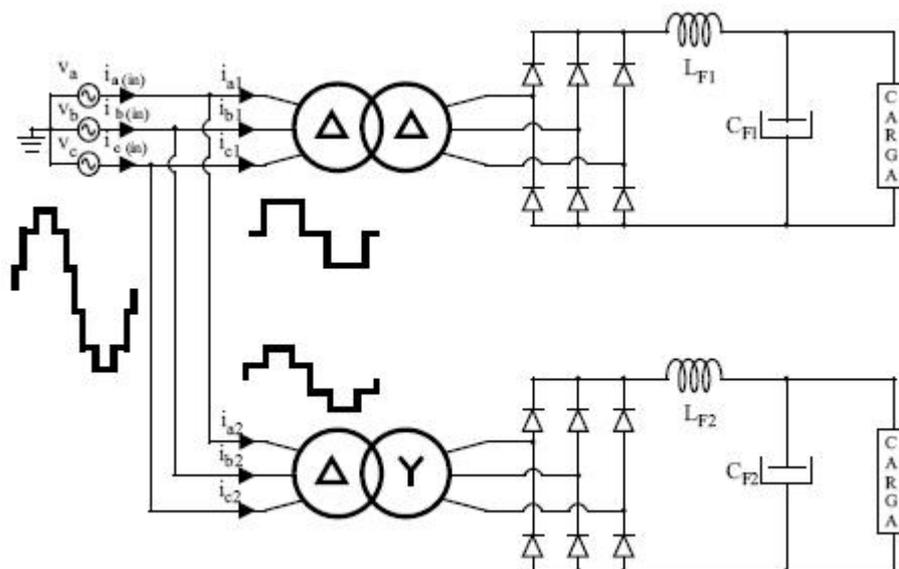


Figura 2.16 – Dois conversores 6-pulsos separados combinando para formar um conversor 12 pulsos alimentando 02 cargas iguais.

Referindo à figura 2.17, idealmente, a corrente fundamental de cada conversor estará em fase com as tensões do sistema alimentador. Entretanto, algumas componentes harmônicas

de corrente são diferentemente defasadas em função da ação dos transformadores utilizados. Devido ao defasamento angular entre as tensões dos enrolamentos secundários dos transformadores, as correntes de uma ponte retificadora estão em oposição de fase em relação à corrente da outra ponte. Então, pode-se dizer que algumas componentes harmônicas da corrente CA de entrada de um grupo retificador são supridas pelo outro grupo retificador. Como os dois grupos retificadores alimentam a mesma carga, algumas componentes harmônicas são eliminadas da rede CA trifásica de alimentação. Considerando que as amplitudes das correntes CA de entrada i_1 e i_2 sejam apropriadas, as 5ª e 7ª harmônicas de corrente são canceladas e o sistema enxerga uma corrente CA de 12-pulsos. Em situações práticas, as cargas não serão precisamente balanceadas. Entretanto, essa técnica possibilita obter um reduzido conteúdo harmônico de corrente no sistema. Vários métodos de se obter conversores CA-CC de 12, 18 e 24 pulsos são ilustrados mais adiante.

O desempenho de todos os métodos com relação às componentes harmônicas de corrente CA é o mesmo, uma vez que o princípio básico de operação dos conversores múltiplos é obtido considerando ideais os componentes do sistema CA trifásico. Arranjos especiais podem incluir conexões em série ou paralelo de conversores multipulsos. Entretanto, deve-se atentar que a utilização de transformador de interfase é quase sempre necessária (Figura 2.17), visando manter o dispositivo semicondutor conduzindo por 120°, e conseqüentemente obter o correto balanceamento da corrente de carga entre os grupos [Pice, 1996].

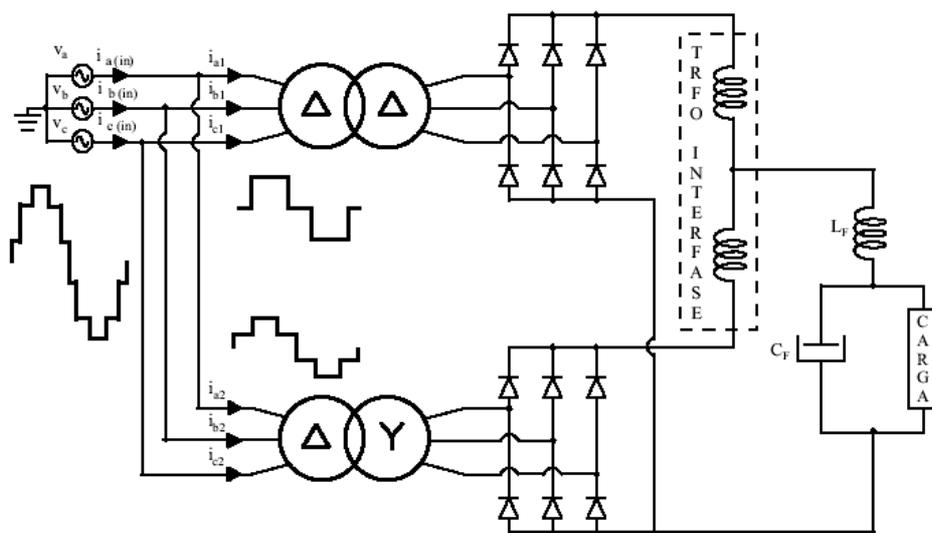


Figura 2.17 – Dois conversores 6-pulsos separados combinando para formar um conversor de 12-pulsos alimentando a mesma carga.

Fonte: [Pice, 1996].

Existem arranjos de conversores que não utilizam transformadores de interfase. Nesse caso, os conversores são projetados de maneira que um grupo retificador influencia na operação do outro grupo, e o período de condução dos dispositivos semicondutores não é limitado a 120° , (Figura 2.18) [Dahono, P. A.; Halimi, B. & Matinius, S., 2002].

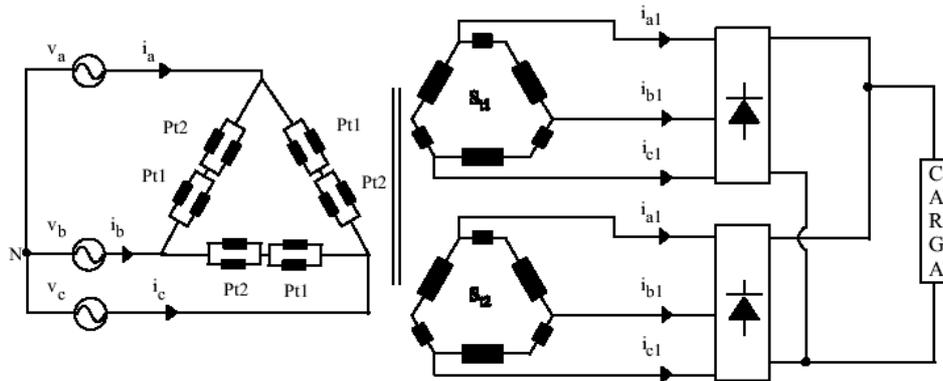


Figura 2.18 – Arranjo de conversores sem utilizar o Transformador de Interfase
Fonte: [Dahono, Halimi, Matinius, 2002]

Para atender às referidas normas, o conversor *Boost* tornou-se uma opção clássica para operação como pré-condicionador retificador de elevado fator de potência para pequenas cargas. Ou seja, o *Boost* é utilizado em um primeiro estágio para corrigir o fator de potência (impondo corrente senoidal) e depois vem o conversor principal [Dixon, 1988], [Redl, Erisman, 1994], [Redl, 1995], [Maksimovic, 1994], [Wakabayashi, Canesin, 2002]. Entretanto, em aplicações que requerem potências mais elevadas, na ordem de dezenas de kW, as estruturas trifásicas são predominantes, o que torna o conversor *Boost* inadequado, devido ao seu elevado volume e custo, bem como aos problemas relacionados com interferências eletromagnéticas e reduzida confiabilidade operacional [Kolar, Sun, 2001], [Moschopoulos *et al*, 1999], [Kim *et al*, 2001], [Nakamura *et al*, 2001].

Para sistemas retificadores com elevadas potências, os retificadores de 12-pulsos e seus múltiplos têm se apresentado como ótimas soluções. Além de garantir um bom desempenho e robustez do conjunto retificador, possibilitam a redução das distorções harmônicas de corrente de entrada, e, conseqüentemente, a obtenção de um elevado fator de potência. Entretanto, esses retificadores necessitam da utilização de transformadores ou autotransformadores defasadores, e transformadores especiais de interfase. O uso desses transformadores, apesar da robustez da estrutura, torna os retificadores muito volumosos, pesados e de elevado custo, limitando suas aplicações quando são requeridas algumas

dezenas de kW [Pice, 1996], [Schaffer, 1965],[April, Olivier, 1982], [Choi, Enjeti, Paice, 1996].

A utilização do transformador de interfase, além de elevado custo, apresenta uma alta complexidade de projeto, devido à preexistência de tensões harmônicas no sistema de alimentação, o que provoca mudanças na tensão do barramento CC [Oliver *et al*, 1995], [Guimaraes, Oliver, & April, 1995], [Rendusara *et al*, 1995]. Para compensar a existência dessas harmônicas preexistentes em sistemas desequilibrados, torna-se necessária a utilização de filtros, aumentando ainda mais o custo e o volume da estrutura retificadora. Neste contexto, torna-se desejável a eliminação desses transformadores.

Perseguindo o objetivo de se eliminar o transformador de interfase, Dahono, Halimi, e Matinius, (2002) propuseram uma estrutura de transformador defasador bastante simples, com vários enrolamentos secundários conectados em Y e Δ (Figura 2.19). Tal configuração é capaz de melhorar a divisão da corrente de carga entre os dois grupos retificadores, tornando desnecessária a utilização do transformador de interfase. Entretanto, para essa topologia ser capaz de compor a forma de onda da corrente na entrada CA, torna-se necessário um transformador de potência com 1,16 vezes a potência de saída. O alto custo do transformador eleva o custo do sistema retificador. A utilização do transformador aumenta o seu peso e volume.

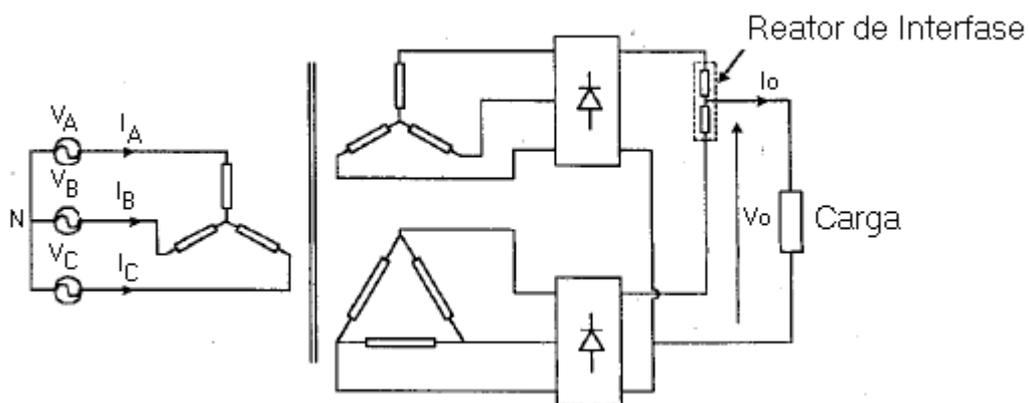


Figura 2.19 – Retificador 12 Pulsos convencional
Fonte: [Dahono, Halimi, Matinius, 2002]

2.4.2.5 Retificadores trifásicos híbridos.

O retificador híbrido possui uma estrutura formada pela associação de um retificador de 6-pulsos não-controlado em paralelo com conversores controlados (chaveados), com características de fonte de corrente de entrada [Gomes et al, 2005]. Esta estrutura permite melhorar a eficiência e aumentar a robustez dos retificadores não-controlados, devido à capacidade que os conversores controlados têm de impor correntes de entrada na forma de onda desejada.

Essa união possibilita a criação de um retificador que opera com reduzida distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I), em conformidade com as normas vigentes, IEEE-519-1992 e IEC61000-3-4. Vale ressaltar que esses retificadores não devem ser classificados como filtros ativos, pois os retificadores controlados processam parte da potência ativa entregue à carga, enquanto os filtros ativos processam apenas energia reativa.

Nesse contexto, Enjeti e Jahong (2002), propuseram um retificador multipulsos utilizando conversores *Boost* para impor a corrente de entrada CA na forma senoidal, conseguindo assim uma tensão controlada no barramento CC (Figura 2.20).

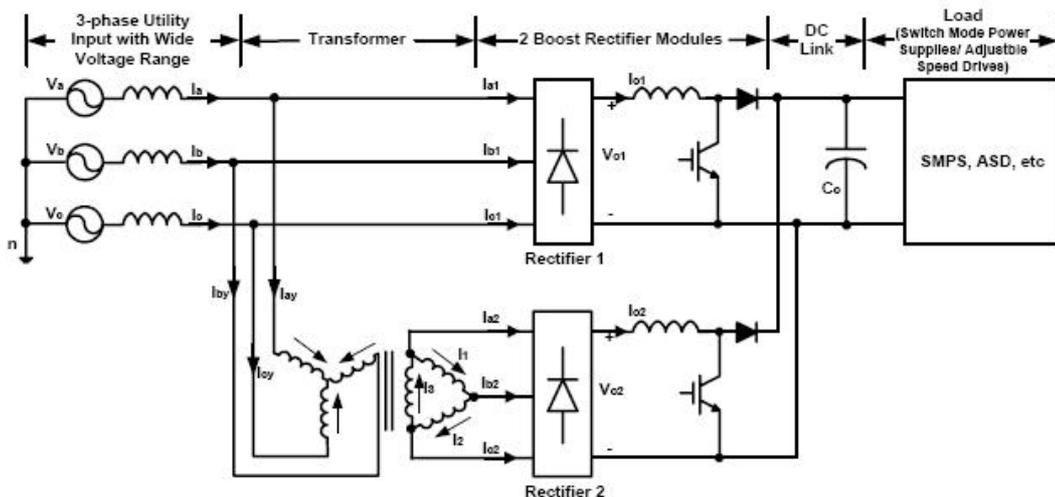


Figura 2.20 – Retificador híbrido multipulsos utilizando conversores *Boost*.
Fonte: [Enjeti e Jahong, 2002].

A estrutura proposta divide a potência, sendo processada 50% da potência total por cada *Boost*, e um transformador de potência igual a 0,6169 da potência de saída, limitando a sua aplicação para potências maiores, em função do elevado custo.

2.5 SOLUÇÃO ADOTADA

No sentido de oferecer uma opção alternativa que possa contornar os problemas relacionados com as distorções harmônicas verificados ao longo da nossa pesquisa, uma nova topologia de Retificador Híbrido Multipulsos – RHM foi apresentada. Essa estrutura possibilita a obtenção de elevado fator de potência e reduzida taxa de distorção harmônica de corrente, sendo conhecido como RHM [Gomes *et al*, 2005].

A proposta de um retificador híbrido multipulsos com corrente de alimentação pré-estabelecida visa principalmente impor a forma de onda da corrente de entrada adequada aos conversores controlados, de forma a contribuir com apenas uma pequena parcela da potência total requerida pela carga. Com isso, obtém-se uma operação do grupo retificador com fator de potência elevado e reduzida taxa de distorção harmônica na corrente de entrada, tornando a estrutura bastante compacta com elevado rendimento. Essa estrutura proposta é ideal para aplicações de potências elevadas, na ordem de 50 kW. Assim, é possível obter estruturas retificadoras convencionais de 6-pulsos operando conjuntamente com conversores bastante compactos, impondo correntes CA de alimentação com reduzida DHT_I , obedecendo às exigências impostas pelas normas IEEE-519-1992 e IEC-6100-3-4.

Essa nova concepção de retificador híbrido (Figura 2.21) apresenta uma estrutura composta por um retificador trifásico de 6-pulsos não-controlado convencional com um estágio CC-CC (Ret-1) alimentado diretamente pela rede, associado em paralelo com três conversores monofásicos controlados (Conversor *Boost*) ligados a cada fase (Ret-2), alimentados por um transformador isolador. Os retificadores controlados *Boost* são capazes de compor 12 pulsos ou mais da corrente de alimentação, garantindo um elevado fator de potência na entrada com reduzida DHT_I na corrente de entrada. Essa nova concepção de retificador híbrido multipulsos de elevada potência e reduzida DHT_I de entrada, tal como os retificadores de 12 pulsos e multipulsos convencionais, porém, sem a necessidade da utilização de transformadores defasadores [Gomes, Simões, Canesin, 2005].

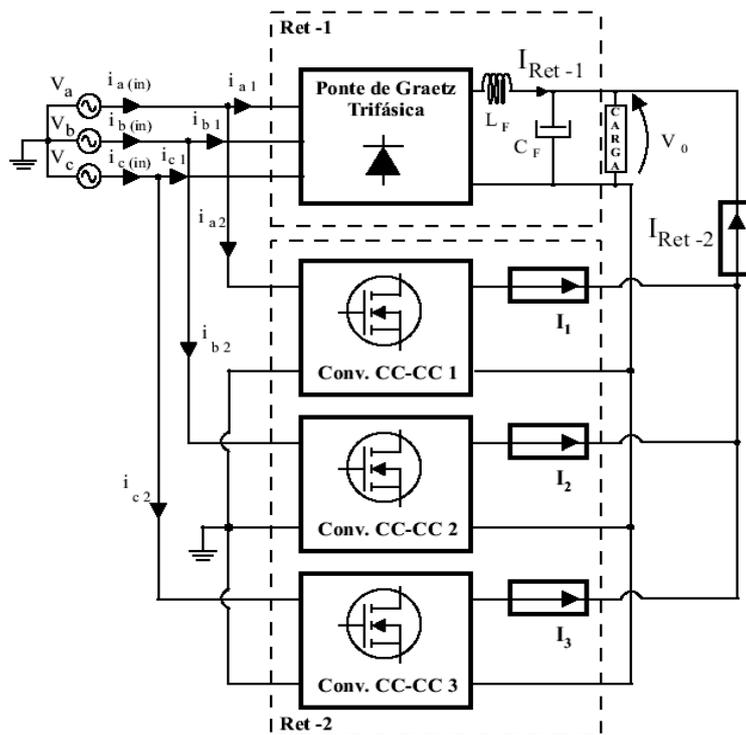


Figura 2.21 – Diagrama de Blocos Esquemático do Novo Retificador Híbrido Multipulsos.
Fonte: [Gomes, Simões, Canesin, 2005].

A característica importante a ser ressaltada da estrutura proposta é o fato de que o conjunto de retificadores controlados (Ret-2) processarem entre 20% e 33% da potência total de saída, dependendo da DHT_I da corrente de entrada desejada. Isso significa que para um DHT_I de 5% na corrente de entrada, os retificadores controlados deverão processar no máximo 33% da potência nominal, sendo o restante processado pelo retificador não-controlado.

Esta característica operacional do retificador híbrido multipulsos proposto torna-o bastante atrativo sob o ponto de vista técnico, científico e comercial, tratando, portanto de uma concepção inovadora. Esta solução é altamente recomendada para aplicações de altas potências.

Destaca-se que os retificadores controlados processam apenas parte da potência total de saída, obtendo assim um elevado fator de potência de entrada e DHT_I reduzida. Com isso, a estrutura dos retificadores híbridos se torna ideal para aplicações de potências mais elevadas, dezenas de kW, substituindo os retificadores de 12-pulsos convencionais que utilizam transformadores de interfase e/ou transformadores defasadores [Gomes, 2005].

2.6 A DESENVOLVER

Considerando-se as diversas soluções técnicas apresentadas para a redução da DHT_I e correção do fator de potência e levando-se em conta as principais vantagens e desvantagens que cada uma oferece, esta dissertação de mestrado propõe analisar o comportamento do novo Retificador Híbrido Multipulsos – RHM com alto fator de potência e reduzida taxa de distorção harmônica total na corrente de entrada (DHT_I), quando submetidos a situações em que a rede supridora forneça energia com índices de distorção diferentes das condições normais de operação.

A solução proposta foi desenvolvida e testada em laboratório, analisados os resultados de simulações e ensaios experimentais de um protótipo de um RHM utilizando o conversor *Boost* (Figura 2.22). Os resultados dos estudos apresentados validarão a proposta do RHM verificando o comportamento do retificador operando com distorções presentes na rede no contexto da qualidade da energia elétrica.

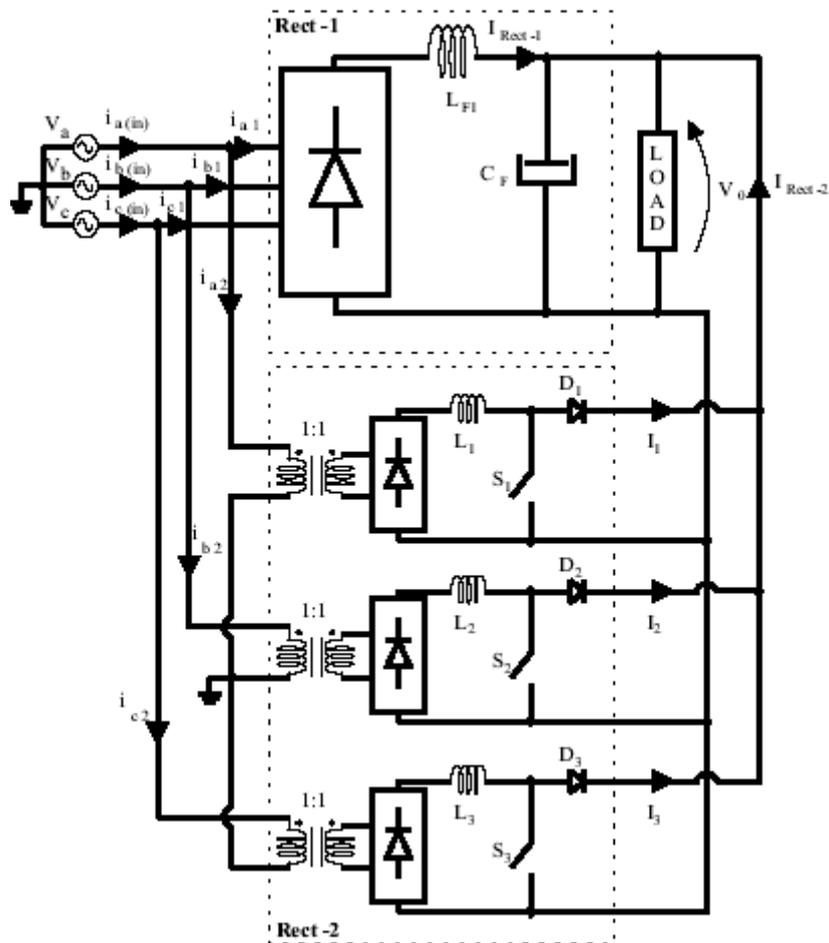


Figura 2.22 – RHM utilizando o Conversor Boost.
Fonte: [Gomes, Coelho, Simoes, Canesin, de Freitas, 2005].

3. ESTUDO DO RETIFICADOR

No capítulo anterior foram apresentados os problemas associados ao funcionamento de cargas não-lineares do sistema de distribuição de energia, no contexto da qualidade da energia. Foram apresentadas também as soluções possíveis, bem como as vantagens e desvantagens de cada uma, consolidando assim a proposta que se tornou objeto de estudo neste trabalho.

Os retificadores controlados são capazes de compor os 12 pulsos ou mais de corrente CA, garantindo elevado fator de potência e reduzida DHT_I da corrente de entrada, da mesma forma que os retificadores multipulsos convencionais. Entretanto, esse retificador proposto dispensa a utilização de transformadores defasadores e transformadores de interfase como os retificadores multipulsos convencionais.

A principal característica desse retificador é que ele processa apenas uma pequena parte da potência total requerida pela carga, de 20% a 45%, dependendo da DHT_I desejada, tornando-o bastante atrativo do ponto de vista técnico, científico e comercial, uma vez que ele agrega a robustez, confiabilidade dos retificadores não-controlados, com a operação dos conversores chaveados, reduzindo assim o seu volume e peso.

Este capítulo apresenta o laboratório onde foram realizados os experimentos para validar a proposta. Também o protótipo utilizado nesses experimentos é descrito, bem como os modelos desenvolvidos no simulador *SPICE* dos ensaios a serem realizados.

Em seguida, apresentam-se os procedimentos para a realização dos ensaios. Destaca-se que os resultados e a discussão serão apresentados no capítulo 4.

3.1 DESCRIÇÃO DO LABORATÓRIO

O protótipo (Figura 3.1) foi totalmente desenvolvido no laboratório Núcleo de Eletrônica de Potência – NUEP da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Os ensaios para verificação do correto funcionamento foram todos desenvolvidos pela UFU.

Após essa fase, o protótipo foi trazido para o laboratório de Qualidade da Energia do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (Figura 3.2), onde foram realizados os ensaios do retificador, no sentido de verificar o seu desempenho no contexto da qualidade da energia, que é o foco desse trabalho de mestrado.

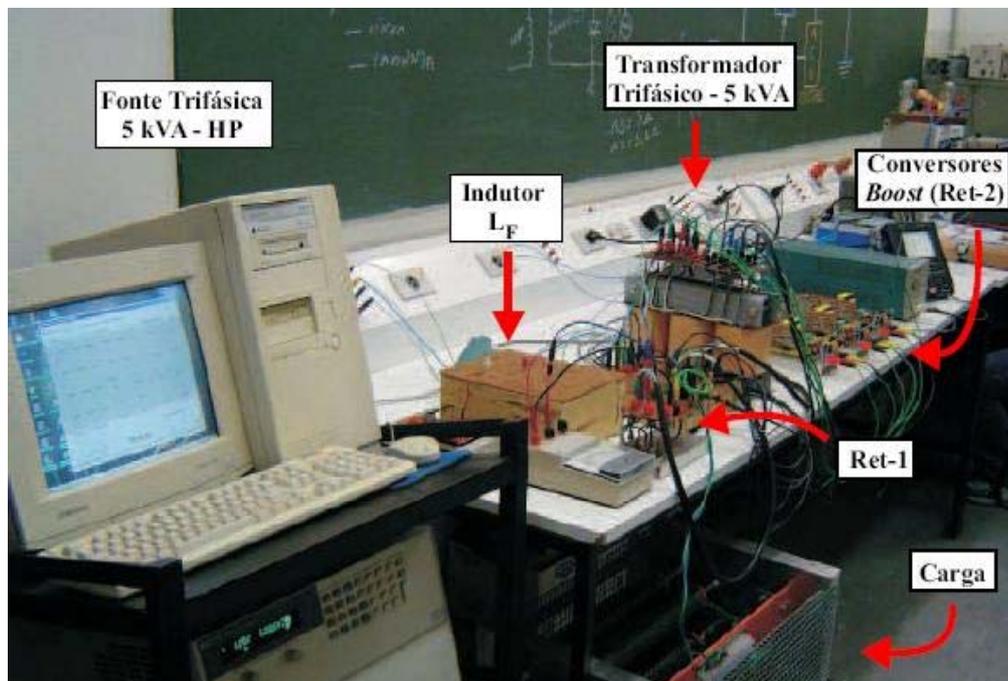


Figura 3.1 – Ensaio no laboratório da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.



Figura 3.2 – Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica – UnB.

O principal equipamento disponível no laboratório é a fonte de alimentação *California Instruments* – série IX (Figura 3.3), associada a um aplicativo baseado na plataforma Windows que permite a programação das diversas funções. As principais características estão relacionadas a seguir.

- Potência nominal de 30 kVA;
- Possibilidade de fornecimento de níveis de tensão CA e CC de 0 a 300 V;
- Impedância de saída programável com baixa distorção;
- Capacidade de medição padrão, aquisição e análise das formas de onda;
- Capacidade de geração de transitórios e formas de ondas desejadas;
- Frequência de saída na faixa de 16 Hz e 500 Hz;
- Composição modular, com 06 blocos de 5 kVA montados em um *Rack* vertical (Figura 3.2)
- Definição de uma forma de onda com especificação do seu conteúdo harmônico;
- Definição de formas de onda livre;
- Captura de formas de onda de tensão e corrente de saída;
- Análise do conteúdo harmônico da tensão e corrente;
- Medição e armazenamento da tensão, corrente, potência ativa e fator de potência.



Figura 3.3 – Fonte *California Instruments* – Série IX.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Durante os estudos realizados no laboratório da Universidade Federal de Uberlândia – UFU foram desenvolvidos dois protótipos do RHM proposto, operando com correntes CA de alimentação de 12 pulsos impostas. O primeiro a ser construído foi um RHM de 3 kW utilizando conversores *Boost* modificados para compor o grupo retificador 2 (Ret.-2).

Com a implementação deste protótipo foi possível aprimorar o circuito de controle utilizado e mais dois protótipos foram implementados. O segundo protótipo construído foi um RHM de 6 kW utilizando 03 conversores *Boost* monofásicos ligados em paralelo a cada fase do retificador não-controlado de 6-pulsos, alimentados através de transformadores isoladores. A Figura 3.4 ilustra a descrição acima, identificando cada um dos componentes do retificador híbrido multipulsos, montado na bancada do laboratório de qualidade da energia da Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

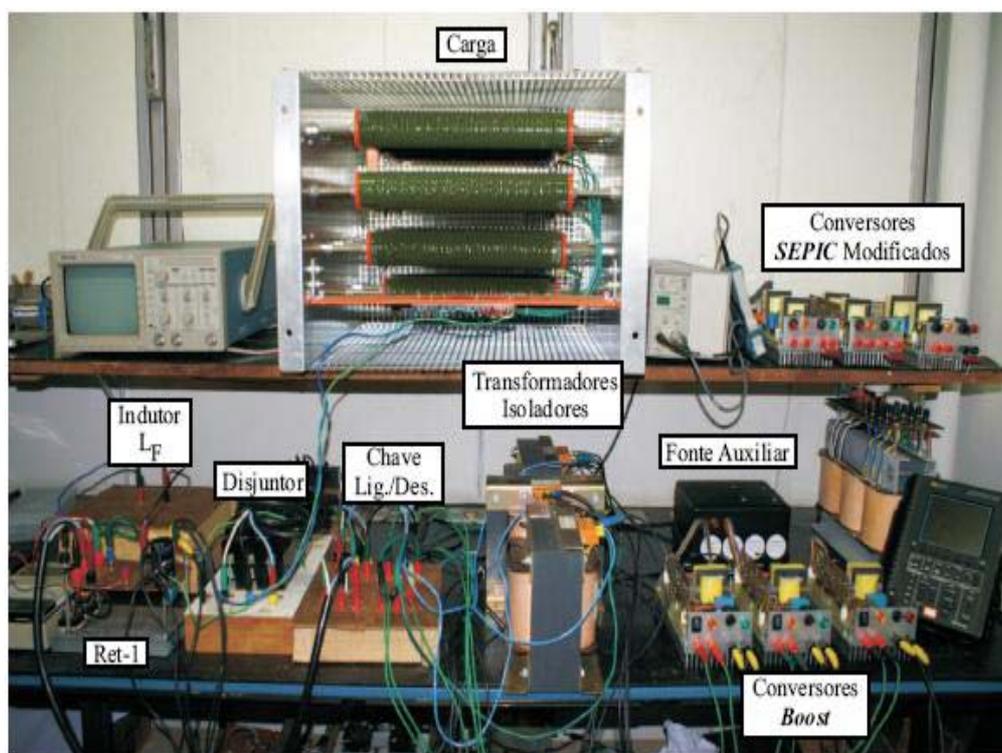


Figura 3.4 – Protótipos desenvolvidos na Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Conforme apresentado no capítulo 2, o equipamento escolhido para o desenvolvimento dessa dissertação foi este segundo retificador híbrido multipulsos de elevado fator de potência e reduzida DHT_I (RHM) utilizando conversores *Boost* de potência nominal igual a 6 kW.

O grupo retificador é composto por um retificador de 6-pulsos não-controlado clássico, associado a três conversores monofásicos *Boost*, capazes de compor os 12-pulsos ou mais da corrente de alimentação, garantindo um elevado fator de potência e reduzida DHT_I da corrente de entrada, assim como observado nos retificadores multipulsos convencionais, porém sem a necessidade de se utilizar os transformadores defasadores. A figura 3.5 mostra o protótipo montado na bancada do laboratório de qualidade da energia da Universidade de Brasília – UnB, durante os ensaios realizados.

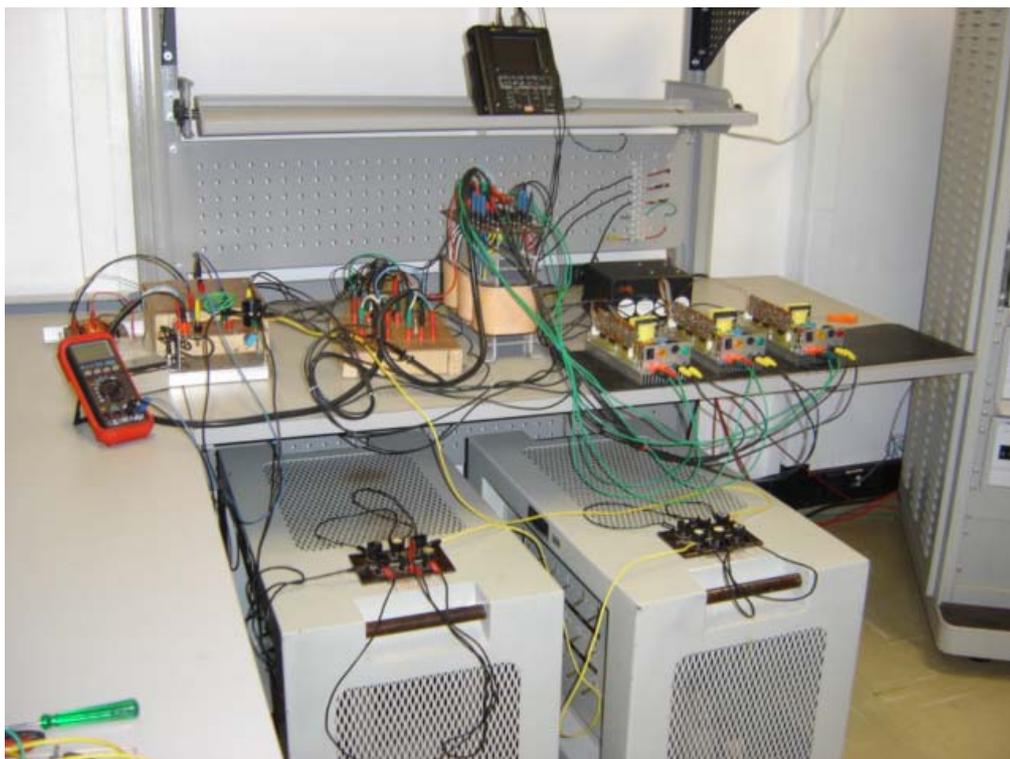


Figura 3.5 – RHM com conversor *Boost* – montado no laboratório de qualidade da energia da Universidade de Brasília – UnB.

3.2.1 Retificador de 6-pulsos não-controlados em ponte de Graetz.

O retificador de 6-pulsos não-controlado em ponte de Graetz (Ret-1) é composto por 01 ponte retificadora Toshiba 30J6P41, 01 indutor de filtro, $L_p = 15$ mH e 01 capacitor de filtro, $C_p = 470$ μ F. Tensão nominal de entrada $V_a = 127$ VCA; $V_b = 127$ VCA; $V_c = 127$ VCA; Tensão de saída $V_{(CC)} = 295$ V; Potência processada de saída $P_{out} = 4.858$ kW (81,91% da potência total processada).

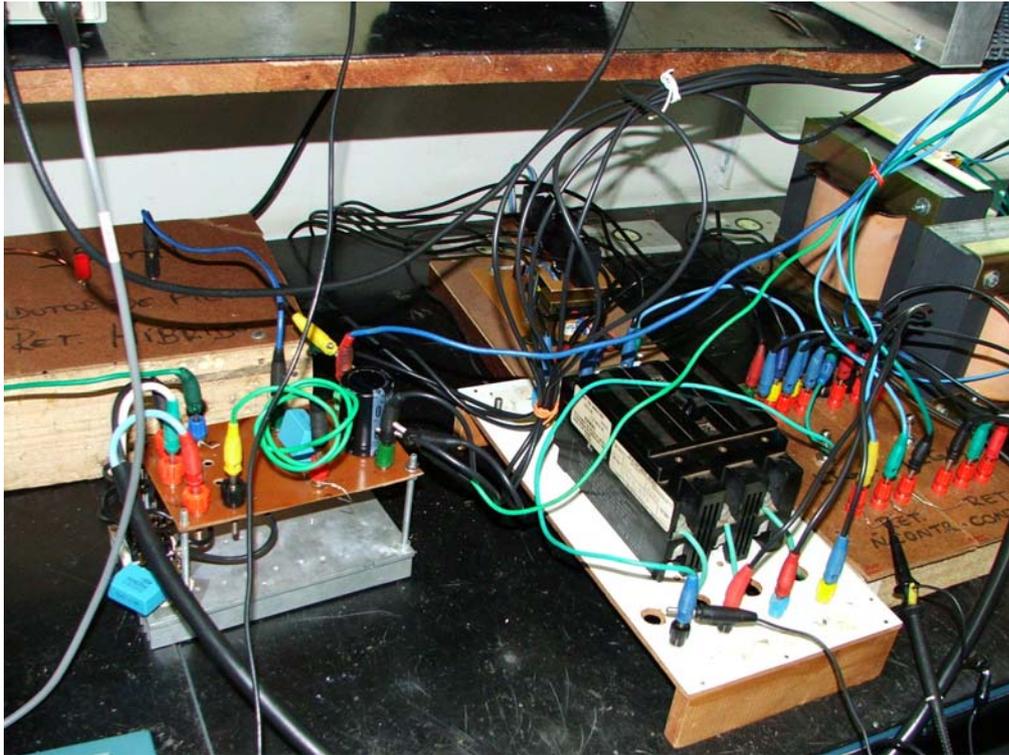


Figura 3.6 – Retificador 6 pulsos não-controlados de ponte de *Graetz*.

3.2.2 Retificadores controlados.

Os conversores chaveados utilizados para compor o grupo retificador 2 (Ret-2) são 03 conversores *Boost*, sendo que cada conversor é associado em paralelo com cada braço do retificador de 6-pulsos. Cada conversor *Boost* é composto por 04 diodos HFA15TB60 em ponte, 01 indutor de filtro de 1,5 mH, 01 capacitor de filtro $C = 47\mu$ F, 01 tiristor IRFP460, e 01 diodo rápido MUR1560. Tensão nominal de entrada $V_a = 127$ VCA; $V_b = 127$ VCA; $V_c = 127$ VCA; Tensão de saída $V_{(CC)} = 295$ V; Potência processada de saída $P_{out} = 1.073$ kW (18,09% da potência total processada).

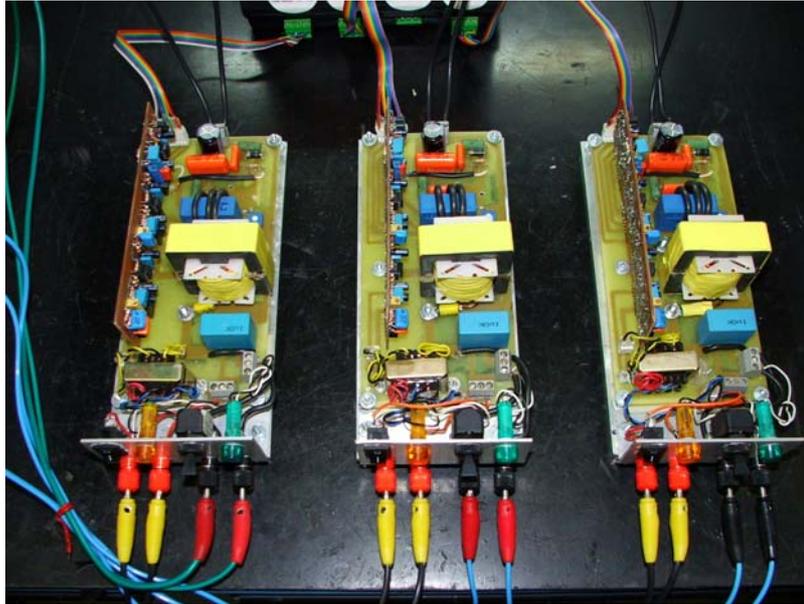


Figura 3.7 – Conversores monofásicos *Boost*.

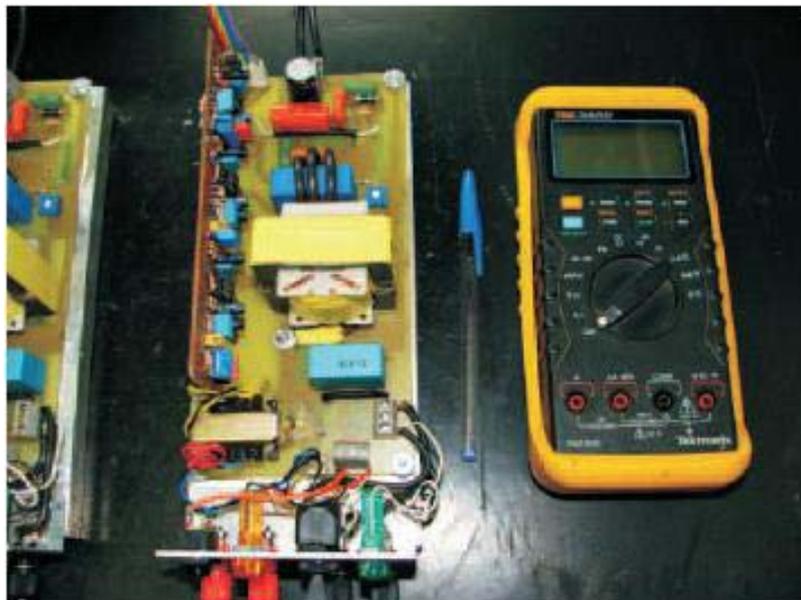


Figura 3.8 – Conversor monofásico *Boost*.

3.2.3 Estratégia de Controle.

A estratégia de controle implementada é descrita, considerando-se apenas a fase A, uma vez que o sistema de controle é idêntico para as fases A, B e C. Neste contexto, a técnica de controle utilizada se baseia na imposição da forma de onda da corrente de linha de entrada com baixa DHT_l e, conseqüentemente, elevado fator de potência (FP). Para impor a forma de onda da corrente CA de alimentação desejada, a estratégia de controle se concentra em estabelecer a melhor relação entre a corrente i_{al} , do retificador convencional

de 6-pulsos (Ret-1), e a corrente de linha de entrada i_{a2} do retificador controlado (Ret-2). Dessa maneira, obtém-se uma corrente de linha de entrada $i_{a(in)}$ com baixa DHT_I , e elevado fator de potência. Com a utilização de indutor de filtro bem grande no lado CC do Ret-1, pode-se afirmar que $I_{IP} = I_{LF}$, portanto, a estratégia de controle se concentra em estabelecer a melhor relação entre a corrente I_{Ret-1} , do I_{Ret-2} , e a corrente de entrada i_{a2} do retificador controlado Ret-2. Se a corrente de linha de entrada $i_{a(in)}$ de 12-pulsos é desejada, a estratégia de controle apresentada na figura 3.9 deve ser implementada. Para compor a forma de onda de corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$, uma amostra da tensão fase-neutro v_a deve ser retificada e comparada com os níveis de tensão CC, desta maneira é gerada uma forma de onda quadrada sincronizada com a tensão v_a , para impor a corrente i_{a2} , conforme mostrado na figura 3.10. A tensão de referência V_{REF} consiste na forma de onda de referência de corrente e pode ser fornecida por dispositivos analógicos ou digitais.

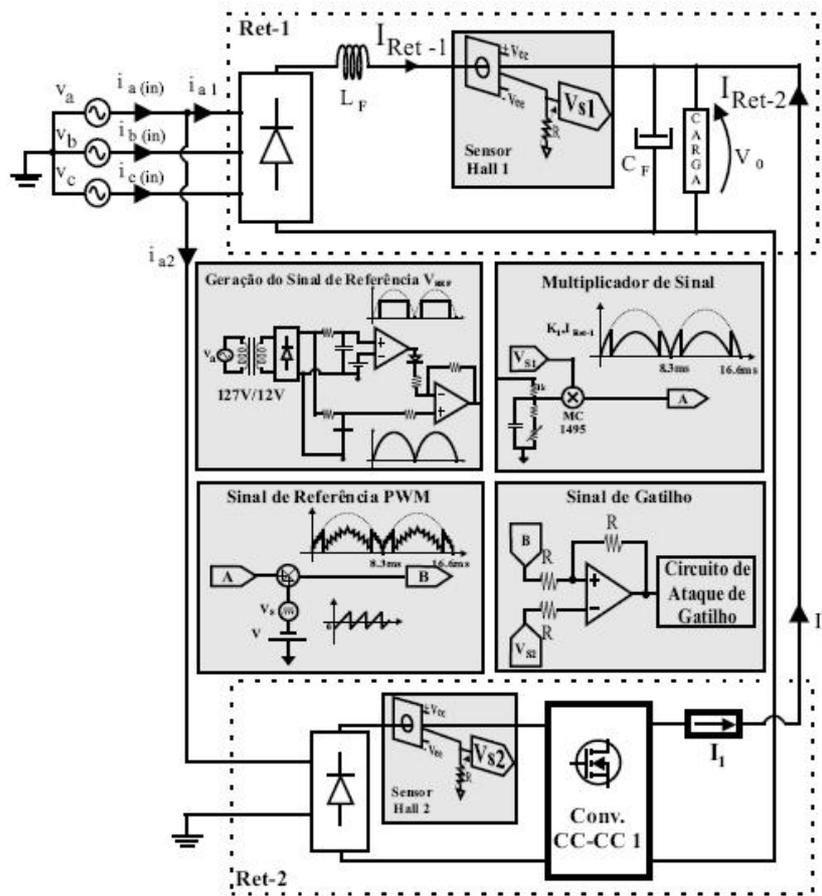


Figura 3.9 – Diagrama de blocos esquemático da estratégia de controle PWM em malha fechada – Corrente de 12-pulsos imposta

Fonte: [Gomes, 2005].

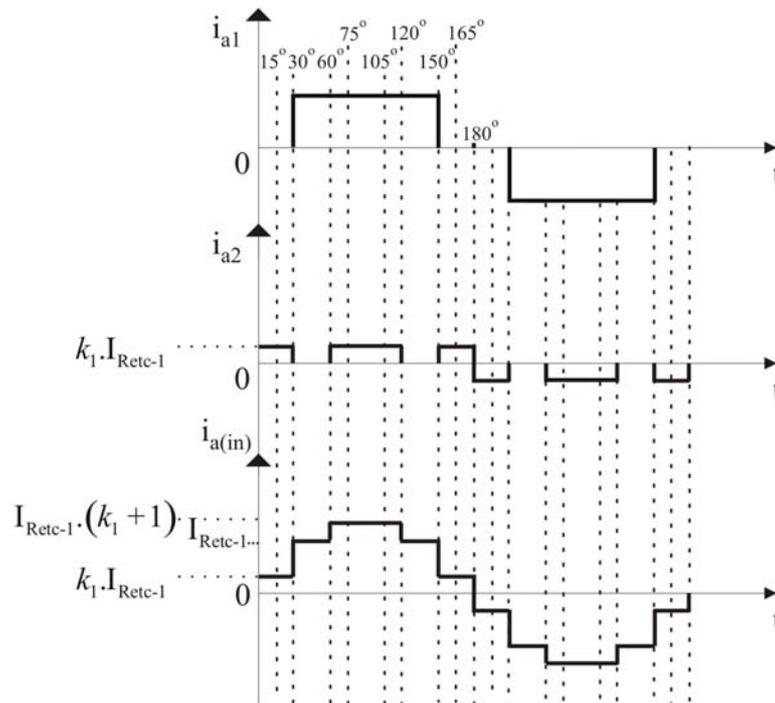


Figura 3.10 – Forma de onda teórica da corrente de entrada i_{a1} e i_{a2} .
 Fonte: [Gomes, 2005].

A tensão V_{REF} é multiplicada por uma fração da corrente I_{Ret-1} do Ret-1 e é adicionada a uma forma de onda de tensão *dente de serra* V_S . Desta maneira, o sinal de referência de tensão V_{REF} é comparado com a corrente através do indutor L_I do conversor CC-CC (Ret-2), para gerar o sinal de ataque de comando para o interruptor S_I . Conseqüentemente, a corrente através do indutor L_I seguirá a forma de onda da referência imposta por uma simples técnica de controle de modulação por largura de pulso – PWM (*Pulse Width Modulation*). A figura 3.11 mostra as formas de onda de corrente obtidas com essa estratégia de controle.

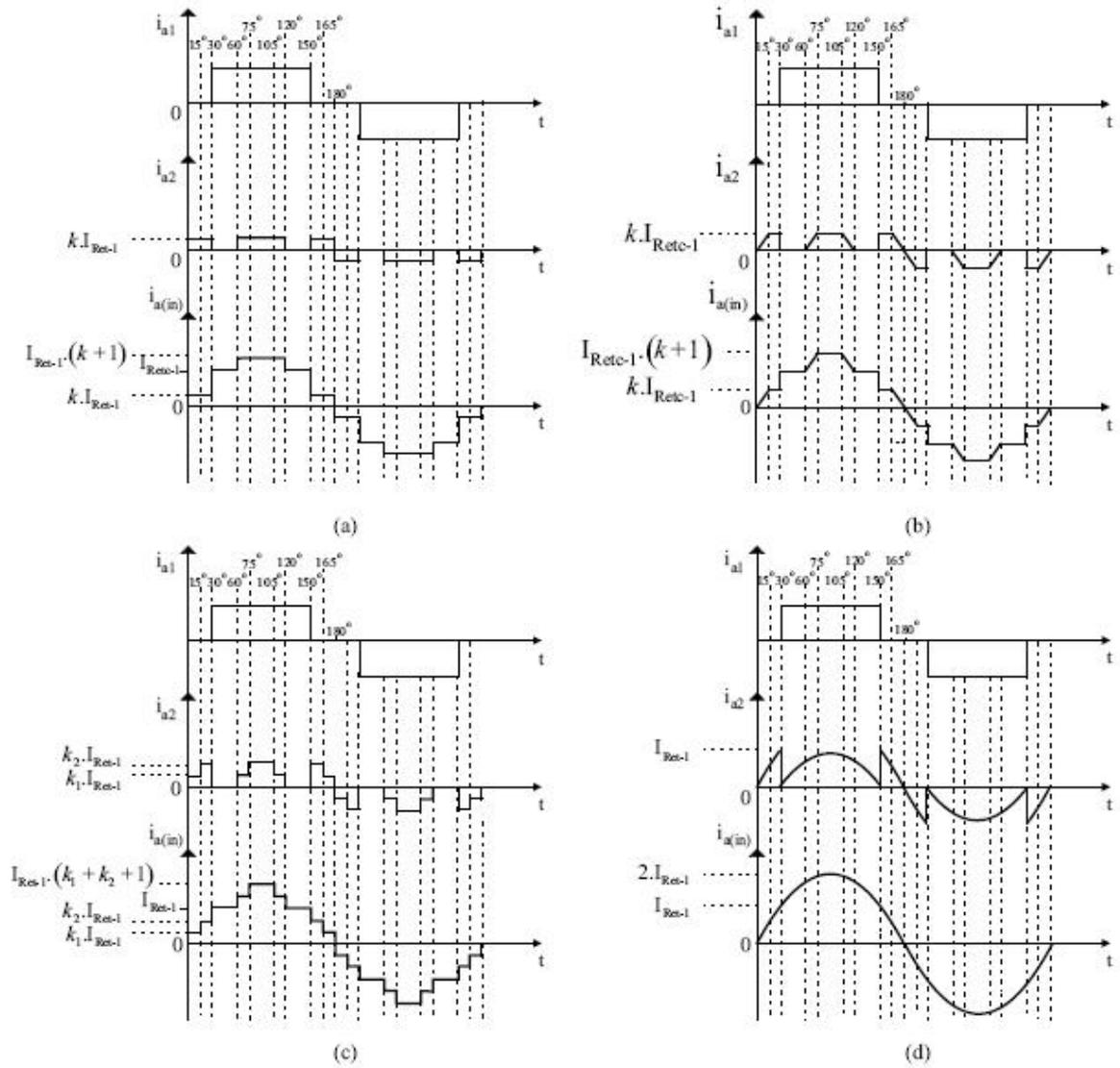


Figura 3.11 – Formas de onda teórica do RHM.
 a) 12-pulsos; b) Trapezoidal; c) 20 pulsos; d) Senoidal.
 Fonte: [Gomes, 2005].

A seguir, a figura 3.12 ilustra o controle implementado em laboratório da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, para impor correntes de 12 pulsos na rede CA de alimentação.

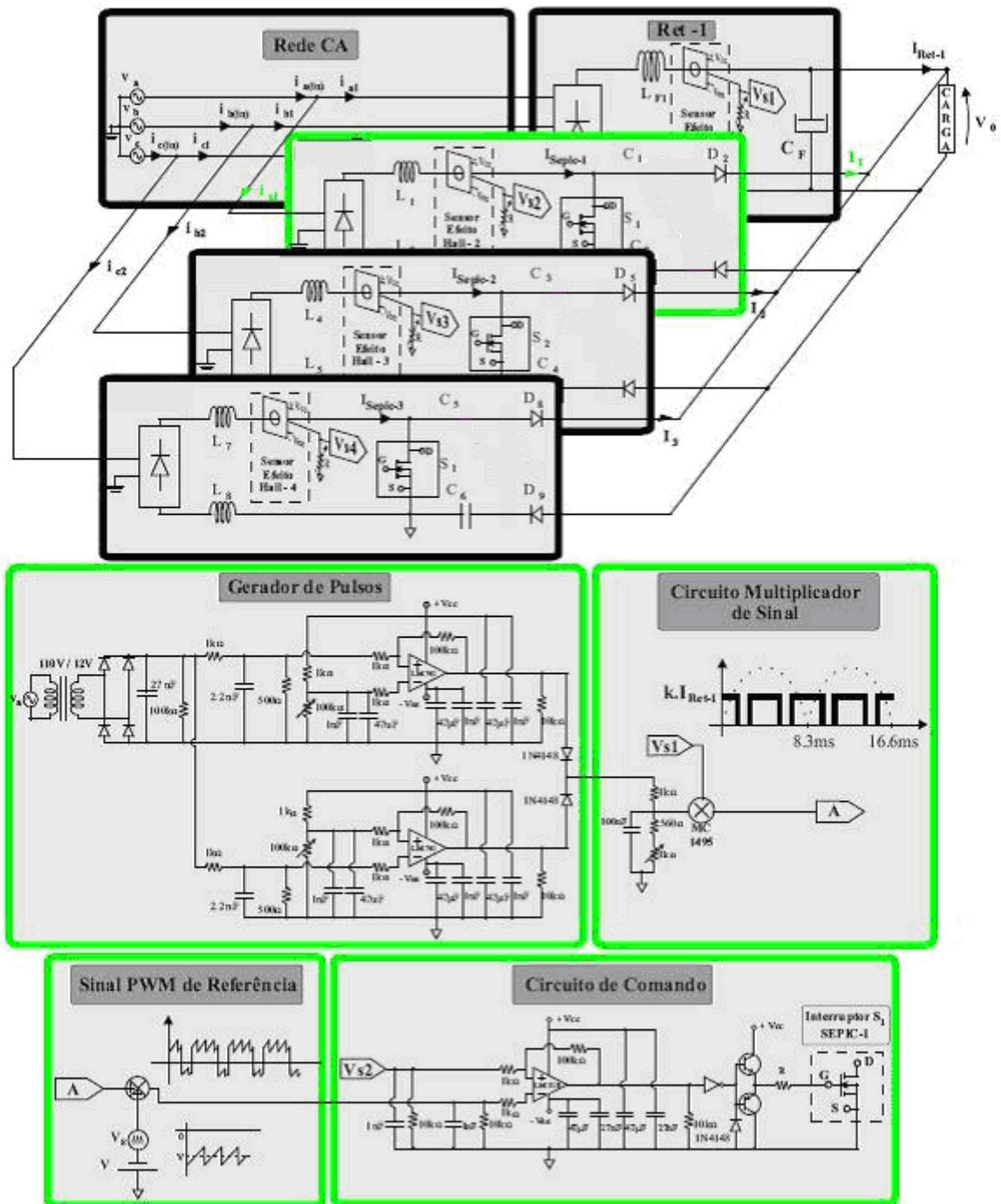


Figura 3.12 – Controle implementado em laboratório para impor correntes de 12 pulsos na rede CA de alimentação.

Fonte: [Gomes, 2005].

3.2.4 Transformador

Os conversores *Boost* são alimentados por um transformador isolador trifásico de 6 kW a seco, relação 1:1, montado sobre uma base de perfil em “U” enrijecido, com uma placa de conexões de entrada (Figura 3.13).

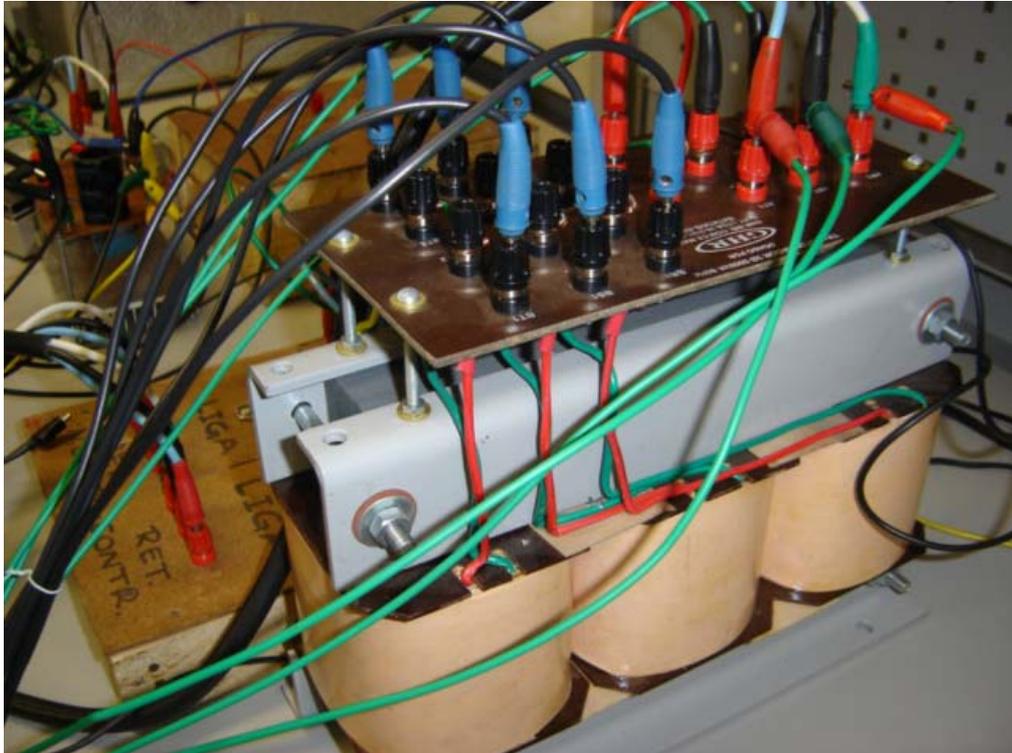


Figura 3.13 – Transformador Isolador.

3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os resultados de simulações servem para ilustrar o comportamento do Retificador Híbrido Multipulsos de elevado fator de potência – RHM no contexto da qualidade da energia, operando no modo de 12-pulsos, sendo submetido a condições onde o suprimento de energia pode variar apresentando situações não-ideais. O que se pretende mostrar aqui, é que o retificador foi concebido de maneira a não sofrer influência das variações impostas pela fonte e, também, não injetar distorções harmônicas na corrente de entrada em níveis acima do permitido pelas normas. Em cada caso estudado é apresentada uma discussão sobre os níveis de distorção verificados. Os níveis de distorção na corrente de entrada se mantêm em concordância com as recomendações impostas pelas normas, independentemente das variações possíveis que possam apresentar as redes supridoras de energia.

Posteriormente, objetivando a avaliação do desempenho do RHM diante de condições reais de operação, foram feitas simulações, inserindo níveis de distorções harmônicas de tensão de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, com 5% e 10%, individualmente na tensão de entrada e, por fim, inserindo todas harmônicas ao mesmo tempo, com 5% e 10% em todas as ordens apresentadas.

As simulações foram efetuadas utilizando o simulador *SPICE*, cuja vasta biblioteca propicia a modelagem de qualquer componente eletro-eletrônico, no domínio do tempo, e é amplamente utilizado por pesquisadores do mundo todo que atuam na área da Eletrônica de Potência.

O circuito do retificador não-controlado (Ret-1) foi modelado utilizando três fontes senoidais com um resistor de 1 m Ω em série, ligadas a uma ponte de *Graetz* de diodos Dbreak. Na saída foi ligado um filtro L_f de 15 mH em série e um capacitor C_f de 470 μ F. A carga R_1 de 12,5 Ω foi ligada nos terminais de saída V_{CC} (Figura 3.15).

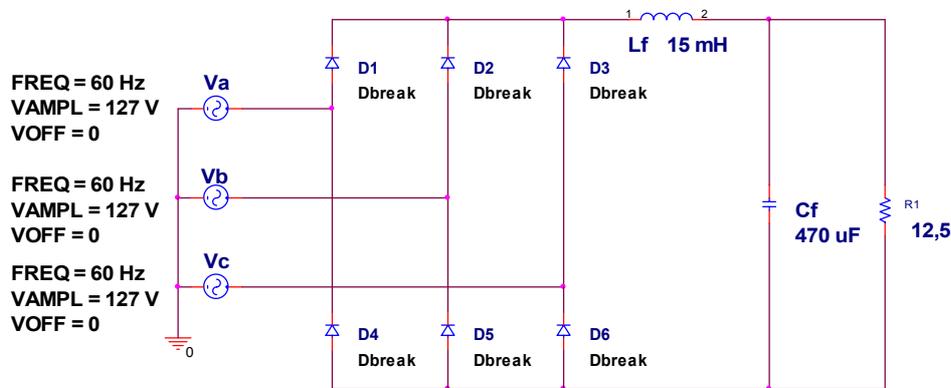


Figura 3.14 – Retificador não-controlado – Ret-1.

O transformador isolador foi modelado através da ligação de um conjunto monofásico com uma conexão Y- Y compondo um banco trifásico, com uma indutância de magnetização de 450mH, e uma resistência de 1m Ω , e uma relação 1:1 (figura 3.16).

**TRANSFORMADOR TRIFÁSICO
CONEXÃO Y-Y
INDUTÂNCIA DE
MAGNETIZAÇÃO = 450 mH**

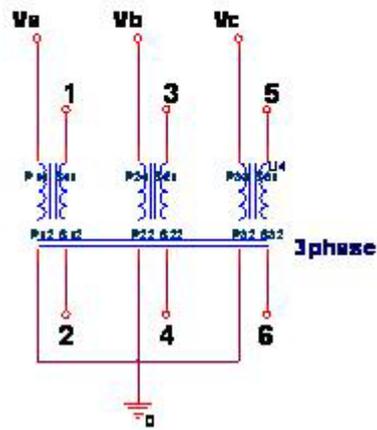


Figura 3.15 – Transformador Isolador

O grupo retificador 2, composto por três conversores *Boost* monofásicos alimentados através de um transformador trifásico Y-Y de 5 kVA, foi modelado conforme ilustrado na Fig. 3.16.

A indutância de magnetização do transformador foi ajustada em 450 mH, conforme dados obtidos em ensaios realizados no Núcleo de Eletrônica de Potência (NUEP) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Cada conversor *Boost* foi modelado com os seguintes parâmetros: ponte de *Greutz* de diodos rápidos do tipo MUR 1560 (D7 – D18), indutor de entrada de 1 mH (L1 – L3), interruptor do tipo MOSFET – IRF460 (M1 – M3), diodo de roda livre HFA 25TB60 (D19 – D21) e capacitor de filtro de saída de 47 μ F (Cf1 – Cf3).

Um circuito de amortecimento composto por um diodo rápido do tipo MUR 1560 (D22 – D24), um resistor de 47 Ω (R4 – R6) e um capacitor de 2,2 nF (C4 – C6), foi utilizado para melhorar comutação dos interruptores dos conversores *Boost*. Analogamente, um outro circuito de amortecimento RC foi utilizado para melhorar a comutação do diodo de roda livre de cada conversor *Boost*, nesse sentido, foram utilizados resistores de 47 Ω (R1 – R3) e capacitores de 2,2 nF (C1 – C3) (Figuras 3.16 a 3.18).

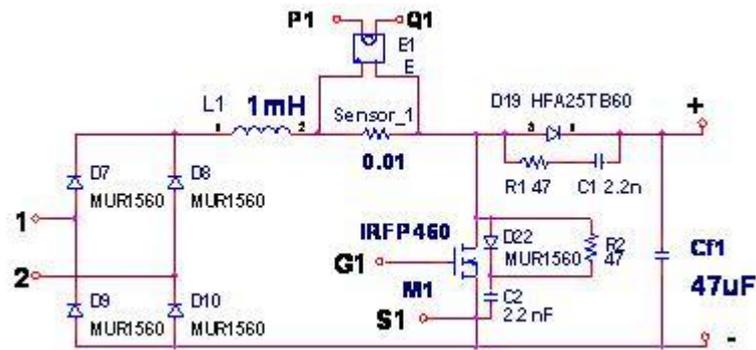


Figura 3.16 – Conversor monofásico – Fase A.

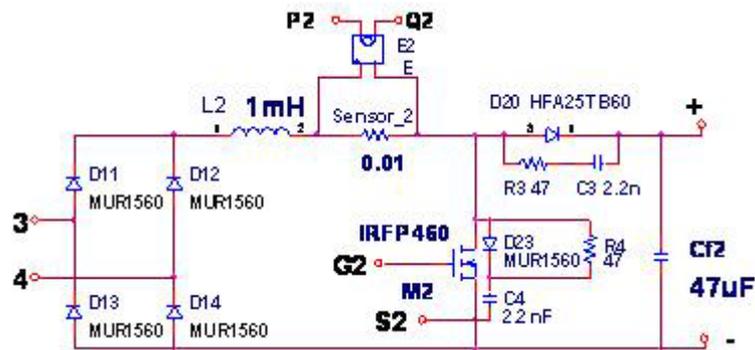


Figura 3.17 – Conversor monofásico – Fase B.

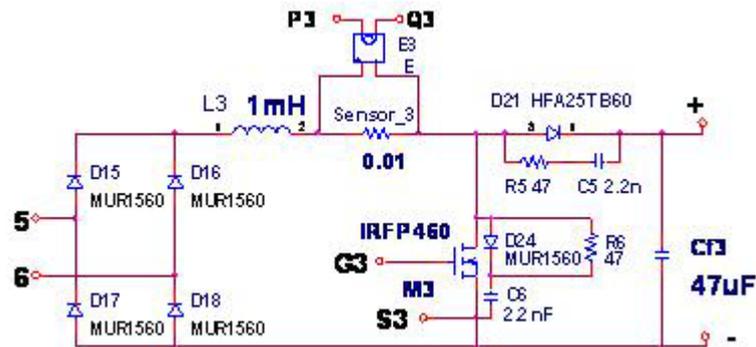


Figura 3.18 – Conversor monofásico – Fase C.

A estratégia de controle para imposição de uma corrente CA alimentação de 12-pulsos implementada nas análises realizadas por simulação, é ilustrada pelas Figuras. 3.19 a 3.21.

A fonte V1 (V_{pulse}) gera a forma de onda de referência de corrente, sincronizada com a tensão fase-neutro da fase A. A fonte V2 (V_{pulse}) gera uma forma de onda *dente de serra* que, somada à forma de onda de referência de corrente, permite obter um sinal PWM de referência de corrente. O sinal de realimentação de corrente, obtido através de sensores resistivos, é comparado com o sinal PWM de referência de corrente utilizando-se o amplificador operacional LM 318.

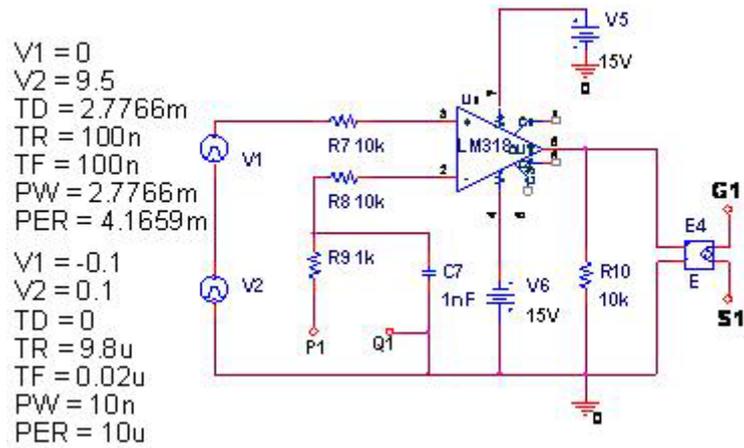


Figura 3.19 – Estratégia de controle – Fase A.

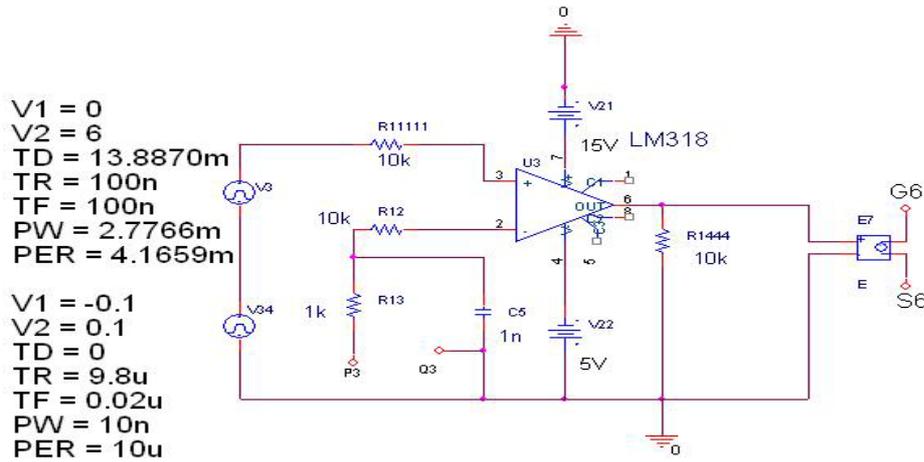


Figura 3.20 – Estratégia de controle – Fase B.

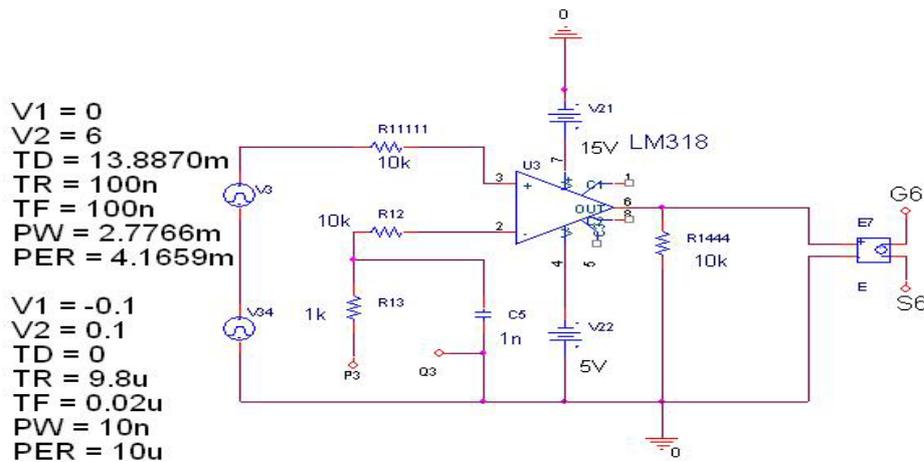


Figura 3.21 – Estratégia de controle – Fase C.

Concluindo, o mesmo circuito de controle foi utilizado para impor a forma de onda desejada nos conversores *Boost* conectados às fases B e C, considerando-se um defasamento angular de 120° entre as tensões fase-neutro.

Os retificadores foram modelados conforme descrito anteriormente, e os dados de projeto foram ajustados de acordo com os parâmetros previamente calculados. Após ajustados todos os parâmetros estabelecidos em projeto, as simulações se desenvolveram sem qualquer alteração posterior, variando apenas os níveis de distorção impostas na fonte de alimentação. Os dados relativos ao RHM e ajustados para todas as simulações realizadas são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados do RHM ajustados para as simulações.

Parâmetros Ajustados	
Especificação de Projeto	
Tensão de Saída, $V_o = 274,6$ V	
Potência Total de Saída, $P_0 = 6$ kW	
Carga resistiva, $R_0 = 12,5$ Ω	
Tensão fase-neutro (rms), $v_a = 127,3$ V	
Tensão fase-neutro(rms), $v_b = 127,3$ V	
Tensão fase-neutro(rms), $v_c = 127,3$ V	
Retificador de 6 pulsos (Ret-1)	Retificadores Controlados (Ret-1)
Ponte retificadora trifásica – Diodo <i>Dbreak</i>	Ponte de <i>Graetz</i> monofásica, MUR 1560(D7-D18)
Capacitor de filtro, $C_F = 470$ μ F	Capacitor de filtro, $C_{F1} - C_{F3} = 47$ μ F
Indutor de filtro, $L_{F1} = 15$ mH	Indutor de filtro, $L_{1-3} = 1$ mH
	Diodo roda livre HFA25TB60(D19-D21)
	Interruptores, S_1-S_3 – MOSFET – IRF460(M1-M3)
-	Circuito Amortecedor c/ Diodo rápido MUR1560(D22-D24), Capacitor 2,2nF(C4-C6)
-	Circuitos Amortecimento RC C/ Resitores de 47 Ω R1-R3) e Capacitor 2,2nF(C1-C3)
	Transformador
-	Indutância de magnetização, $L_m = 450$ mH
-	Coefficiente de acoplamento, $k = 0,9998$

As simulações foram desenvolvidas com base nos casos pré-estabelecidos, procurando simular situações possíveis de ocorrer no fornecimento de energia elétrica dentro do sistema de distribuição. Os casos previamente elaborados obedeceram a uma seqüência, conforme descrito na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Casos Estudados na Simulação e Ensaio Experimental.

ENSAIO	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS
Caso 00 – Base	Fornecimento de tensão ideal.	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V (Puramente senoidal);
Caso 01	Fornecimento de tensão distorcida em cada fase superposta à fundamental.	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 5ª ordem.
Caso 02	Idem ao caso 01.	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 5ª ordem.
Caso 03	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 7ª ordem.
Caso 04	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 7ª ordem.
Caso 05	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 11ª ordem.
Caso 06	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 11ª ordem.
Caso 07	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 13ª ordem.
Caso 08	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 13ª ordem.
Caso 09	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 5% de distorção trifásica equilibrada das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.
Caso 10	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; 10% de distorção trifásica equilibrada das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.

3.4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais buscam sintetizar o que foi feito nas simulações e, portanto, seguem os mesmos procedimentos, e obedecem à mesma seqüência das simulações. Os resultados obtidos visam levantar as formas de onda da corrente e tensão de entrada do retificador, bem como as distorções harmônicas de corrente, para estabelecer a relação teórica e prática, avaliando o comportamento do retificador nas mesmas condições simuladas. A tabela 3.3. mostra os parâmetros ajustados do protótipo ensaiado.

Tabela 3.3 – Parâmetros ajustados do protótipo do RHM.

Parâmetros Ajustados	
Especificação de Projeto	
Tensão de Saída, $V_o = 282,8$ V	
Potência Total de Saída, $P_o = 5340$ kW	
Carga resistiva, $R_o = 15$ Ω	
Tensão fase-neutro (rms), $v_a = 127,06$ V	
Tensão fase-neutro(rms), $v_b = 127,52$ V	
Tensão fase-neutro(rms), $v_c = 127,26$ V	
Retificador de 6 pulsos (Ret-1)	Retificadores Controlados (Ret-1)
Ponte retificadora trifásica, Toshiba 30J6P41	Ponte retificadora monofásica, HFA15TB60
Capacitor de filtro, $C_F = 470\mu\text{F}$	Capacitor de filtro, $C_{F1} - C_{F3} = 47$ μF
Indutor de filtro, $L_{F1} = 15$ mH	Indutor de filtro, $L_{1-3} = 1$ mH
Ponte retificadora trifásica – Diodo <i>Dbreak</i>	Ponte retificadora trifásica – Diodo <i>Dbreak</i>
-	Interruptores, S_1-S_3 – IRFP460
-	Diodos Rápidos $D_{1-6} = \text{HFA08TB60}$
-	Snuber, RC – 47 Ω e 2,2 nF
	Transformador
-	Relação de transformação 1:1
-	Potência – 6 kW

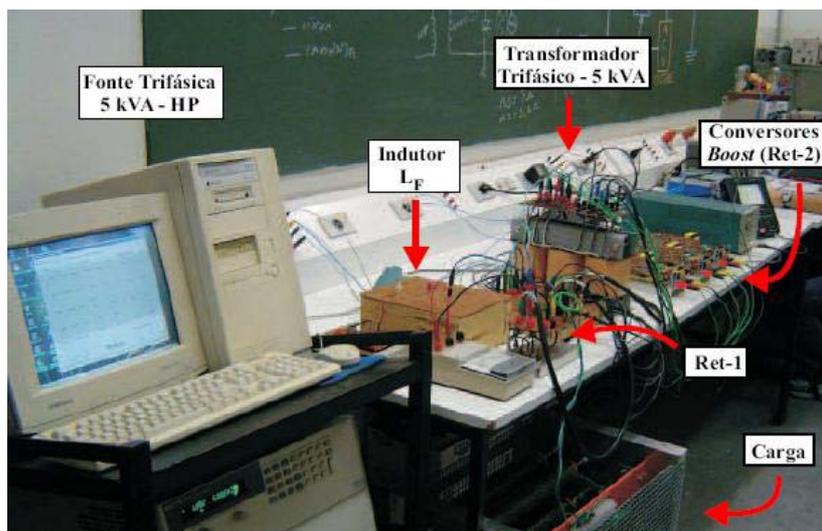


Figura 3.22 – RHM – Montado no laboratório de qualidade da energia da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

Em cada caso estudado são colhidas formas de onda de tensão e corrente de entrada, valores das correntes harmônicas, e a DHT_I da corrente de entrada. Após a seqüência de ensaios experimentais, com os resultados obtidos são montados os gráficos que proporcionam uma análise comparativa do comportamento do retificador.

Os resultados da distorção harmônica total da corrente de entrada da fonte são comparados com os valores recomendados em normas, possibilitam validar a topologia do retificador proposto na tese de doutorado [Gomes, 2005].

O RHM foi ensaiado sob diferentes condições de suprimento de energia, conforme seqüência mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Casos Estudados na Simulação e Ensaio Experimental.

ENSAIO	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS
Caso 00 – Base	Fornecimento de tensão ideal.	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • Puramente senoidal)
Caso 01	Fornecimento de tensão distorcida em cada fase superposta à fundamental.	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 5ª ordem.
Caso 02	Idem ao caso 01.	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 5ª ordem.
Caso 03	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 7ª ordem.
Caso 04	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 7ª ordem.
Caso 05	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 11ª ordem.
Caso 06	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 11ª ordem.
Caso 07	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 5% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 13ª ordem.
Caso 08	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 10% de distorção harmônica individual trifásica equilibrada de 13ª ordem.
Caso 09	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 5% de distorção trifásica equilibrada das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.
Caso 10	Idem ao caso 01	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal trifásica equilibrada 220 V; • 10% de distorção trifásica equilibrada das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.

Em cada caso estudado são colhidas formas de onda de tensão e corrente de entrada, valores das componentes harmônicas e, a DHT_I da corrente de entrada. Após a realização dos ensaios, os gráficos são montados com os valores obtidos em cada ensaio.

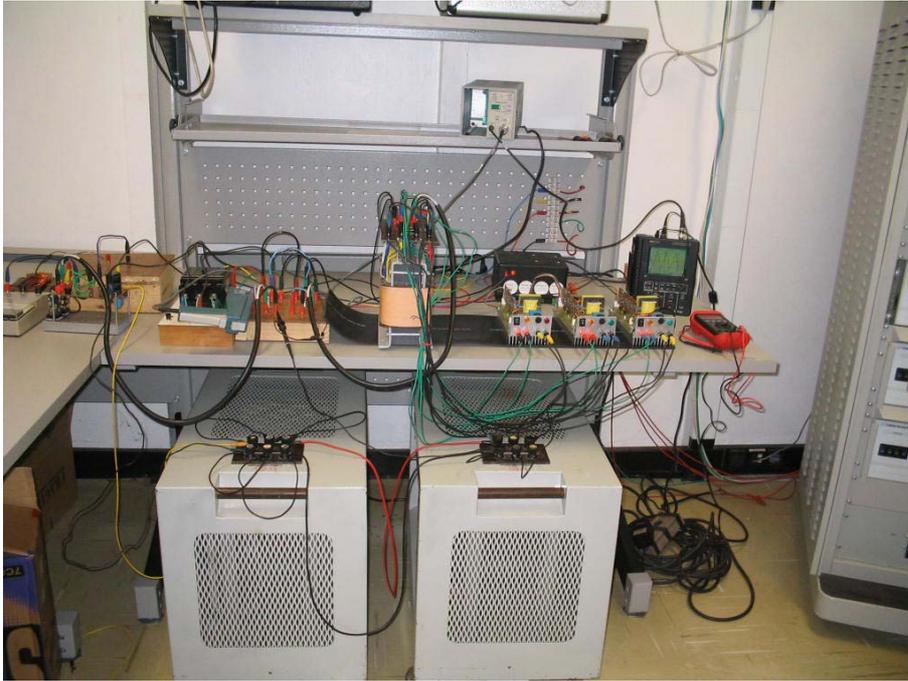


Figura 3.23 – Ensaio do Retificador.



Figura 3.24 – Fonte Auxiliar de Controle.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo ilustram o desempenho do Retificador Híbrido Multipulsos em estudo, em onze situações diferentes, conforme apresentado no capítulo anterior (Tabelas 3.2 e 3.3). Em cada caso estudado apresenta-se uma discussão sobre os níveis de distorção verificados, ilustrados com figuras de formas de onda de corrente e tensão e gráficos de distorções harmônicas. Não foi objeto do trabalho verificar desempenho do retificador. Este tipo de análise foi desenvolvido e testado na tese de doutorado que inspirou este trabalho de dissertação de mestrado [Gomes, 2006].

4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas nas condições apresentadas na tabela 3.1 do capítulo anterior. Para a análise harmônica foram consideradas as harmônicas ímpares, até a 25ª ordem, que apresentam índices consideravelmente importantes sob o ponto de vista de distúrbios. A partir da 27ª harmônica as magnitudes são desprezíveis, não tendo influência significativa nos ensaios realizados.

Uma vez que o RHM estudado é adequado para aplicações de elevada potência, levam-se em consideração os limites de distorção (DHT_I) impostos pela norma IEC61000-3-4, cujos valores são apresentados na tabela 2.6, do capítulo 2.

4.1.1 Caso 00 – Base – Tensão puramente senoidal.

No caso base, o RHM foi alimentado por uma fonte com tensão trifásica equilibrada puramente senoidal, em condições ideais de fornecimento. Dos resultados obtidos foram colhidas as formas de onda da tensão e da corrente, e as harmônicas individuais ímpares de corrente e a DHT_I de corrente de entrada. Os resultados obtidos na simulação são ilustrados nas figuras 4.1 a 4.4.

A figura 4.1 mostra uma forma de onda de tensão puramente senoidal. Observa-se que na figura 4.2 a corrente de linha do Ret-2 apresenta um nível CC, devido à componente de magnetização.

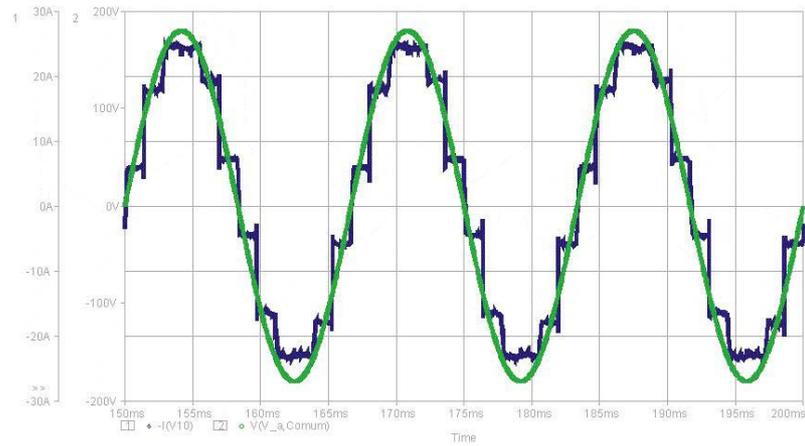


Figura 4.1 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

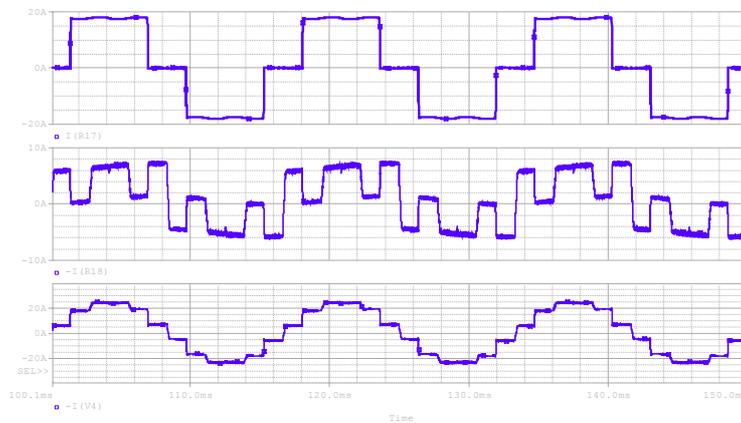


Figura 4.2 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

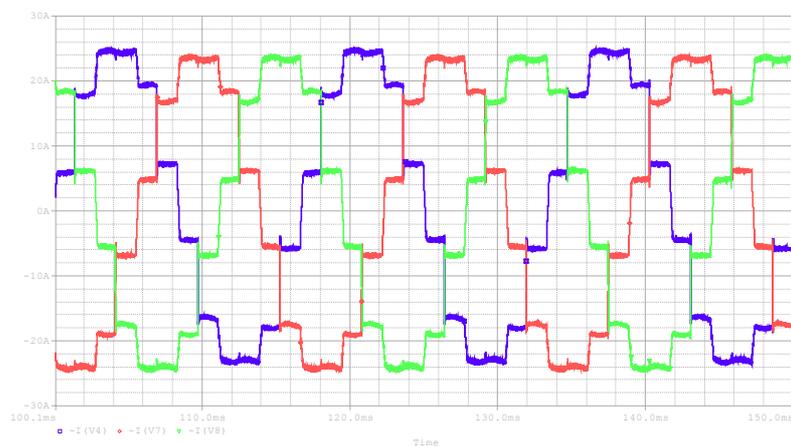


Figura 4.3 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

O gráfico a seguir apresenta o espectro harmônico das correntes de linha (Figura 4.4). Observa-se que, mesmo com uma fonte de alimentação com tensão puramente senoidal, as componentes harmônicas de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a ordem não são canceladas, conforme já era

esperado. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida no caso base foi de 13,11%, valor bem abaixo do permitido em norma.

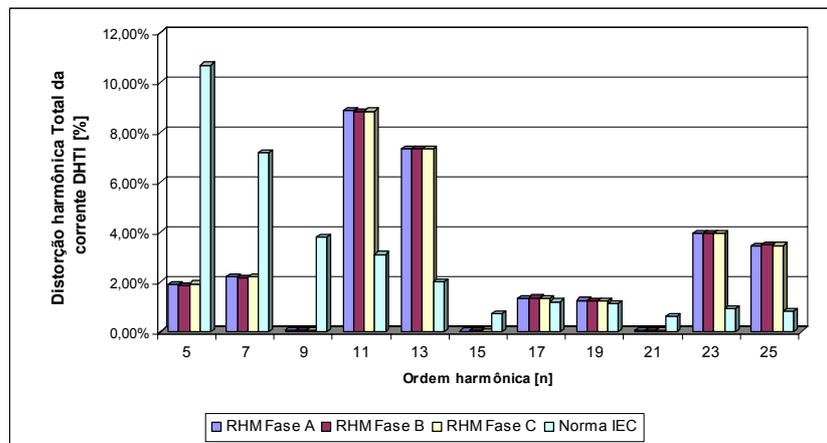


Figura 4.4 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.2 Caso 01 – Tensão com 5% de distorção na 5ª harmônica.

Para esse caso, o RHM foi alimentado por uma fonte de alimentação senoidal trifásica equilibrada, com um nível de distorção na tensão de 5% na 5ª harmônica, conforme tabela 3.2 do capítulo 3. As formas de onda da tensão e corrente de entrada obtidas na simulação são apresentadas nas figuras 4.5 a 4.8.

Observa-se que a tensão de entrada apresenta uma pequena distorção, em função da injeção de conteúdo harmônico. Apesar disso, a corrente de entrada quase não sofreu variação. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

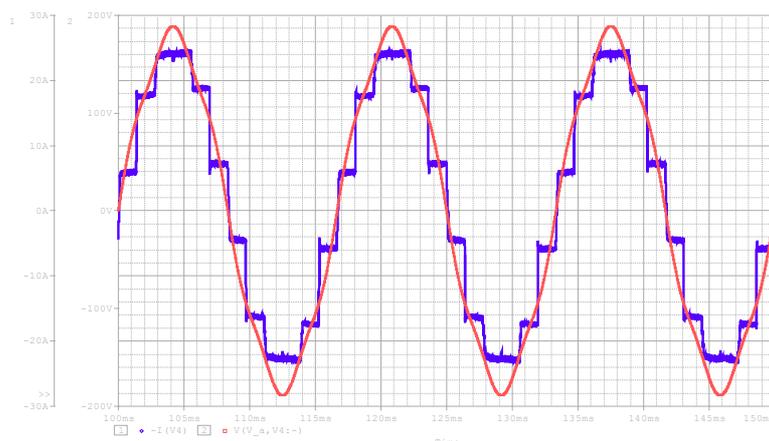


Figura 4.5 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

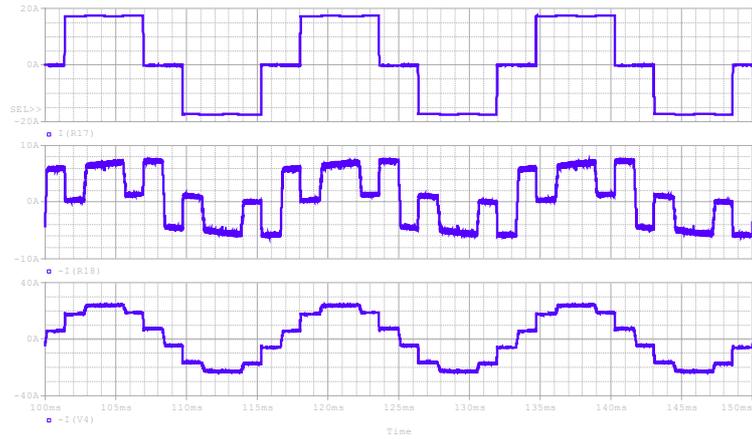


Figura 4.6 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

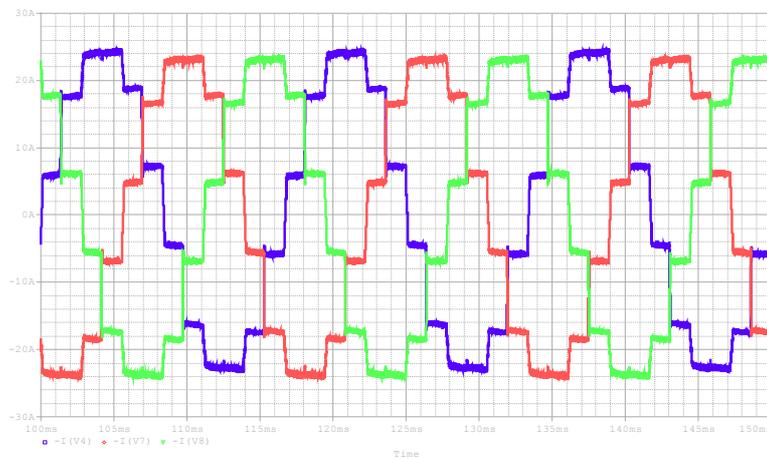


Figura 4.7 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.8 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida foi de 13,03%, abaixo do que foi obtido no caso base. Assim, como no caso base, as harmônicas de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a ordem também não foram canceladas. A taxa de distorção harmônica total da corrente de entrada (DHT_I) foi de 13,03%, ficando praticamente idêntica à taxa do caso base.

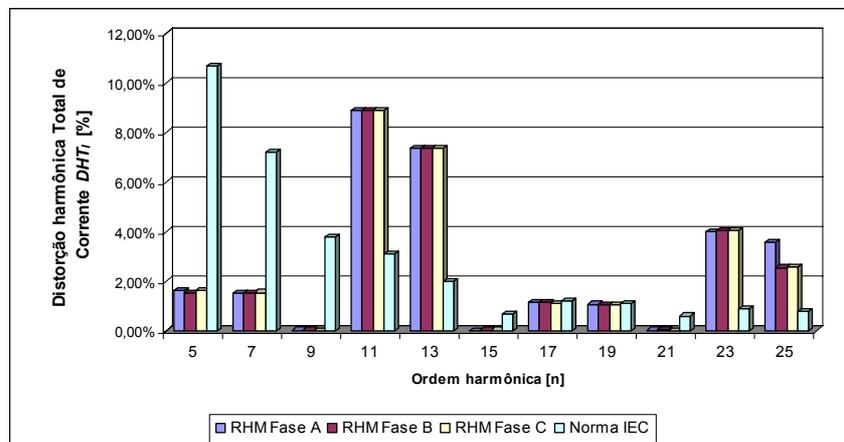


Figura 4.8 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.3 Caso 02 – Tensão com 10% de distorção na 5ª harmônica.

Essa simulação utiliza o mesmo circuito montado na simulação anterior, apenas aumentando-se a distorção na tensão de entrada para 10%. As figuras 4.9 a 4.12 ilustram os resultados obtidos na simulação. Observa-se nas formas de onda apresentadas que a distorção de tensão imposta na 5ª harmônica não alterou a corrente de entrada.

O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração. Na figura 4.9 pode-se observar que a forma de onda da tensão apresenta uma deformação oriunda da distorção imposta, mas apesar disso a forma de onda da corrente de entrada mantém a sua forma original.

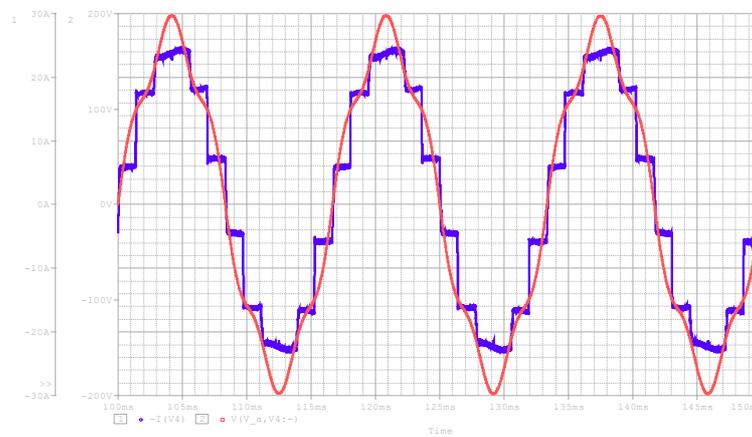


Figura 4.9 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

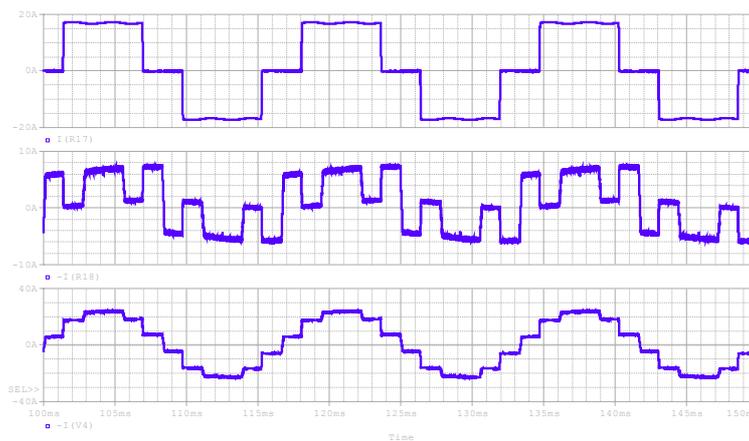


Figura 4.10 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

Nota-se na figura 4.10 que o nível CC continua presente, e isso se deve à componente de magnetização, conforme citado anteriormente. Ainda na mesma figura, pode ser observado

que a corrente de entrada do Ret-1 sofre uma leve distorção, mas isso não reflete na forma de onda da corrente de entrada, pois o RHM tem como sua principal característica, impor a forma de onda que se deseja através do Ret-2, independentemente da preexistência de conteúdo harmônico na entrada da rede de alimentação.

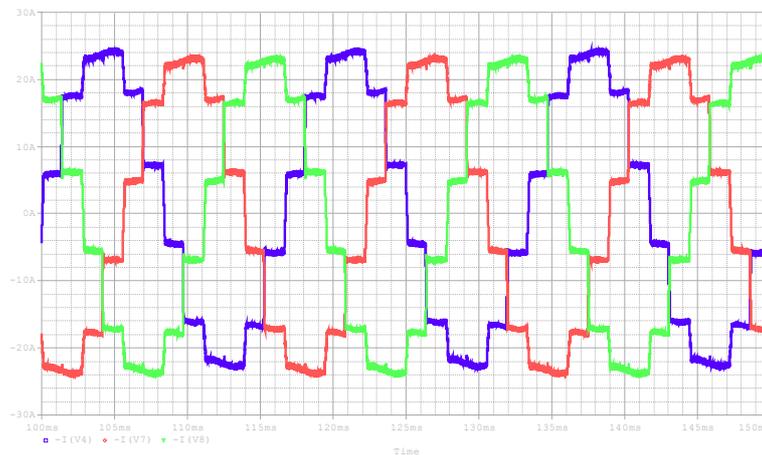


Figura 4.11 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.12 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) diminuiu para 13,06%. Isso se deve ao fato de que a forma de onda da corrente de entrada é imposta da maneira que se quer, independente da distorção da tensão da fonte, mantendo assim os níveis de DHT_I praticamente estáveis.

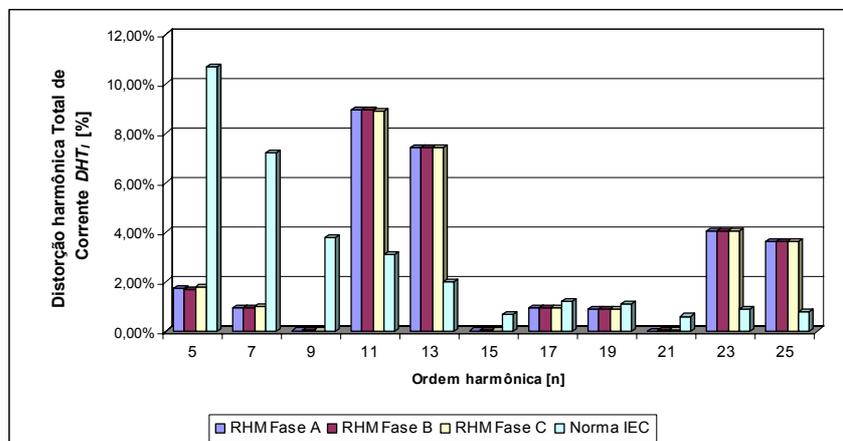


Figura 4.12 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.4 Caso 03 – Tensão com 5% de distorção na 7ª harmônica.

Nessa simulação, segue-se a mesma filosofia anterior, variando agora a distorção de tensão. Para esse caso, um nível de distorção na tensão de 5% é injetado na 7ª harmônica. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.13 a 4.16.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas nas figuras 4.13 a 4.15, a distorção imposta na 5ª harmônica alterou a tensão de entrada, mas a corrente manteve a sua forma. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

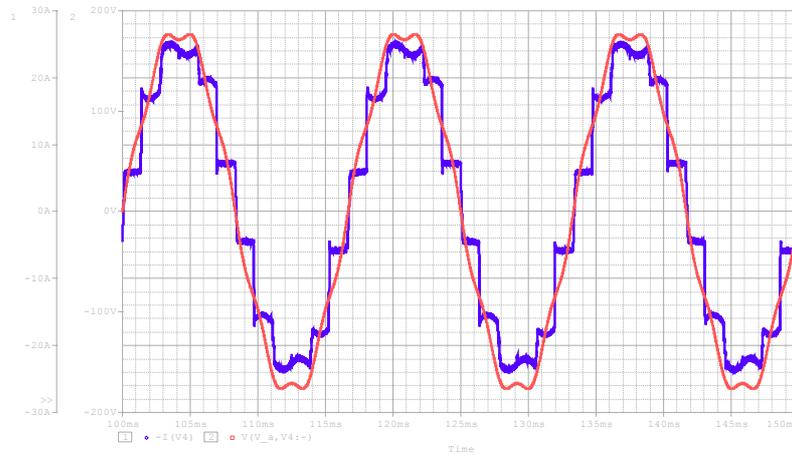


Figura 4.13 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

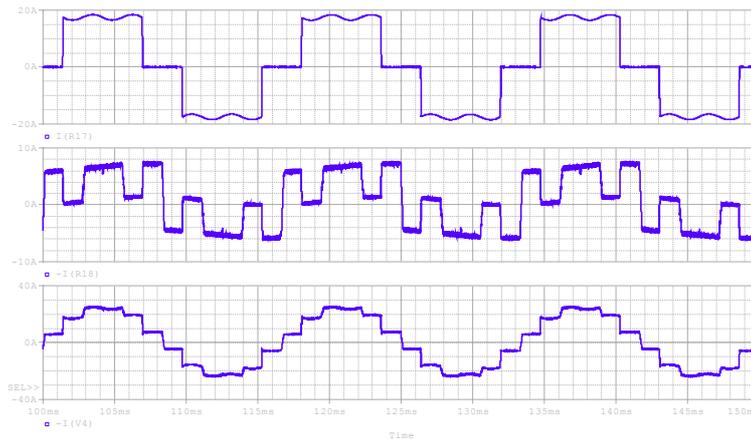


Figura 4.14 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

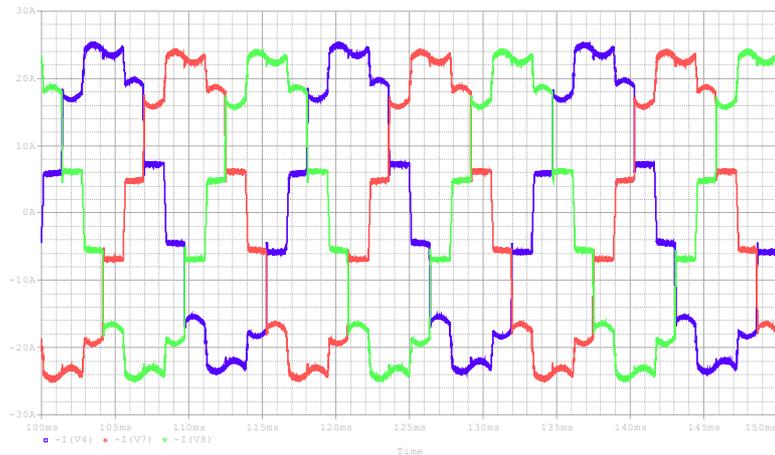


Figura 4.15 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.16 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. Os resultados obtidos mostram que não houve variação nos níveis de distorção harmônica, e a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_i) foi de 13,23%, praticamente a mesma do caso base.

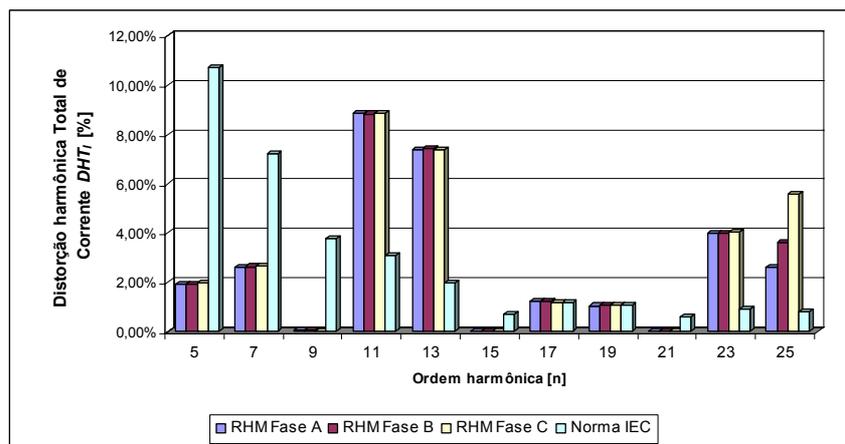


Figura 4.16 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.5 Caso 04 – Tensão com 10% de distorção na 7ª harmônica.

Para esse caso, a simulação é executada com o circuito anterior, apenas aumentando a distorção na 5ª harmônica para 10%. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.17 a 4.20.

A distorção imposta na 7ª harmônica não alterou a corrente de entrada. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração, o que reafirma a condição de que a corrente

de entrada é imposta pelo Ret-2, independentemente do grau de distorção da tensão presente na fonte de alimentação.

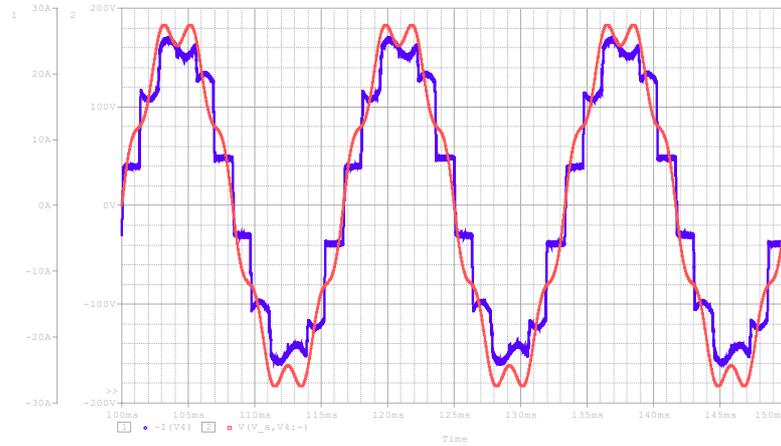


Figura 4.17 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

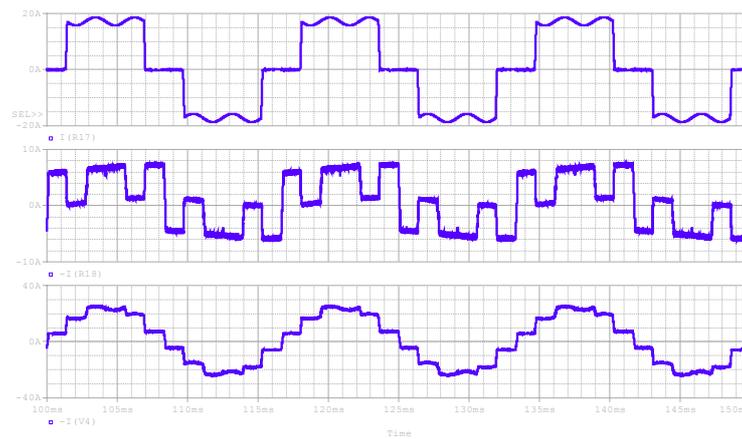


Figura 4.18 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

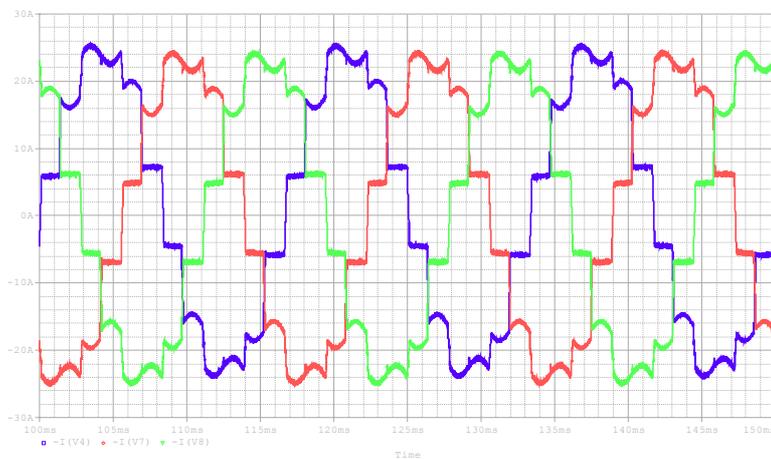


Figura 4.19 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.20 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. Os resultados obtidos mostram que não houve variação nos níveis de distorção, e a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_I) foi de 13,42%, praticamente a mesma do caso base.

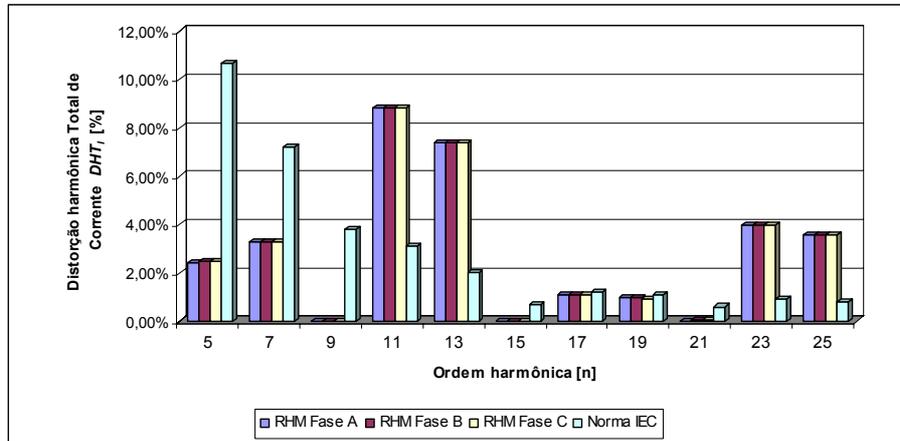


Figura 4.20 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.6 Caso 05 – Tensão com 5% de distorção na 11ª harmônica.

Alimentado o RHM com uma fonte puramente senoidal, inserimos uma outra fonte em série com uma tensão distorcida. A distorção imposta na 11ª harmônica é de 5%. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.21 a 4.24.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas nas figuras 4.21 a 4.23, a distorção imposta na 7ª harmônica não alterou a corrente de entrada, como ocorreu nos demais casos apresentados anteriormente. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

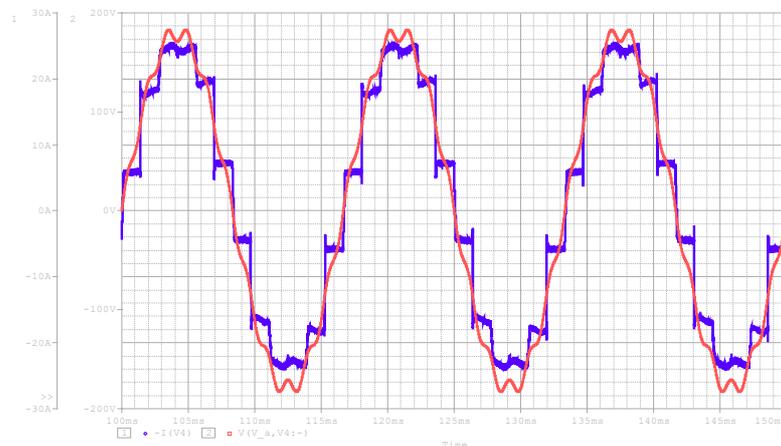


Figura 4.21 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

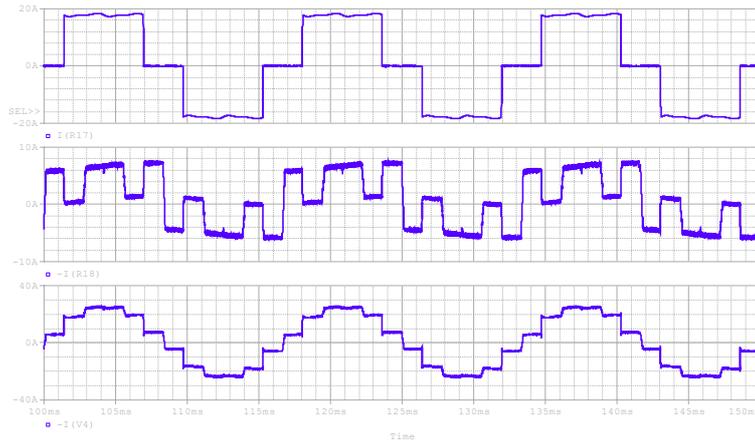


Figura 4.22 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

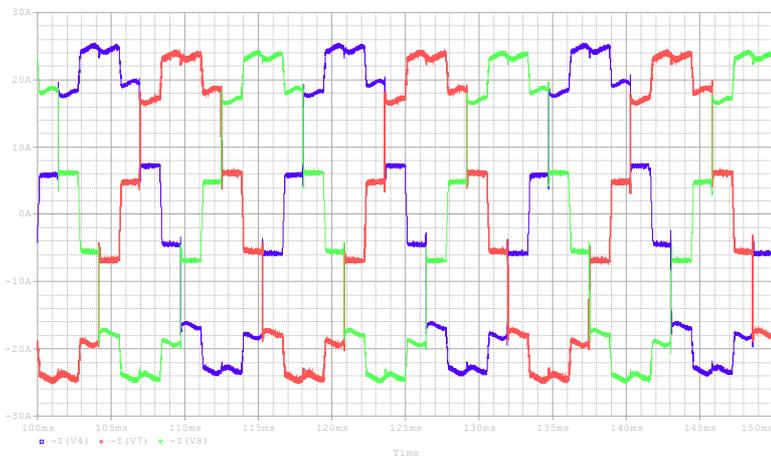


Figura 4.23 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.24 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,27%, se mantendo próxima da taxa obtida no caso base.

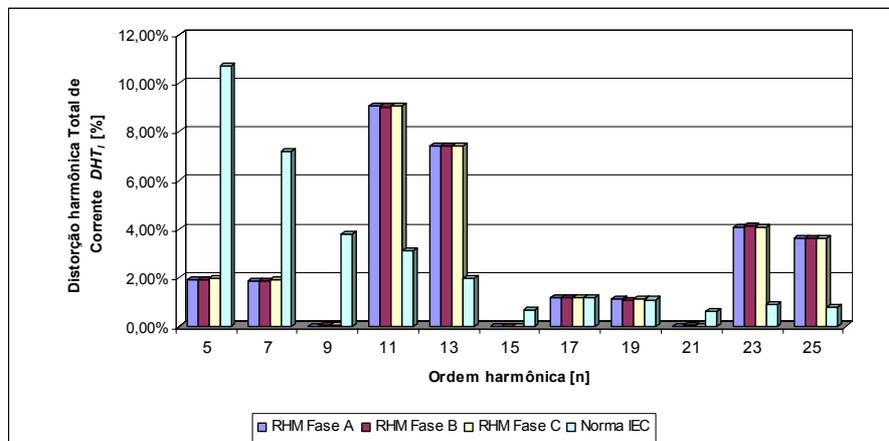


Figura 4.24 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.7 Caso 06 – Tensão com 10% de distorção na 11ª harmônica.

A simulação foi realizada, repetindo a condição apresentada no caso anterior, apenas aumentando a distorção de tensão imposta de 5% para 10%. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.25 a 4.28.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas nas figuras 4.25 a 4.26, a distorção imposta na 5ª harmônica não alterou a corrente de entrada. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

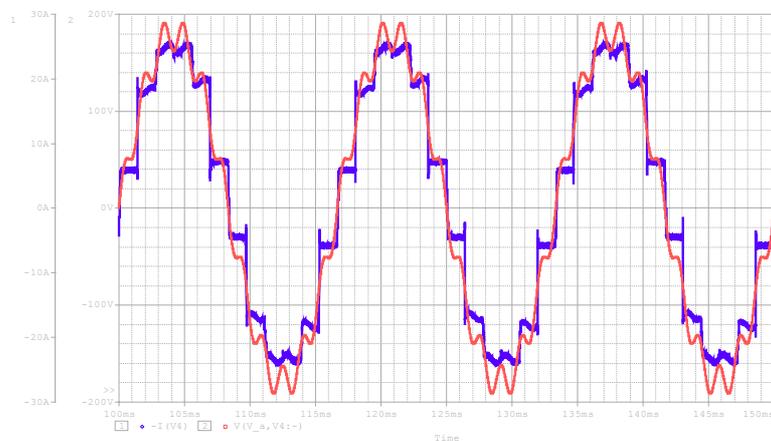


Figura 4.25 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

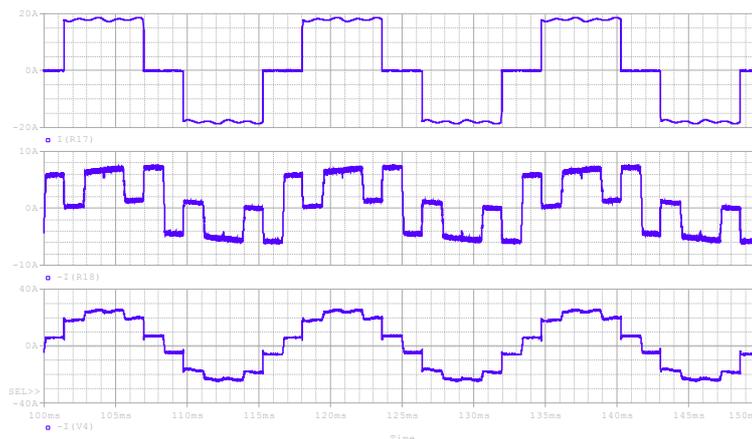


Figura 4.26 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

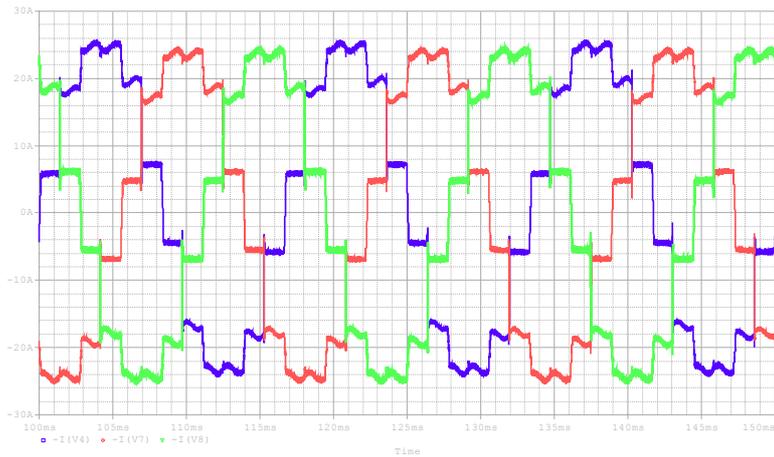


Figura 4.27 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.28 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,40%, valor ainda dentro da faixa permitida pela norma, e bem próximo da taxa do caso base.

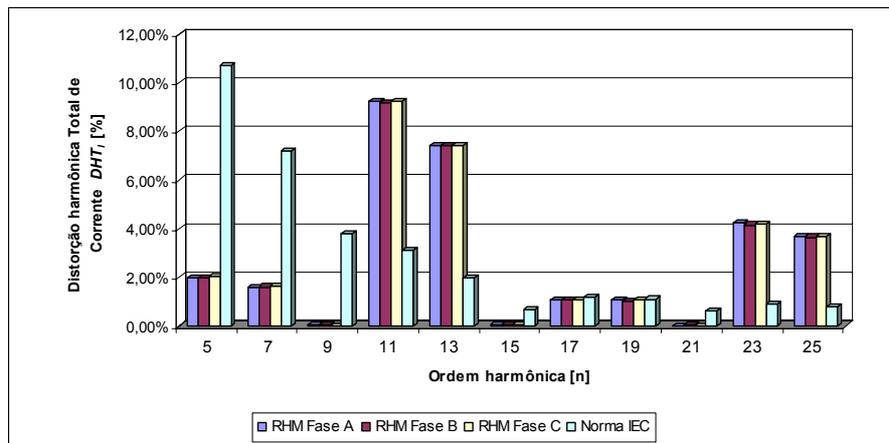


Figura 4.28 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.8 Caso 07 – Tensão com 5% de distorção na 13ª harmônica.

O circuito simulado apresenta uma fonte de tensão trifásica equilibrada puramente senoidal, com outra fonte de tensão distorcida, com 5% na 13ª harmônica, ligada em série. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.29 a 4.32.

O comportamento do retificador permanece inalterado, conforme pode ser observado nas formas de onda apresentadas nas figuras 4.29 a 4.31 a distorção imposta na 5ª harmônica não alterou a corrente de entrada.



Figura 4.29 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

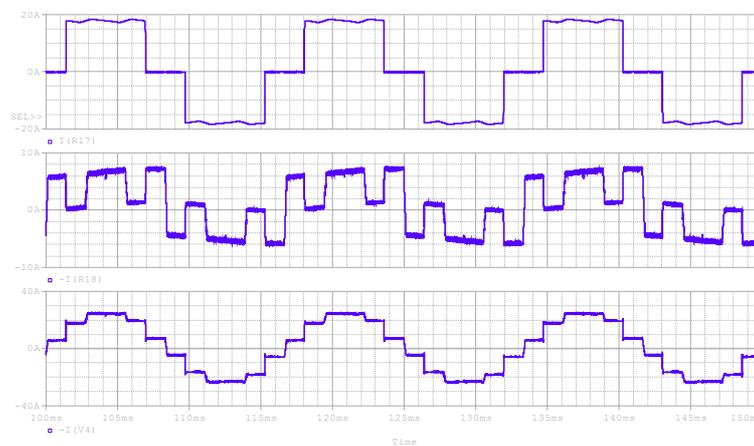


Figura 4.30 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

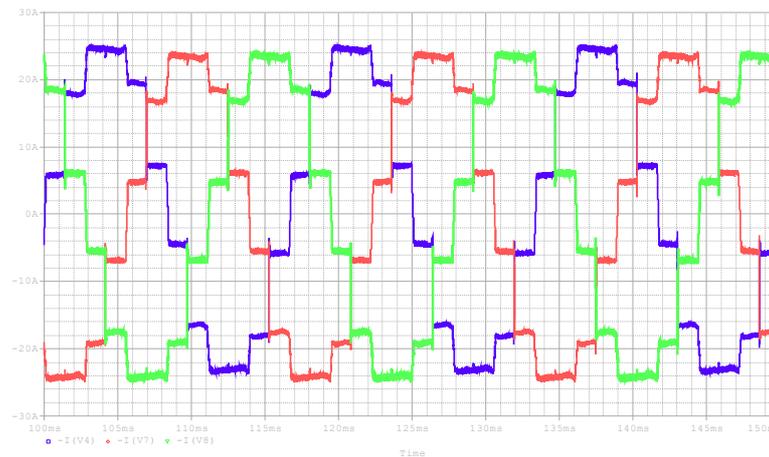


Figura 4.31 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.32 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,28%, ainda nos patamares iniciais.

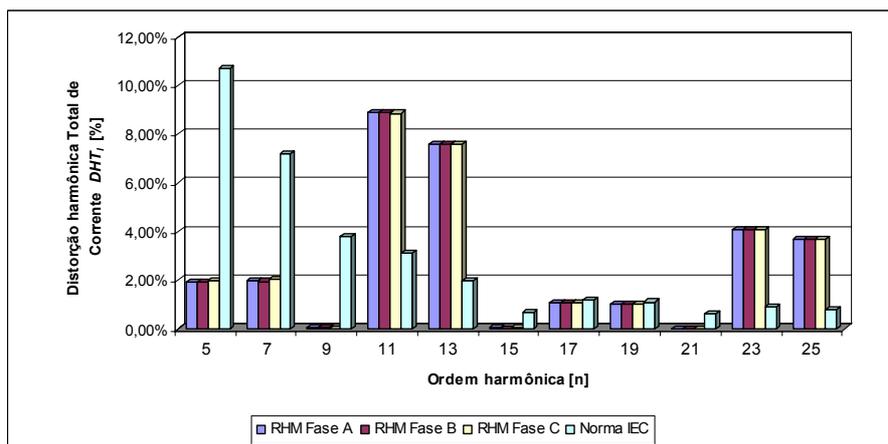


Figura 4.32 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.9 Caso 08 – Tensão com 10% de distorção na 13ª harmônica.

Essa simulação repete o caso 7, com um aumento de 5% para 10% de distorção de tensão na 13ª harmônica. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.21 a 4.24.

A tensão de entrada apresenta uma distorção bastante significativa, a sua forma. A figura 4.21 ilustra a forma de onda da tensão e a corrente de entrada.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas nas figuras 4.22 e 4.23 a corrente de entrada não sofreu interferência da distorção da tensão de entrada. Observa-se que a forma de onda da corrente apresenta uma forma bastante definida, com distorções quase imperceptíveis, melhor até do que a obtida no caso base.

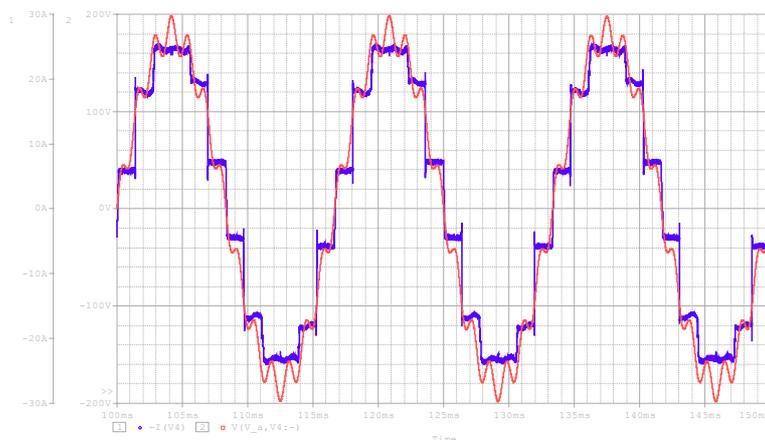


Figura 4.33 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

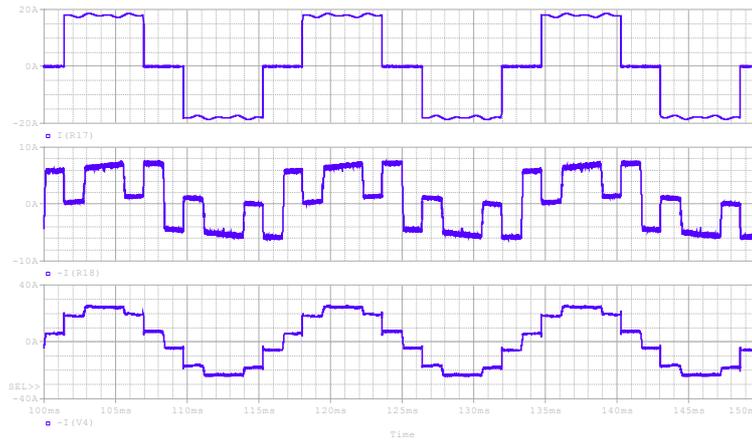


Figura 4.34 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

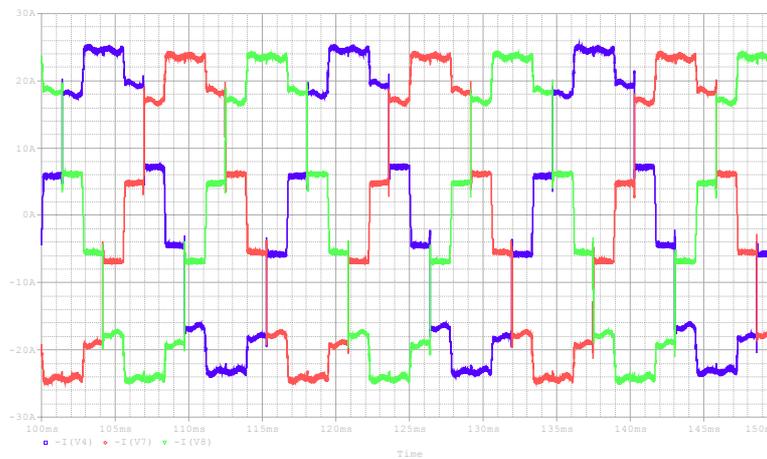


Figura 4.35 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.36 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,39%.

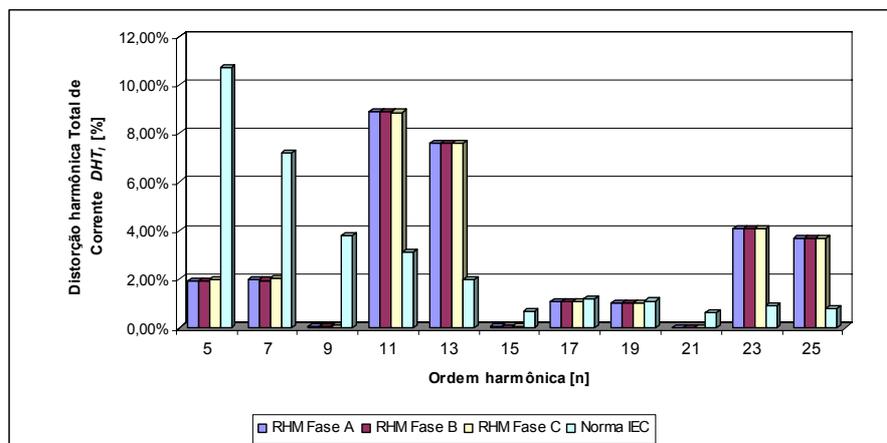


Figura 4.36 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.10 Caso 09 – Tensão com 5% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.

Esse caso é uma combinação das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, e 13ª ordem, com 5% de distorção em cada uma delas. Os resultados são ilustrados pelas figuras 4.37 a 4.40.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas na figura 4.37, a tensão de entrada apresenta uma onda bastante distorcida, mas mesmo assim não alteraram a forma de onda da corrente de entrada, o que era esperado pela característica do RHM de impor a forma de onda desejada na corrente de entrada, conforme mencionado no item 4.1.3 deste capítulo . O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

As figuras 4.38 e 4.39 ilustram a formação da forma de onda da corrente entrada, e também a forma definida da corrente imposta pelo retificador controlado (Ret-2).

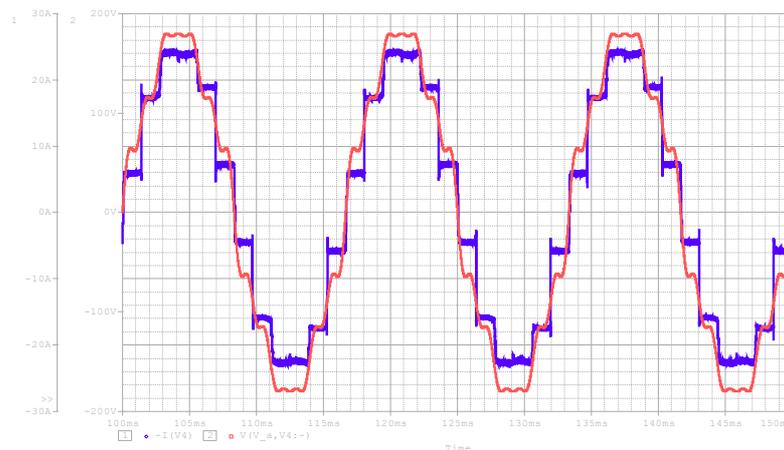


Figura 4.37 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

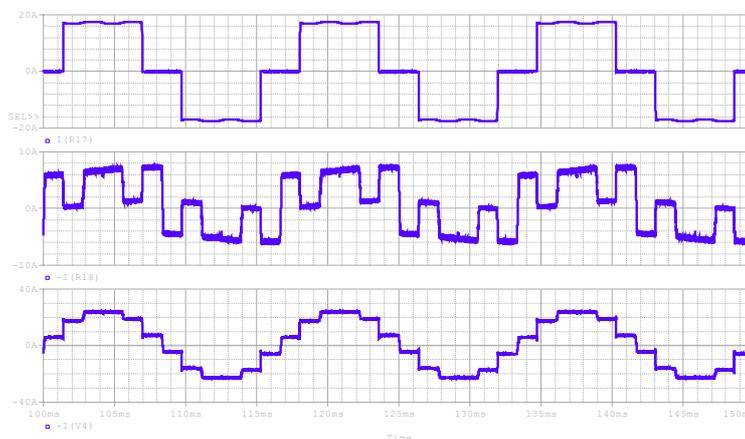


Figura 4.38 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

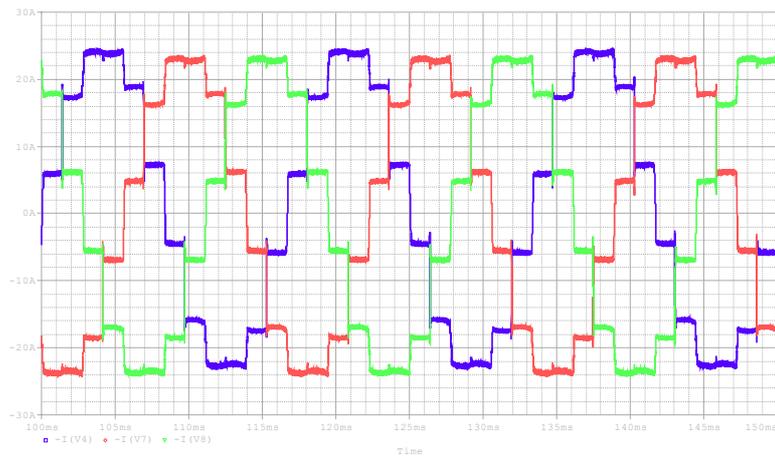


Figura 4.39 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.40 ilustra o espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,24%.

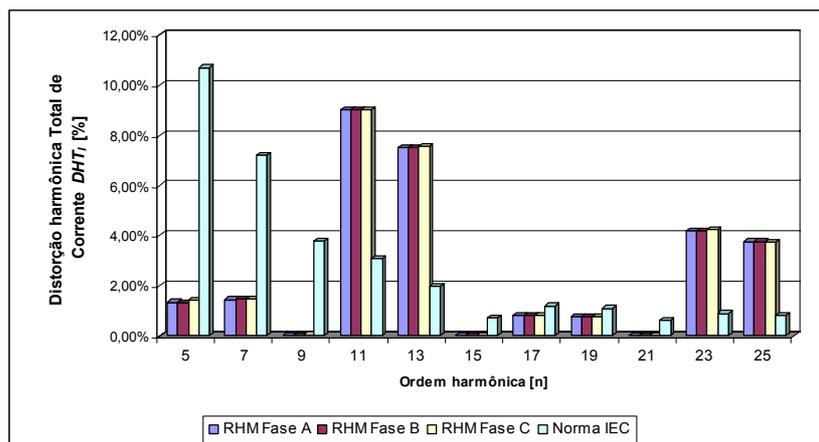


Figura 4.40 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.11 Caso 10 – Tensão com 10% de distorção na 5^a, 7^a, 11^a e 13^a harmônica.

A última condição de operação simulada apresenta uma fonte de alimentação com 10% de distorção em cada uma das harmônicas de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a. As figuras 4.41 a 4.44 ilustram o resultado da simulação.

Conforme pode ser observado na figura 4.41, a tensão de entrada se apresenta com uma distorção bastante significativa. Entretanto, mesmo para a situação bastante desfavorável à operação de qualquer equipamento, o RHM consegue impor a forma de onda da corrente de entrada da mesma forma que nos demais casos estudados anteriormente neste capítulo.

As figuras 4.42 e 4.43 ilustram as formas de onda da corrente de entrada de cada retificador e a corrente total de entrada. Observa-se que a corrente imposta no retificador controlado (Ret-2) permanece com a mesma forma, uma vez que a sua forma independe da tensão de entrada da rede de alimentação.

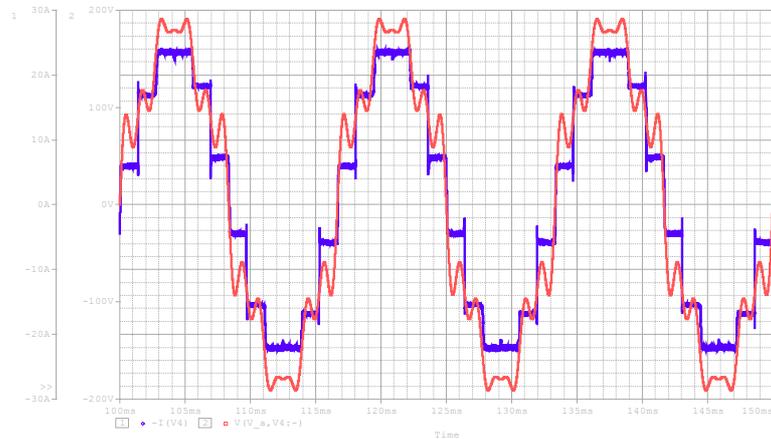


Figura 4.41 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

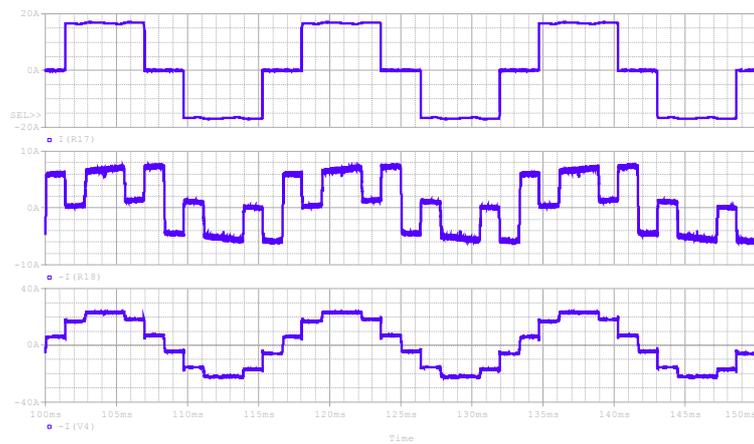


Figura 4.42 – Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$).

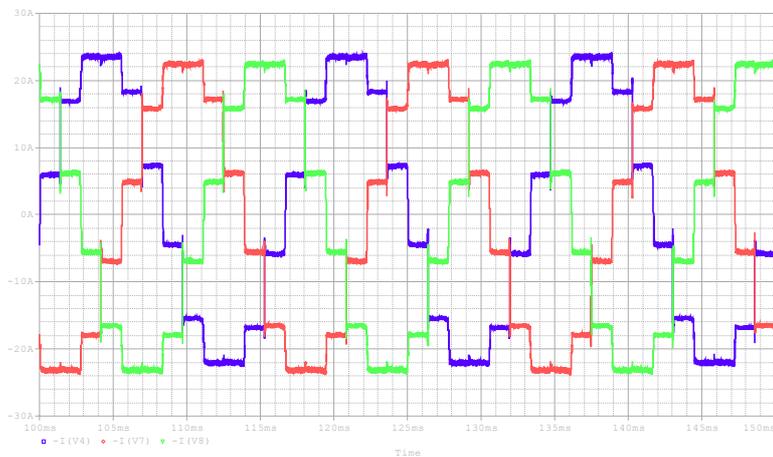


Figura 4.43 – Corrente de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

A figura 4.44 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,27%

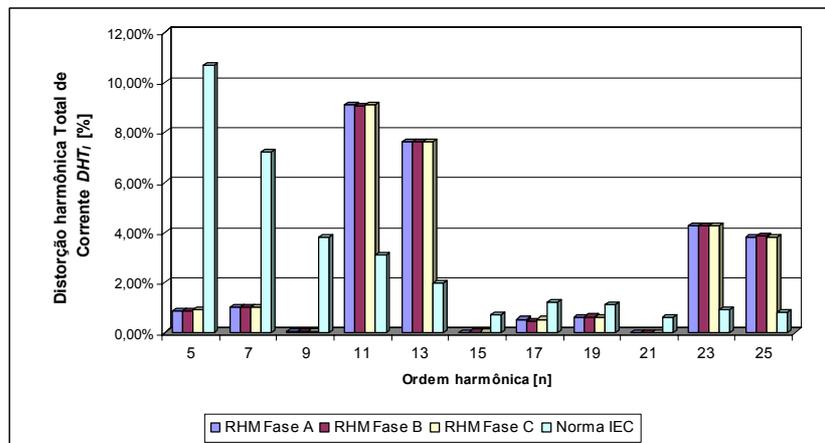


Figura 4.44 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.1.12 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados na simulação mostram que o RHM é capaz de operar com a preexistência de tensões harmônicas na rede de alimentação, sem que o seu rendimento seja prejudicado, e sem injetar distorções harmônicas adicionais na corrente de entrada na fonte. As formas de onda da corrente para todas as situações simuladas não apresentaram distorções consideráveis e a DHT_I também permaneceu praticamente a mesma. Isso se deve a fato de que a corrente de entrada depende da corrente imposta no retificador controlado (Ret-2). Nesse sentido, o desempenho do RHM foi avaliado operando como um retificador de 12-pulsos convencional, demonstrando o seu ótimo resultado de DHT_I , tal como os resultados das diversas topologias de retificadores de 12-pulsos apresentados na revisão bibliográfica, porém, com uma estrutura bem mais simples, compacta e custo reduzido.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Foi implementado um protótipo do RHM analisado nesse trabalho, operando como retificador de 12-pulsos convencional, com potência de 6 kW. Assim como na análise dos resultados de simulação, para os resultados experimentais serão consideradas apenas as harmônicas ímpares, até a 25ª ordem, que apresentam índices consideravelmente

importantes sob o ponto de vista de distúrbios. A partir da 27^a harmônica as magnitudes são desprezíveis, não tendo influência significativa nos ensaios realizados.

Os ensaios do protótipo foram executados sob as mesmas condições das simulações, Foram realizados onze ensaios, conforme descrito na tabela 3.2 do capítulo anterior, cujos resultados são mostrados e analisados caso a caso neste capítulo. Apresenta-se também formas de onda obtidas nos ensaios, bem como os gráficos elaborados a partir de valores de harmônicas medidos.

Nos ensaios experimentais não são apresentados todas as formas de onda que foram mostradas nas simulações, visto que as mesmas não estão disponíveis. Esses ensaios visam obter as formas de onda da tensão e corrente, bem como os valores dos espectros harmônicos apresentados nos gráficos.

4.2.1 Caso 00 – Base – Tensão puramente senoidal.

Para o caso base, o protótipo foi alimentado com uma tensão puramente senoidal, que foi chamada de condição ideal de operação. Esse caso, assim como nas simulações, é referência para os ensaios subsequentes. Os resultados obtidos do ensaio são ilustrados pelas figuras 4.45 e 4.46. Observa-se que a composição da corrente de entrada apresenta um fator de deslocamento praticamente nulo e o conteúdo harmônico é muito baixo. Conseqüentemente, o fator de potência de entrada é muito próximo da unidade. O transformador isolador se comporta como um filtro, não permitindo que ruídos oriundos do chaveamento em alta frequência apareçam na forma de onda da corrente de entrada.

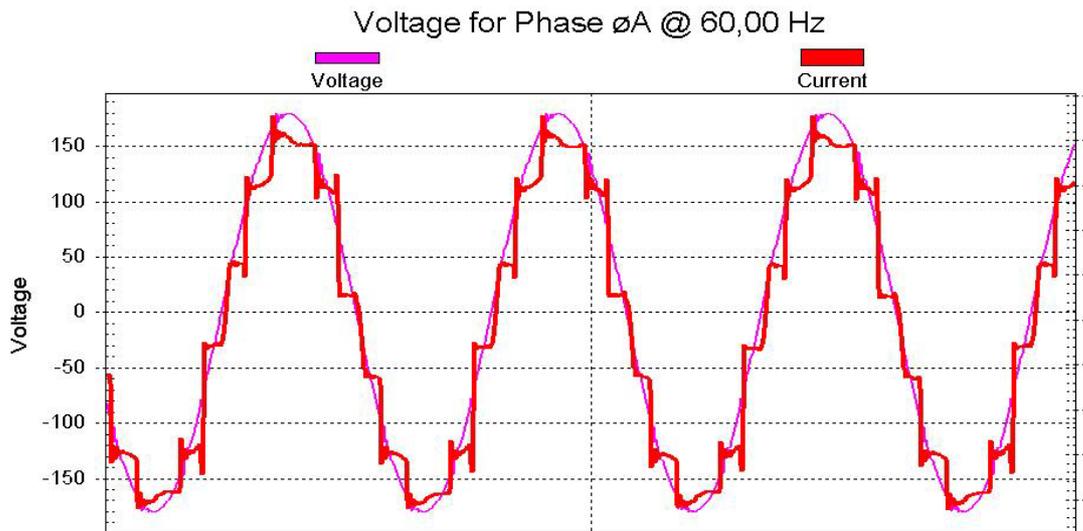


Figura 4.45 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

O espectro harmônico da corrente de entrada é ilustrado pela figura 4.46. Observa-se que as harmônicas de ordem $12n \pm 1$ são marcantes, tal qual nos retificadores de 12-pulsos convencionais. Essas harmônicas não são canceladas, como foi observado nas simulações apresentas anteriormente. A DHT_I da corrente de entrada obtida na simulação e no ensaio experimental foi de 13,41% e 13,46 respectivamente.

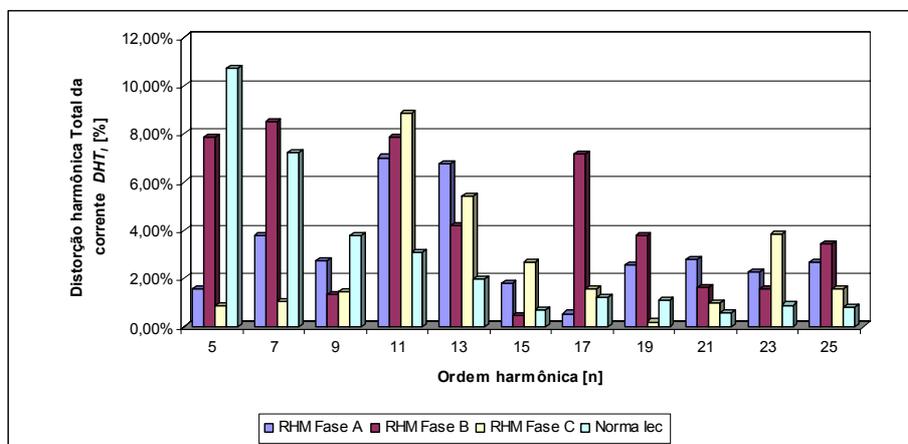


Figura 4.46 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.2 Caso 01 – Tensão com 5% de distorção na 5ª harmônica.

Para esse caso, o RHM foi alimentado por uma fonte de alimentação senoidal trifásica equilibrada, com um nível de distorção na tensão de 5% na 5ª harmônica, conforme tabela 3.2 do capítulo 3.

O resultado mostrado na figura 4.47 é praticamente idêntico ao obtido na simulação. Observa-se que a tensão de entrada apresenta uma pequena distorção, em função da injeção de conteúdo harmônico.

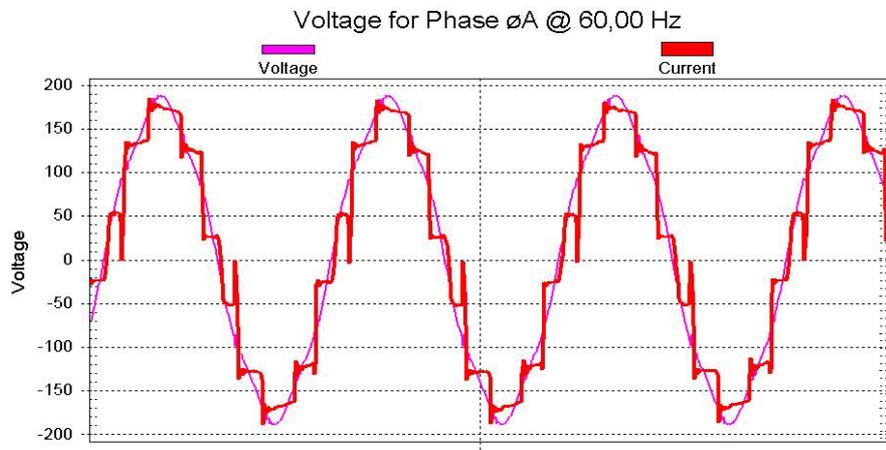


Figura 4.47 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

O espectro harmônico é ilustrado pela figura 4.48. O comportamento é semelhante ao ocorrido nas simulações. A DHT_I da corrente de entrada obtida foi de 15,6%, um pouco acima do resultado de simulação, mas ainda bem abaixo do permitido em norma.

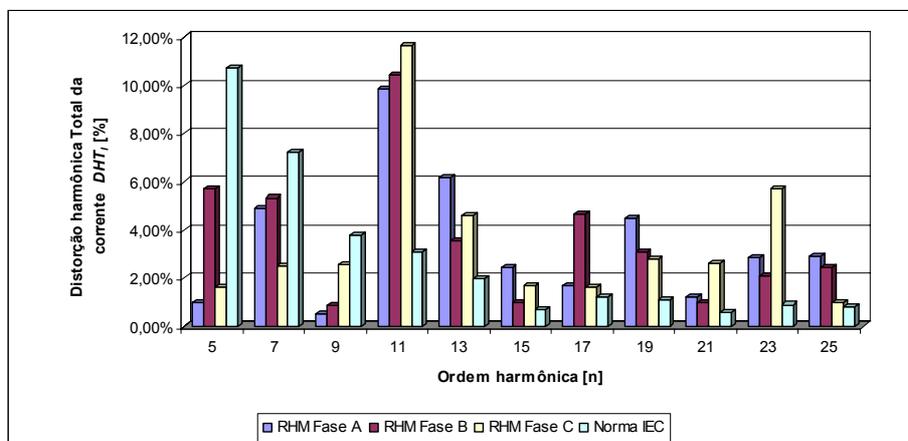


Figura 4.48 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.3 Caso 02 – Tensão com 10% de distorção na 5ª harmônica.

Nesse ensaio, o circuito permanece o mesmo anterior, variando-se apenas a distorção na tensão de alimentação para 10%. As figuras 4.49 e 4.50 ilustram os resultados obtidos no ensaio.

Na figura 4.49 pode-se observar nas formas de onda apresentadas que a distorção de tensão imposta na 5ª harmônica não alterou a corrente de entrada. O desempenho do retificador

praticamente não sofreu alteração, apenas a forma de onda da tensão apresenta uma deformação oriunda da distorção imposta, mas apesar disso a forma de onda da corrente de entrada mantém a sua forma original.

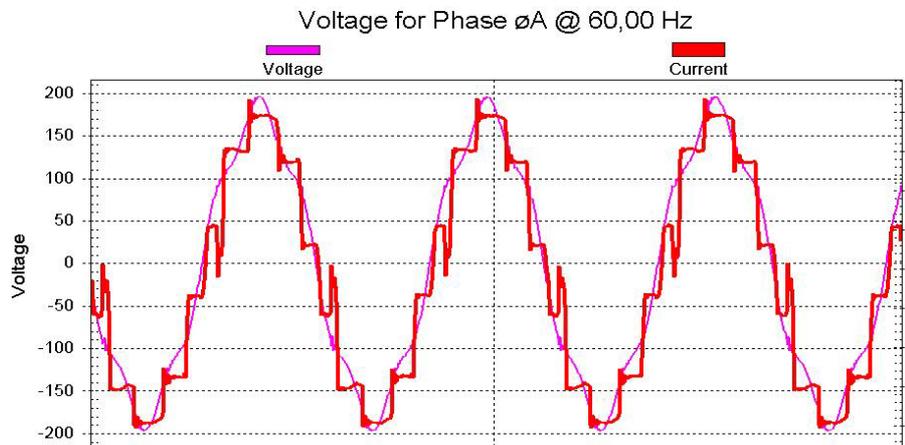


Figura 4.49 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

A DHT_I da corrente de entrada obtida no ensaio experimental foi de 17,39%. O ensaio experimental apresenta uma variação um pouco maior que a simulação, entretanto, ainda a um nível de DHT_I bem abaixo que o exigido pela norma.

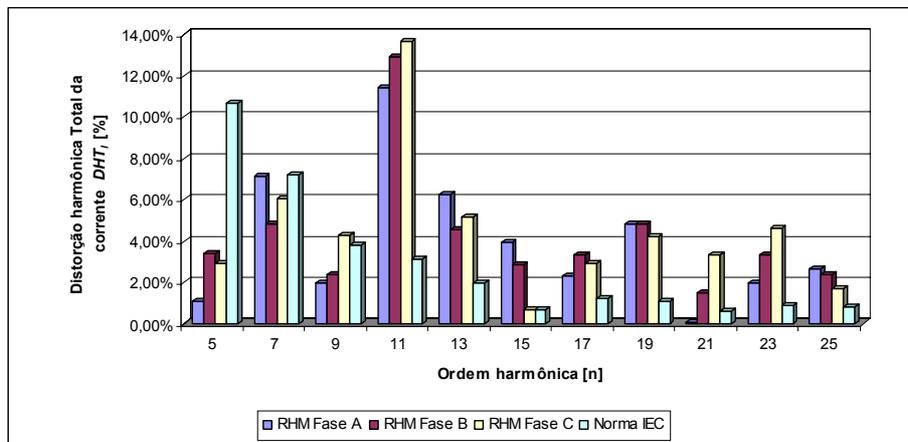


Figura 4.50 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.4 Caso 03 – Tensão com 5% de distorção na 7ª harmônica.

O circuito ensaiado é alimentado com uma fonte de tensão senoidal trifásica equilibrada, ligada em série com uma fonte de tensão trifásica com 5% de distorção de tensão na 7ª harmônica. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.51 e 4.52.

Como pode ser observada nas formas de onda apresentadas na figura 4.51, a distorção imposta na 7ª harmônica alterou a tensão de entrada, mas a corrente manteve a sua forma.

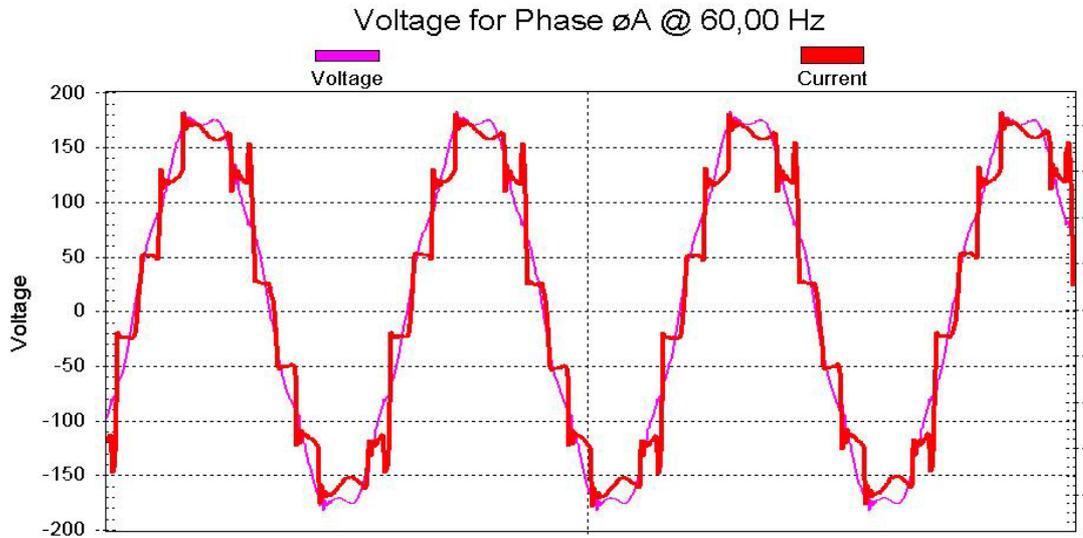


Figura 4.51 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

O espectro harmônico da corrente de entrada é ilustrado pela figura 4.52. A DHT_I da corrente de entrada praticamente não sofre alterações com a distorção aplicada na fonte de alimentação. O valor obtido no ensaio experimental foi de 14,83%, valor bastante próximo do obtido na simulação, e bem abaixo do exigido em norma.

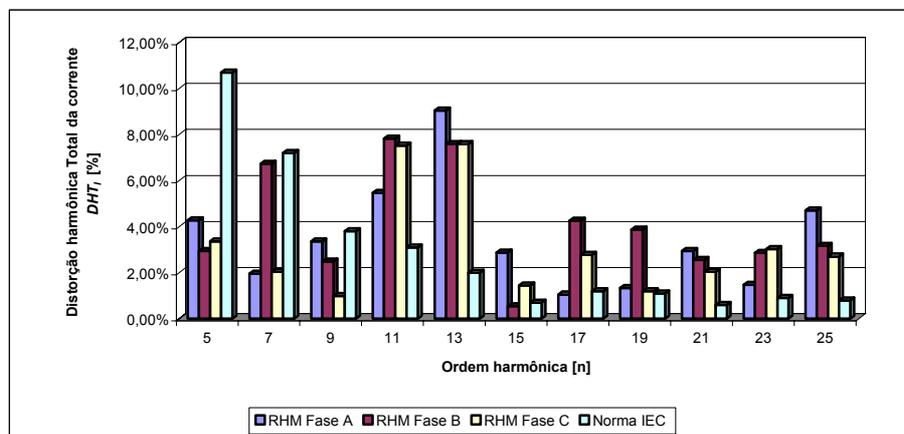


Figura 4.52 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.5 Caso 04 – Tensão com 10% de distorção na 7ª harmônica.

Para esse caso, o ensaio é executado com o circuito anterior, apenas aumentando a distorção na 5ª harmônica para 10%. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.53 e 4.54.

A figura 4.53 ilustra as formas de onda da tensão e corrente de entrada. Observa-se que a tensão de entrada apresenta uma distorção bastante significativa na sua forma de onda. Entretanto, a corrente de entrada não sofreu distorções significantes. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

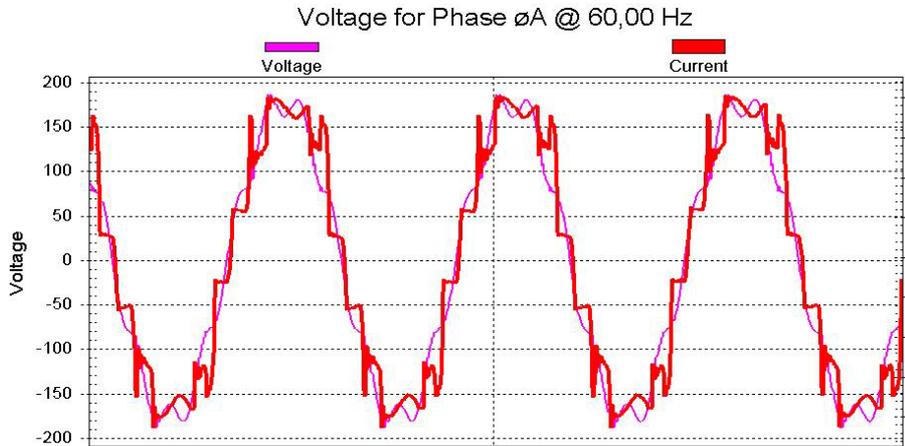


Figura 4.53 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

O espectro harmônico da corrente de entrada é ilustrado na figura 4.54. Permanece as harmônicas individuais de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a ordem. A DHT_I da corrente de entrada permanece dentro dos limites impostos pela norma, e próxima do resultado obtido em simulação. O valor obtido no ensaio experimental foi de 16,75%.

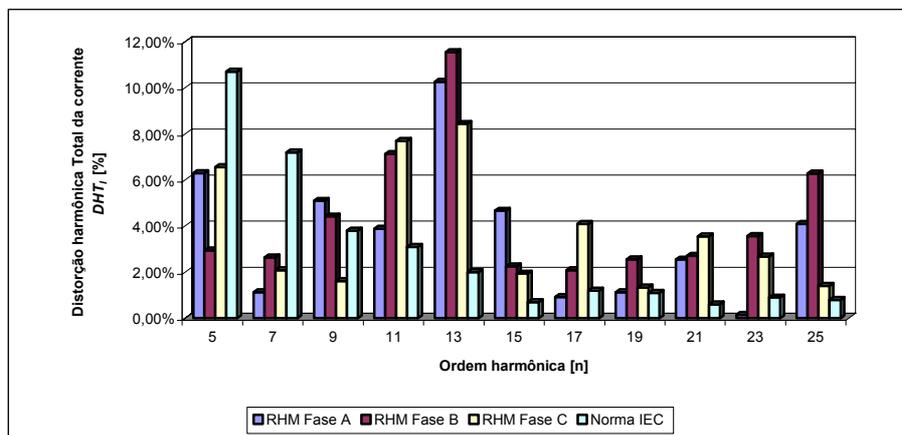


Figura 4.54 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.6 Caso 05 – Tensão com 5% de distorção na 11^a harmônica.

Alimentado o RHM com uma fonte de tensão trifásica puramente senoidal, conectando-se uma fonte de tensão em série, com distorção de 5% na 11^a harmônica. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.55 e 4.56.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas na figura 4.54, a distorção imposta na 5ª harmônica não alterou a corrente de entrada, conforme observado nos demais casos apresentados anteriormente. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

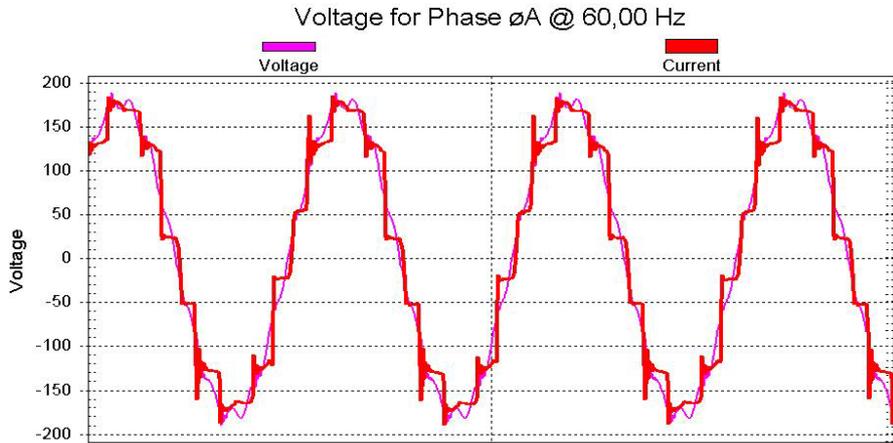


Figura 4.55 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

A figura 4.56 mostra os espectros harmônicos da corrente de entrada. A DHT_I da corrente de entrada de 14,01%, permanecendo praticamente inalterada.

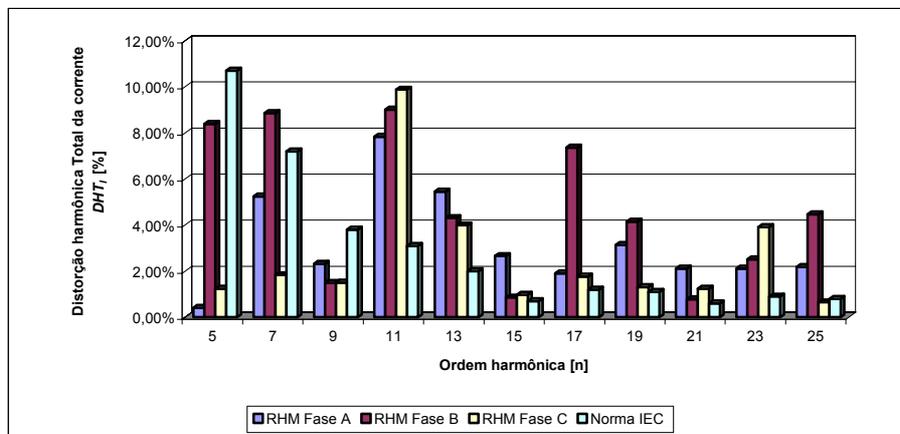


Figura 4.56 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.7 Caso 06 – Tensão com 10% de distorção na 11ª harmônica.

Repetindo o ensaio anterior, modificando apenas a distorção de tensão imposta de 5% para 10%. Os resultados obtidos são ilustrados pelas figuras 4.57 a 4.58.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas na figura 4.57, a tensão de entrada apresenta uma forte distorção. A distorção da tensão de entrada não impõe

mudança na forma de da corrente, que mantém suas características. Isso como já foi citado anteriormente, se deve pelo fato de que a forma de onda corrente de entrada é imposta pelo retificador controlado (Ret-2).

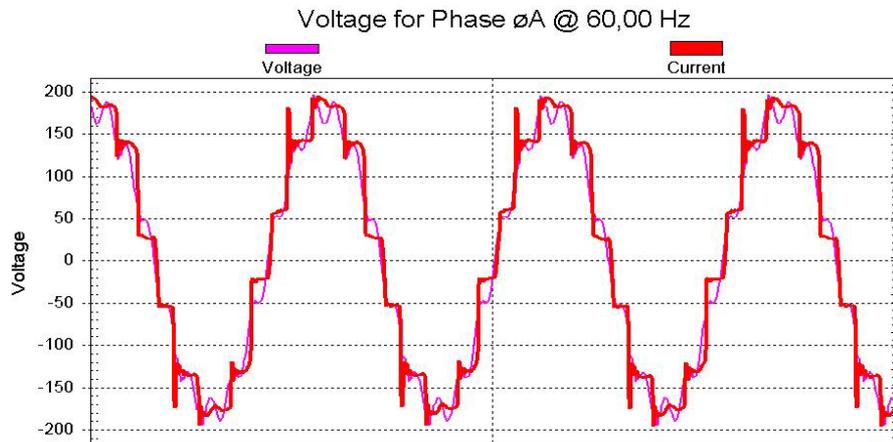


Figura 4.57 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

A figura 4.58 apresenta o gráfico do espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida foi de 14,9%, valor ainda dentro da faixa permitida pela norma, e bem próximo da taxa do caso base.

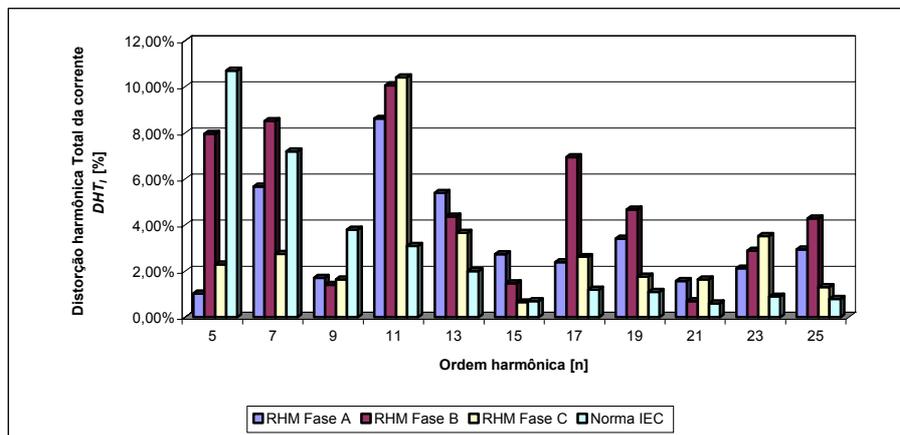


Figura 4.58 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.8 Caso 07 – Tensão com 5% de distorção na 13ª harmônica.

O circuito ensaiado apresenta uma fonte de tensão trifásica equilibrada puramente senoidal, com outra fonte de tensão distorcida, com 5% na 13ª harmônica, ligada em série.

Não foi possível ilustrar esse caso, pois os resultados obtidos foram perdidos.

4.2.9 Caso 08 – Tensão com 10% de distorção na 13ª harmônica.

O circuito ensaiado foi alimentado por uma fonte com tensão trifásica equilibrada puramente senoidal, com uma fonte com 10% de distorção de tensão na 13ª harmônica. Esse ensaio repete o caso 7, com um aumento de 5% para 10% de distorção de tensão na 13ª harmônica. As figuras 4.59 e 4.60 ilustram os resultados obtidos no ensaio. A figura 4.58 mostra uma tensão bem disforme, e ainda assim a corrente manteve a sua forma.

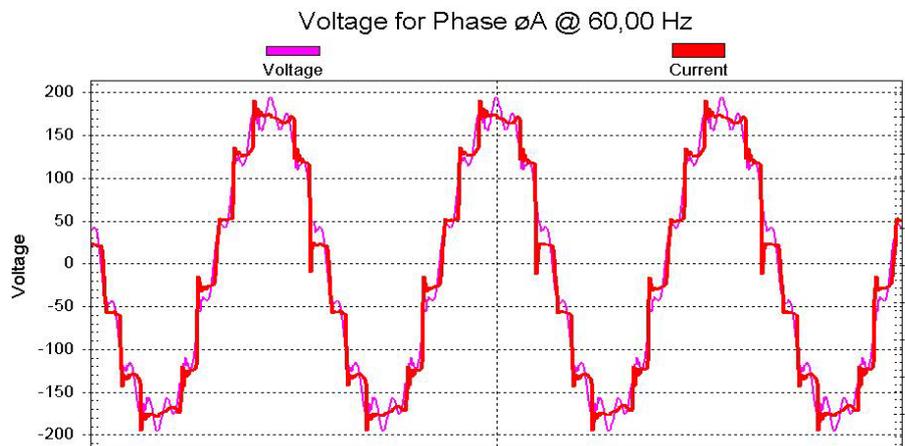


Figura 4.59 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

A figura 4.60 ilustra o espectro harmônico da corrente de entrada. Apesar da péssima qualidade da tensão de alimentação, a DHT_I de entrada obtida foi de 13,63%, valor quase idêntico ao obtido no caso base. Consolidando assim a possibilidade de se impor a forma de onda da corrente da maneira desejada, independentemente da tensão de entrada.

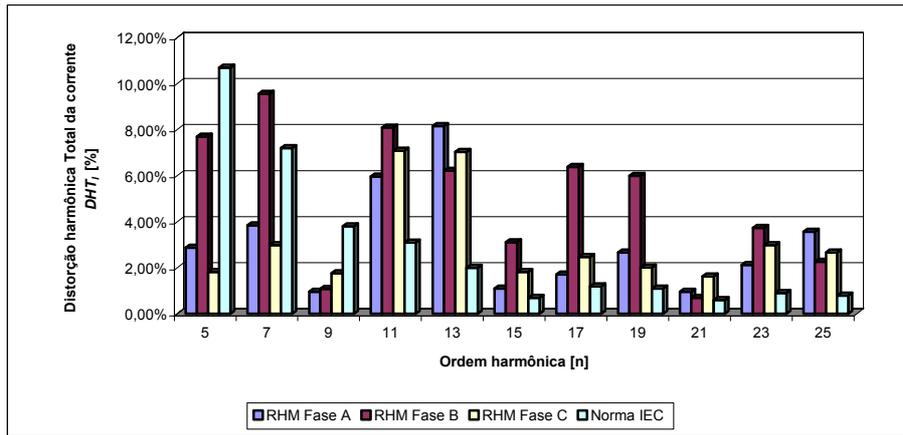


Figura 4.60 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.10 Caso 09 – Tensão com 5% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.

Esse caso é uma combinação das harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, e 13ª ordem, com 5% de distorção em cada uma delas. Os resultados são ilustrados pelas figuras 4.61 e 4.62.

Como pode ser observado nas formas de onda apresentadas na figura 4.60 a tensão de entrada se apresenta quase como uma onda quadrada, mas distorções impostas não alteraram a forma de onda da corrente de entrada, o que era esperado. O desempenho do retificador praticamente não sofreu alteração.

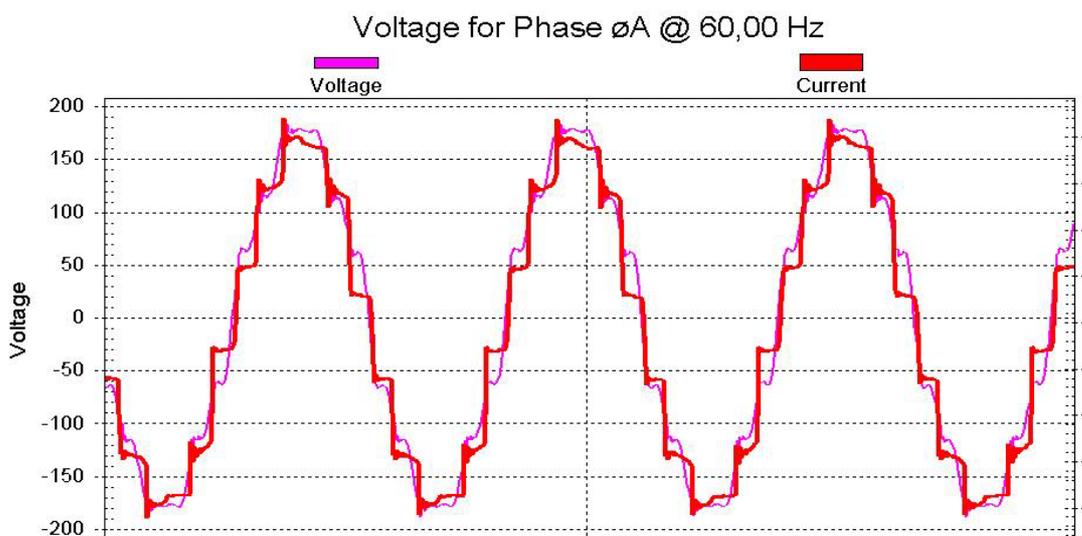


Figura 4.61 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimentação CA.

A figura 4.62 ilustra o espectro harmônico das correntes de linha. A distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I) obtida de 13,98%.

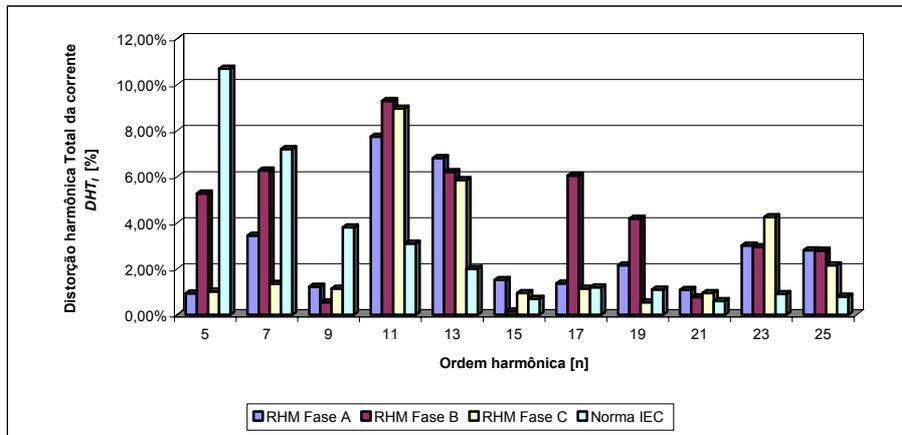


Figura 4.62 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.11 Caso 10 – Tensão com 10% de distorção na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica.

Nesse último caso ensaiado, o RHM é alimentado por uma fonte de tensão trifásica equilibrada puramente senoidal, com uma combinação de fontes de tensão com 10% harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem, ligadas em série com a fonte de tensão puramente senoidal. As figuras 4.63 e 4.64 ilustram o resultado da simulação.

Conforme pode ser observado na figura 4.63, a tensão de entrada adquiriu forma quadrada, praticamente igual à forma de onda da corrente, que mesmo para a situação bastante desfavorável à operação de qualquer equipamento, se apresenta bem comportada.

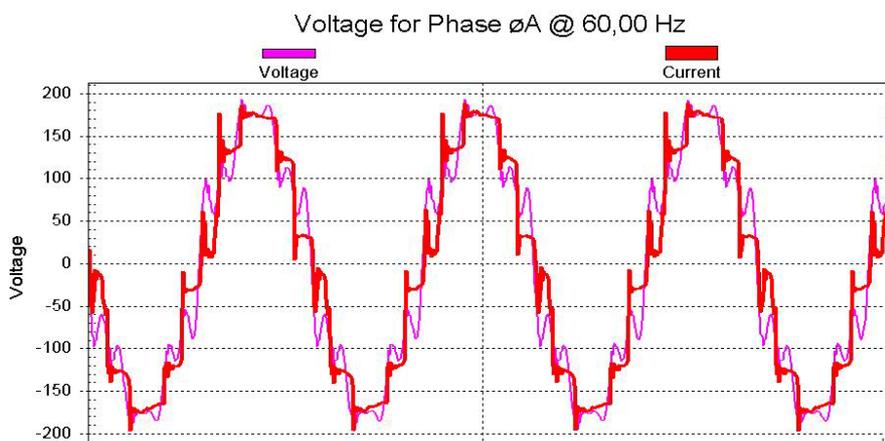


Figura 4.63 – Tensão v_{an} , fase-neutro e corrente $i_{a(in)}$ de alimetnação CA.

A figura 4.61 apresenta os espectros harmônicos da corrente de entrada. A DHTI da corrente de entrada obtida no ensaio foi de 16,34%, bem abaixo do valor exigido em norma.

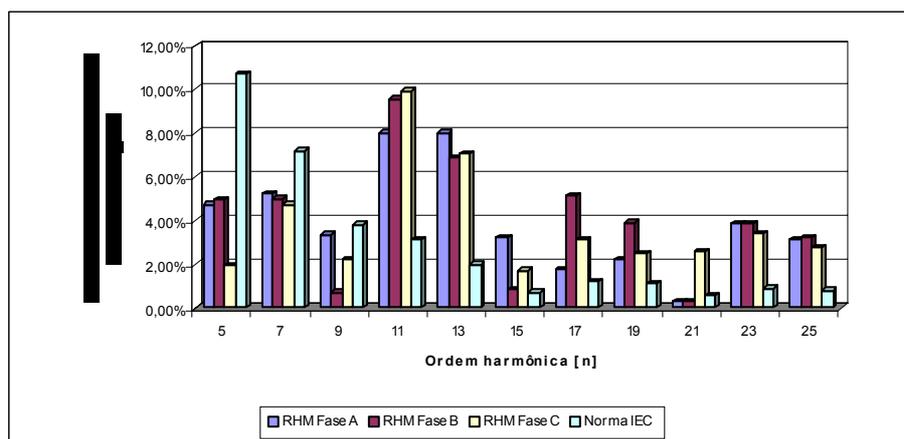


Figura 4.64 – Espectros harmônicos das Correntes de entrada do RHM – $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, e $i_{c(in)}$.

4.2.12 CONCLUSÃO

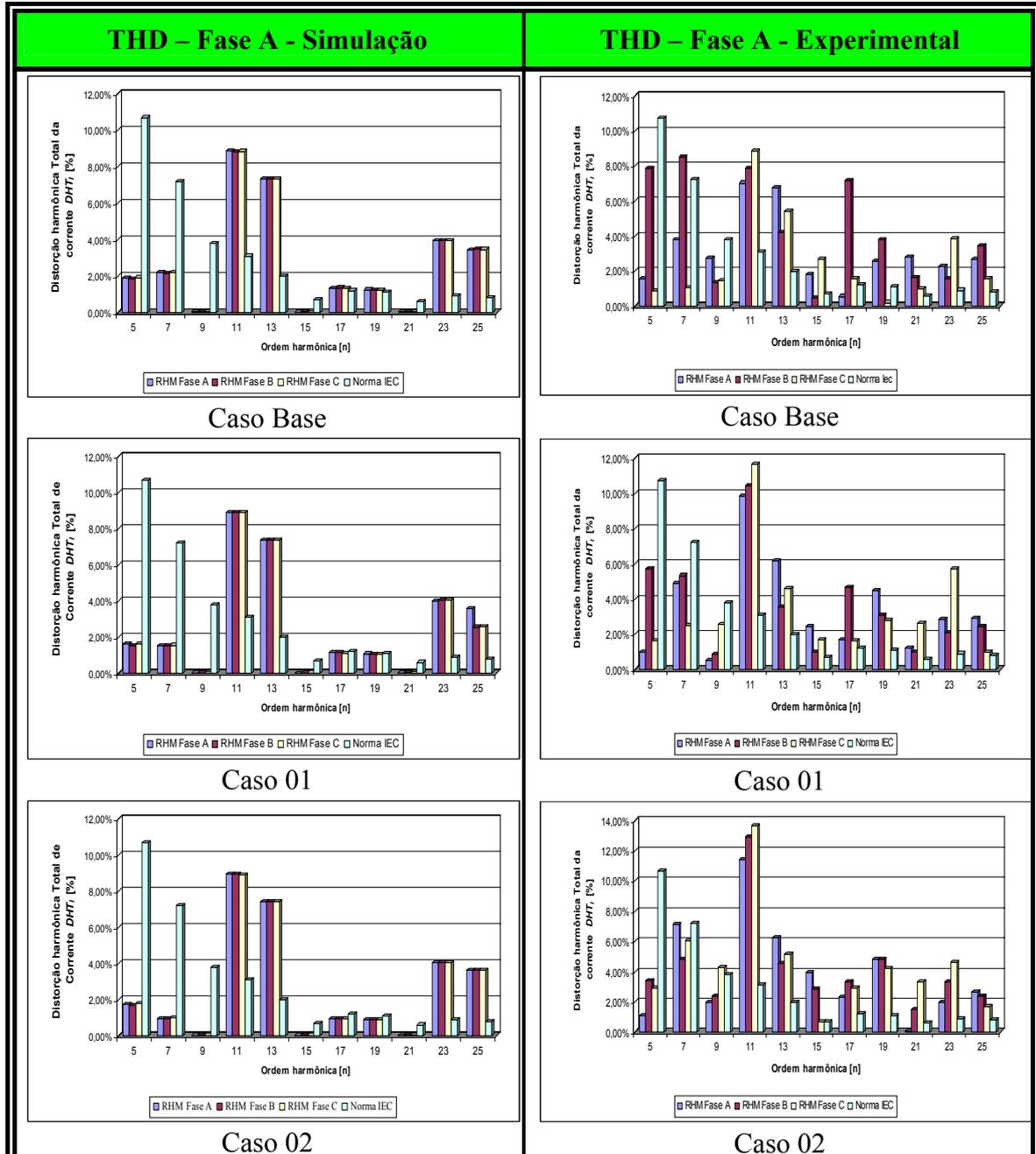
Os resultados apresentados nos ensaios experimentais puderam validar o que foi mostrado nas simulações, demonstrando que o RHM é capaz de operar com a preexistência de tensões harmônicas na rede de alimentação, e sem injetar distorções harmônicas de corrente de entrada na fonte. As formas de onda da corrente para todas as situações simuladas não apresentaram distorções consideráveis e a DHT_I também permaneceu praticamente a mesma. Isso se deve ao fato de que a corrente de entrada depende da corrente imposta no retificador controlado (Ret-2). Nesse sentido, o desempenho do RHM foi avaliado operando como um retificador de 12-pulsos convencional, demonstrando o seu ótimo resultado de DHT_I , superando as diversas topologias de retificadores de 12-pulsos apresentados na revisão bibliográfica.

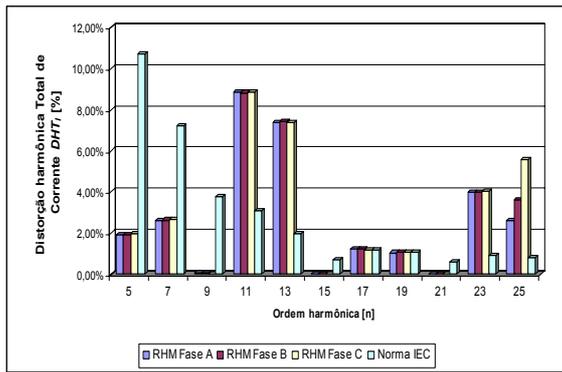
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

Os resultados dos DHT_I obtidos em todos os casos estudados ao longo desse trabalho. Os resultados obtidos nas simulações e ensaios experimentais são ilustrados pelos gráficos obtidos em cada ensaio e simulação, apresentados lado a lado na tabela 4.1. Observa-se que em cada caso os níveis de distorção harmônica total de corrente de entrada (DHT_I)

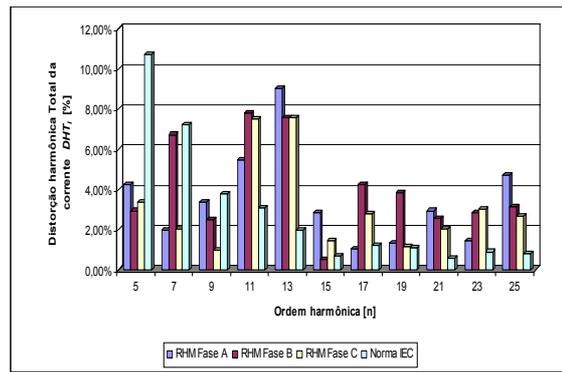
obtidos nos ensaios experimentais sofrem variações muito pequenas em relação aos resultados obtidos nas simulações.

Tabela 4.1 – Gráficos das DHT_i das correntes de entrada.

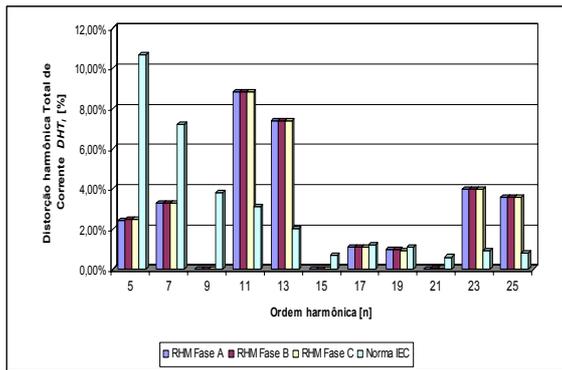




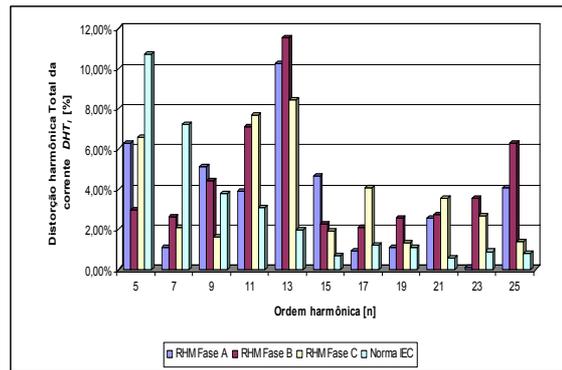
Caso 03



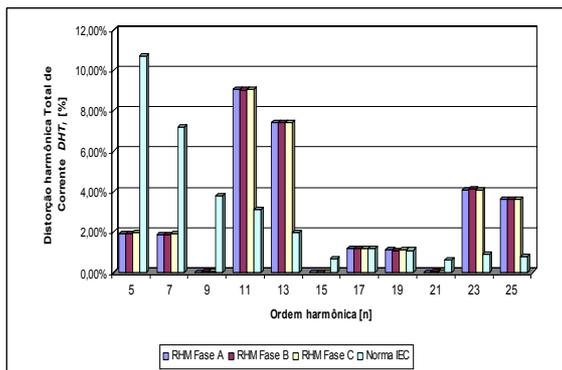
Caso 03



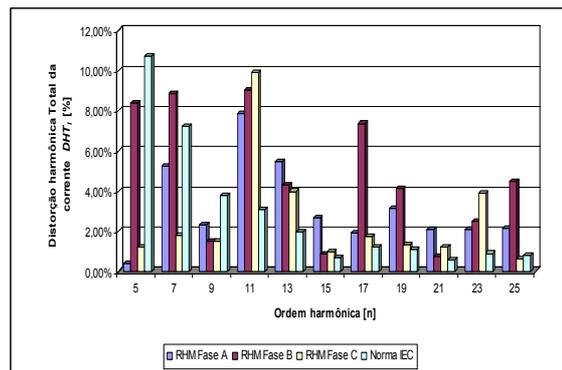
Caso 04



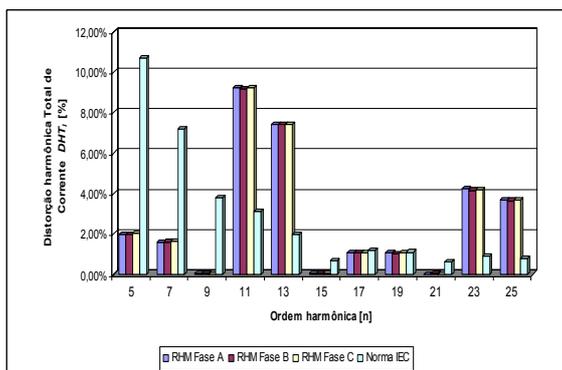
Caso 04



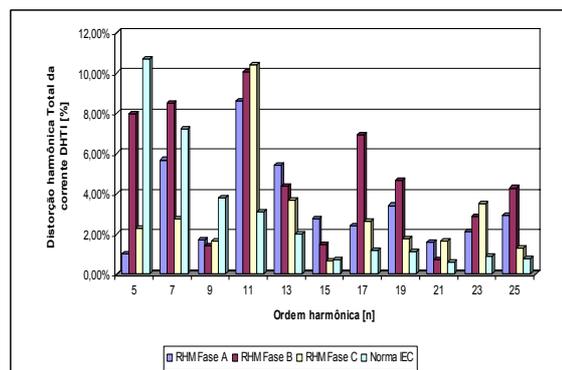
Caso 05



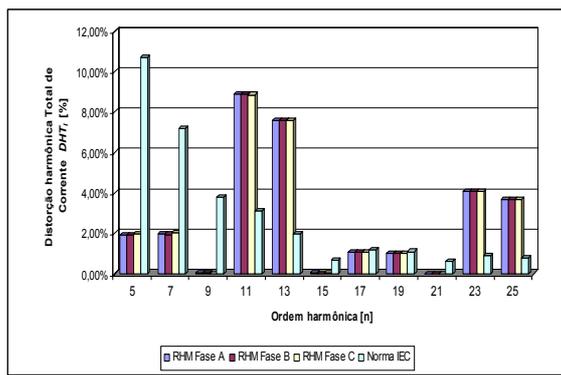
Caso 05



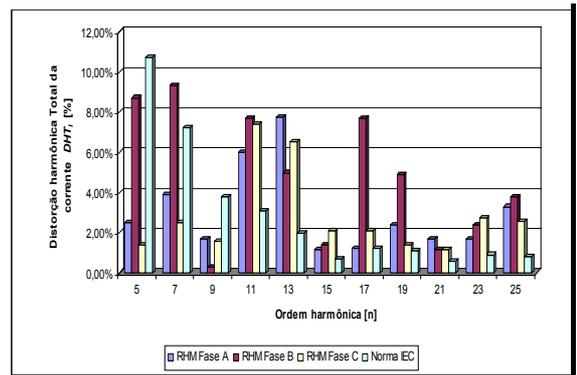
Caso 06



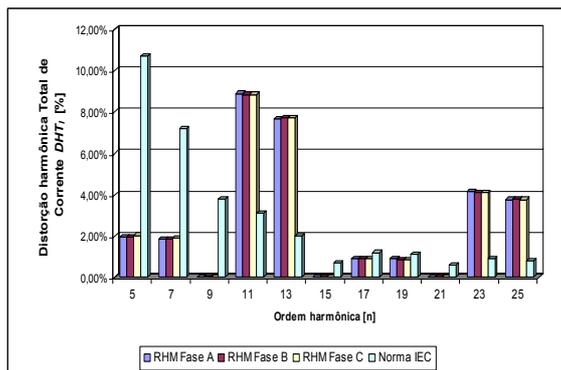
Caso 06



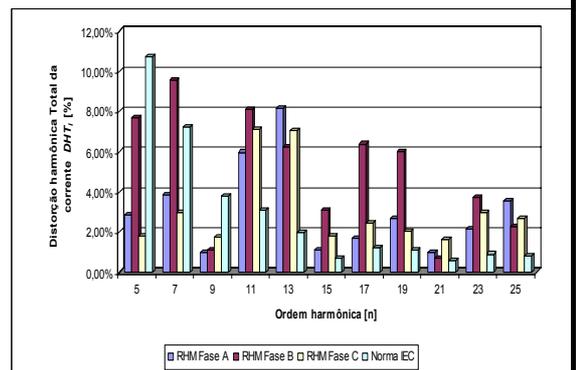
Caso 07



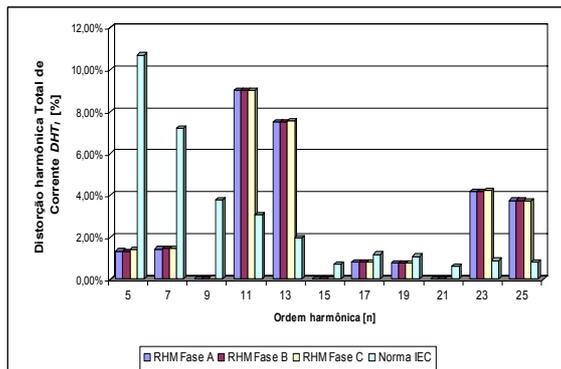
Caso 07



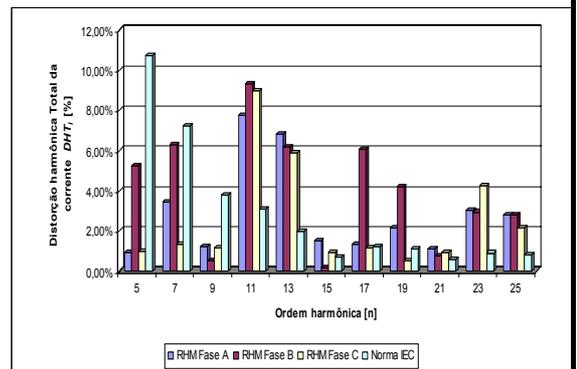
Caso 08



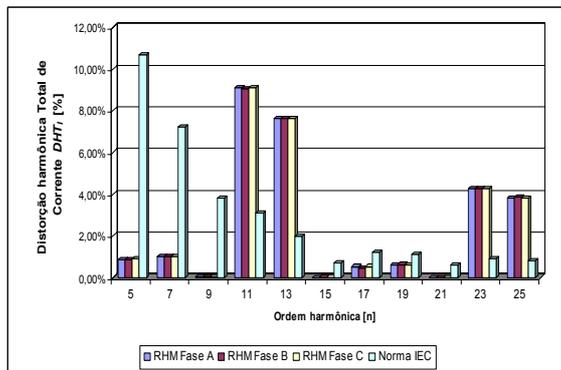
Caso 08



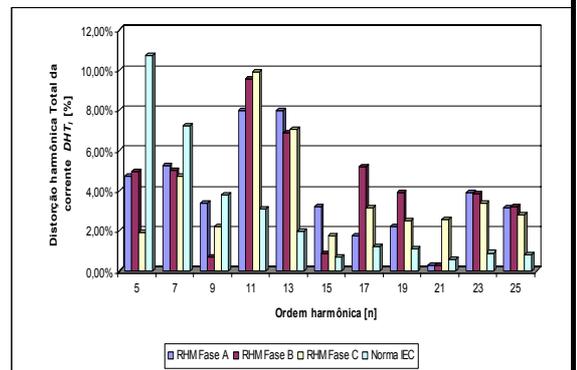
Caso 09



Caso 09



Caso 10



Caso 10

As figuras 4.65 a 4.69 ilustram os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios experimentais, as potências processadas, o fator de potência, as DHT_I de corrente de entrada de todos os casos estudados.

A figura 4.65 ilustra o fator de potência obtido em todos os casos ensaiados. Observa-se que em todos os casos ensaiados os fatores de potência apresentam bem elevados, apesar das distorções presentes nos ensaios. Os fatores de potência obtidos em todas as simulações foram de 0,98.

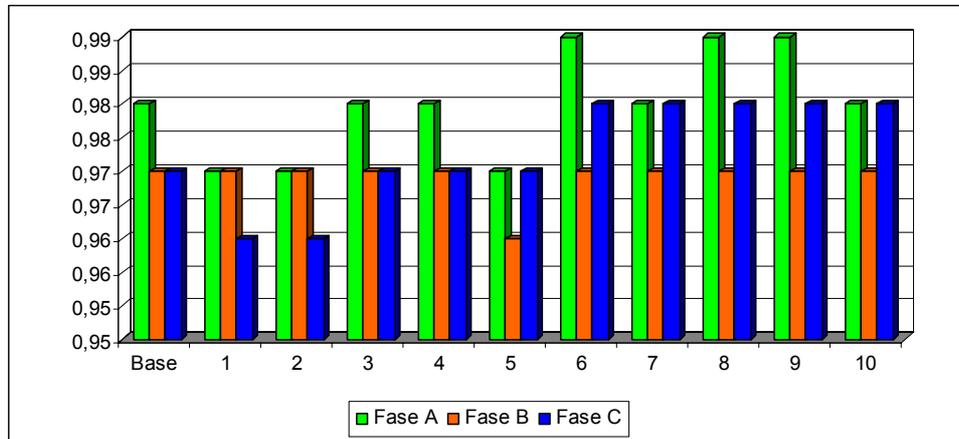


Figura 4.65 – Gráfico do Fator de potência. Experimental.

Nas figuras 4.66 e 4.67, observa-se que a potência total de saída obtida na simulação é um pouco maior que a obtida nos ensaios experimentais, o que era esperado, já que os componentes do RHM apresentam perdas.

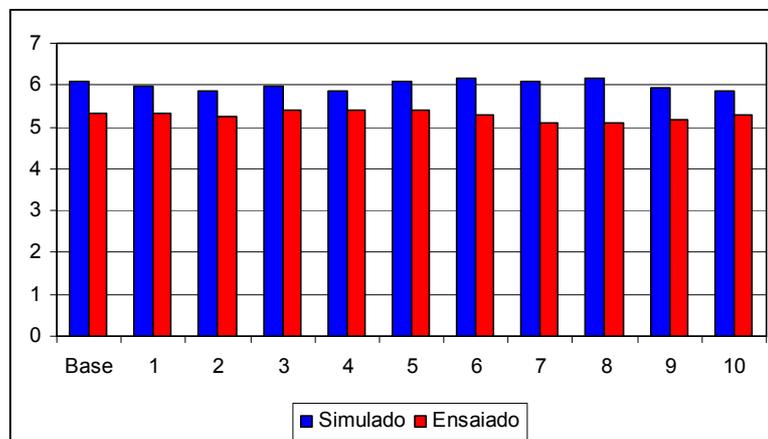


Figura 4.66 – Gráfico da Potência ativa total de saída. Experimental.

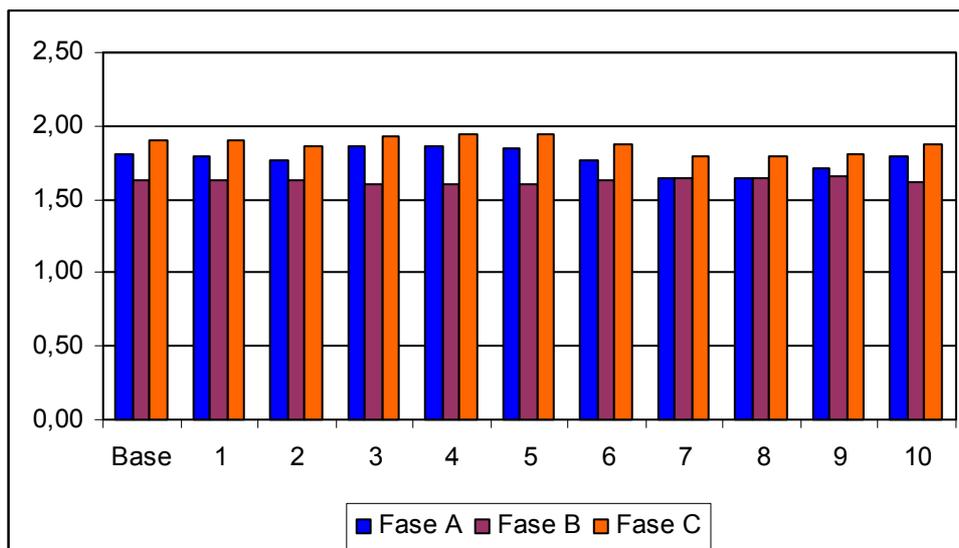


Figura 4.67 – Gráfico da Potência Ativa dissipada em cada fase. Experimental.

As DHT_I de corrente de entrada obtidas nas simulações e ensaios experimentais são ilustradas pelas figuras 4.68 e 4.69.

Observa-se que nas simulações os resultados apresentam as DHT_I todas com valores muito próximos, na ordem de 13%. Já os resultados dos ensaios experimentais apresentam algumas discrepâncias, entre fases. Isso se deve ao fato de que durante os ensaios no laboratório de qualidade da energia da Universidade de Brasília – UnB, a fonte de alimentação apresentou um problema. A fase “B” estava limitando a potência liberada, provocando um desequilíbrio da potência dissipada em cada fase, conforme pode ser verificado na figura 4.67.

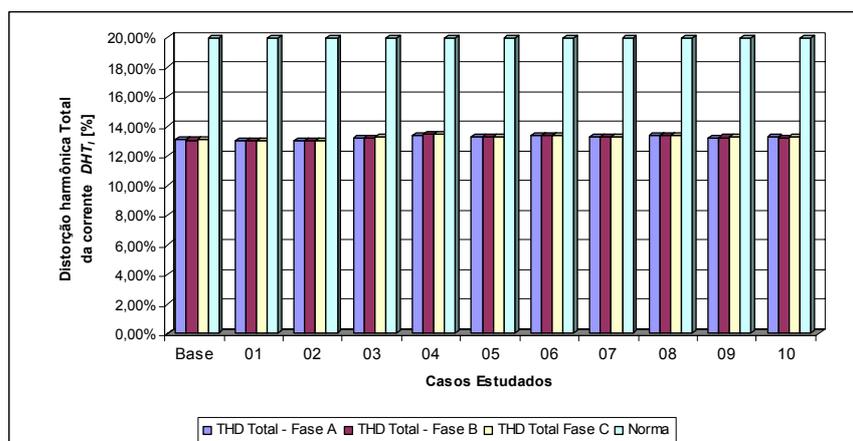


Figura 4.68 – Gráfico da DHT_I total da corrente de entrada das fases A, B e C. Computacional.

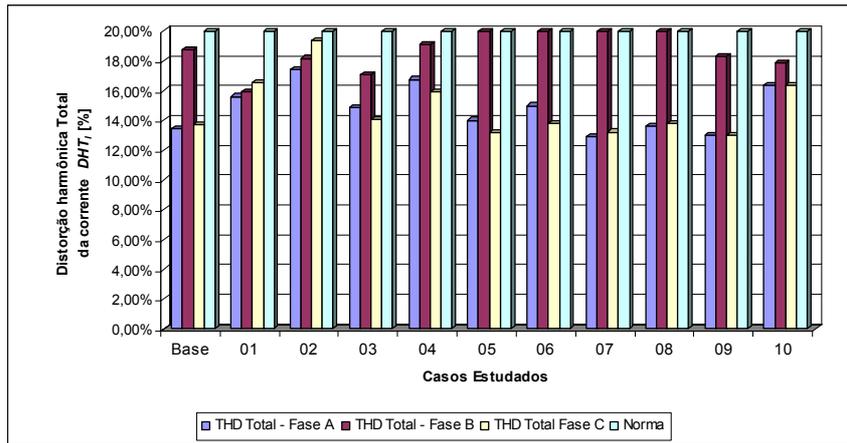


Figura 4.69 – Gráfico do DHT_I total da corrente de entrada das fases A, B e C. Experimental.

5. CONCLUSÕES

Durante a elaboração deste trabalho, procurou-se seguir uma linha analítica e crítica relativa aos aspectos operacionais dos retificadores de média potência, no contexto da qualidade de energia.

Esta dissertação objetivou um estudo completo da operação dos retificadores multipulsos, bem como o efeito desta operação sobre o sistema CA de alimentação. Apresentam e analisam uma nova proposta de retificador multipulsos, capaz de operar sem a necessidade do uso de transformadores defasadores, transformador de interfase e dispositivos de bloqueio de seqüência zero, e operando quase sem violar as normas internacionais que recomendam (determinam, regulam) o máximo THD_I , do ponto de vista da qualidade de energia.

A pesquisa bibliográfica evidenciou a necessidade de soluções para redução do conteúdo harmônico na rede, causado pela grande quantidade de cargas não-lineares, que atualmente representam mais de 50% das cargas existentes. Pelo que foi verificado nos diversos trabalhos encontrados na literatura especializada, o desenvolvimento de retificadores multipulsos se concentrava no aprimoramento de transformadores defasadores, transformadores de interfase e reatores bloqueadores de harmônicas.

O capítulo 1 procurou-se mostrar a necessidade do controle e melhoria da qualidade no fornecimento da energia elétrica. Foi feito um breve histórico do grande avanço tecnológico e a importância da eletrônica de potência para consolidar essa evolução. Procurou-se mostrar os problemas causados o aumento de cargas não-lineares conectadas ao sistema CA de distribuição e a preocupação dos órgãos reguladores do sistema elétrico brasileiro com a questão da Qualidade da Energia Elétrica.

Destacou-se ainda o quanto as concessionárias sofrem com o conteúdo harmônico injetado na rede e, os enormes prejuízos para o sistema elétrico brasileiro. Mostrou-se o quanto o problema se agrava quando as estruturas retificadoras atingem potências mais elevadas, tornando a solução do problema de distorção harmônica muito mais complexa e onerosas. Foi demonstrado que o RHM é uma solução inovadora e de grande valia no combate aos conteúdos harmônicos da rede de alimentação CA

No capítulo 2, procurou-se mostrar os problemas causados pelo aumento das cargas não-lineares e as soluções possíveis encontradas na literatura. As pesquisas mostraram a necessidade de melhorias que visem a redução do conteúdo harmônico na rede. Foram apresentadas normas internacionais que impõem restrições para aplicações de estruturas de conversores monofásicos e trifásicos, quais as opções clássicas adotadas.

Nessa fase foi apresentado o estado da arte sobre retificadores multipulsos, apresentado os diversos trabalhos encontrados na literatura. As vantagens e desvantagens de cada estrutura foram citadas com objetivo de ilustrar o que tem sido feito no tocante ao desenvolvimento dos retificadores multipulsos. Foram apresentadas diversas soluções clássicas adotadas para mitigar os problemas provenientes das distorções harmônicas provocadas pelo uso maciço de cargas não-lineares.

Ficou demonstrado que a melhor opção para reduzir os conteúdos harmônicos da rede de alimentação é o retificador multipulsos, para aplicações de potências mais elevadas. Os aspectos tecnológicos desses retificadores multipulsos também foram apresentados neste capítulo, bem como os trabalhos de melhorias desenvolvidos por diversos pesquisadores, mostrando as técnicas de ativas e passivas para a redução do conteúdo harmônico da corrente de alimentação, os tipos de filtros utilizados, diversas soluções propostas por pesquisadores de todo o mundo.

Desta forma, a estrutura avaliada apresentou resultados que demonstram atratividade para aplicações até cerca de dezenas de kW. Nesse sentido, essa nova estrutura pode ser utilizada em substituição aos retificadores multipulsos convencionais que utilizam transformadores defasadores e transformadores de interfase, devido principalmente, aos baixos custos, reduzidos volume e peso e devido à sua simplicidade de projeto e implementação.

O Retificador Híbrido Multipulsos (RHM) foi apresentado como uma solução inovadora para minimizar o conteúdo harmônico da corrente CA de alimentação. O princípio básico de funcionamento apresentou como destaque, a possibilidade de impor a forma de onda da corrente de entrada, possibilitada pela associação de retificadores chaveados em paralelo com retificadores não-controlados.

A solução proposta ofereceu inicialmente como grande contribuição, a eliminação da necessidade da utilização de transformadores defasadores, transformadores de interfase e reatores bloqueadores de harmônicas, obtendo uma melhoria no conteúdo harmônico.

Verificou-se que o Retificador Híbrido Multipulsos é capaz de operar em situações em que a fonte de alimentação apresenta altos níveis de distorção, sem alterar o seu desempenho, mantendo as mesmas características de operação para uma alimentação livre de perturbações.

Ao final da apresentação do estado da arte foi apresentado o Retificador Híbrido Multipulsos Programável de Elevado Fator de Potência e Reduzida Taxa de Distorção Harmônica de Corrente estudado, apresentando as soluções propostas, e descrevendo a sua estrutura. Foram destacadas as principais vantagens e desvantagens do retificador híbrido multipulsos avaliado, o seu aspecto construtivo e a sua melhor faixa de operação, destacando a metodologia e apresentando as contribuições, sempre buscando referenciar os trabalhos de destaque encontrados durante a revisão bibliográfica.

No Capítulo 3 foi apresentada a proposta deste trabalho que consiste em avaliar uma nova estrutura de retificador híbrido multipulsos, no contexto da qualidade da energia. Objetivou-se a avaliação dos índices de distorção harmônica da corrente CA de alimentação em condições não-ideais de alimentação, incluindo desequilíbrio e/ou distorção harmônica na rede de alimentação.

Ainda no capítulo 3 apresentou-se o retificador, descrevendo as partes e detalhes construtivos. O princípio básico de funcionamento do retificador foi apresentado, destacando suas principais características. Um breve histórico do desenvolvimento do protótipo foi apresentado, bem como os recursos laboratoriais fornecidos pela Universidade de Brasília e da Universidade Federal de Uberlândia. Os estudos computacionais tiveram a contribuição do programa de simulação *SPICE*.

No capítulo 4 são mostrados os ensaios caso a caso, onde a análise dos resultados confirmam que tanto nas simulações quanto nos ensaios experimentais. O retificador apresenta uma variação mínima, tanto em condição ideal de suprimento de energia (puramente senoidal), como nas condições de fornecimento com presença de harmônicas

individuais ímpares, de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem, variando 5% e 10% em cada aplicação, até chegar à condição em que todas as harmônicas estavam presentes em uma combinação. Ficou comprovado que o retificador não sofre influência das variações da tensão alimentação CA.

Os resultados apresentados a cada caso ensaiado e simulado demonstraram que o comportamento do retificador permanecia inalterado mesmo diante das distorções a ele impostas. Amostras da forma de onda da tensão e corrente de entrada das simulações e ensaios foram colhidas, destacando que os resultados apresentaram-se coerentes. Também obtivemos valores das harmônicas individuais e totais, com os quais foram montados gráficos de DHT_I da corrente de entrada, e da mesma forma, comparado com os gráficos elaborados através de dados obtidos por ensaios computacionais.

Os resultados foram bastante satisfatórios, mostrando uma coerência entre os resultados experimentais e computacionais. Verificou-se que para cada caso estudado, o comportamento da corrente de entrada praticamente não era alterado, comprovando que o Retificador Híbrido Multipulsos é capaz de impor a corrente de entrada da forma que desejar, independentemente das variações da tensão de alimentação, o que possibilita manter o fator de potência próximo de 1. Foi demonstrado que o Retificador Híbrido consegue uma reduzida taxa de distorção na corrente de entrada.

Finalmente, a análise dos resultados obtidos não deixa dúvidas de que o Retificador Híbrido Multipulsos é capaz de operar com fontes de alimentação CA distorcidas sem perder as suas características operacionais, sem injetar distorções harmônicas ao sistema supridor. Comprovou-se que o RHM realmente é uma solução inovadora e de grande valia para bom desempenho do sistema elétrico.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como recomendação para pesquisas futuras, pode-se seguir esse trabalho deixa como proposta, a continuidade dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos, no sentido de buscar o aprimoramento dos filtros passivos para reduzir o conteúdo harmônico das componentes de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a ordens que, comprovadamente estão presentes em todas as soluções apresentadas, inclusive esta que foi estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] April, G. E. & Olivier, G. A novel type of 12 pulse converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1982.
- [2] Chivite-Zabala, F. & Forsyth, A. J. A Simple, passive 24-pulse ac-dc converter with inherent load balancing using harmonic voltage injection. *IEEE Power Electronics Specialist Conference, June 2005*.
- [3] Choi, S.; Enjeti, P. N. & Paice, D. A. New 24-pulse diode rectifier system for utility interface of high power ac motor drives. *IEEE Applied Power Electronics Conference, 1996*.
- [4] Dahono, P. A.; Halimi, B. & Matinius, S. A transformer connection for multipulse rectifier applications. *IEEE International Conference on Power System Technology, vol. 2, no., Oct. 2002*.
- [5] Dixon, L. High power factor pre-regulators for online power supplies. Unitrode Seminar, 1988.
- [6] Enjeti, N. P. & Jahong, H. A wide input range active multi-pulse tree-phase rectifier for utility interface of power electronic converters. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol. 4, no., Oct. 2002*.
- [7] Goldemberg, C. ; *et al.* Thyristor controlled rectifiers for subway substations. *IEEE Power Electronics Specialist Conference, June 2005*.
- [8] Gomes, L. C. F. ; Simões M. G. ; Canesin C. A. ; de Freitas L. C. A novel programmable pfc based hybrid rectifier for ultra clean power application. In *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, p.4803 - 4807, 2004.
- [9] Gomes, L. C. F. ; Coelho E. A. A. ; Finazzi A. P. ; Simões M. G.; Canesin C. A. ; de Freitas L. C. Programmable pfc based hybrid multipulse power rectifier for utility interface of power electronic converters. In *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, p.2237 - 2243, 2005.
- [10] Gomes, L. C. F. ; Coelho E. A. A. ; Simões M. G. ; Canesin C. A.; de Freitas L. C. Um novo retificador trifásico híbrido multipulsos com elevado fator de potência. *Revista Eletrônica de Potência*, 10(2): 17–24 Novembro 2005.

- [11] Gomes, L. C. F. ; Simões M. G.; Canesin C. A. ; de Freitas L. C. A novel programmable pfc based hybrid rectifier for ultra clean power application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Publicação prevista para: Vol.21, no4, Julho, 2006.
- [12] Gomes, L.C.F. Tese de Doutorado. Um Novo Retificador Híbrido Multipulsos sem a Utilização de Transformador defasadores e/ou Transformadores s de Interfase. [Março 2006].
- [13] Fukuda, S. & Ohta, M. An Auxiliary-supply-assisted twelve-pulse diode rectifier with reduced input current harmonics. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, June 2005*.
- [14] Galhardo, M. A. B. & Pinho, J. T. Conceitos de distorção e não-linearidades. *V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto 2003*.
- [15] GGOI/SCEL e GCPS/CTST – Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais - Revisão 1 – *Novembro de 1997*.
- [16] Guimarães, C.; Oliver, G. & April, G. E. High current ac/dc converters using t-connected transformers. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 2, no., Sept. 1995*.
- [17] Hahn, J.; Enjeti, P. N. & Pitel, I. J. A new three-phase power-factor correction (pfc) scheme using two single-phase pfc modules. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 38, no. 1, Jan./Fev. 2002*.
- [18] IEEE-Std-519-1992 – Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. *ISBN EU-55937-239-7*.
- [19] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-2, Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current lower than 16A per phase), *1 ed., Outubro 1998*.
- [20] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-2, Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current lower than 16A per phase), *2 ed., Agosto 2000*.
- [21] Kim, J. H.; Lee, D. Y.; Choi, H. S. & Cho, B. H. High performance boost pfp (power factor pre-regulator) with an improved zvt (zero voltage transition) converter. *IEEE Applied Power Electronics Conference, 2001*.

- [22] Kolar, J. W. & Sun, J. Three-phase power factor correction technology. *IEEE PEC Seminars 1 and 4, 2001*.
- [23] Lin, B.; Yang, T. & Lee, Y. Three-phase high power factor with unidirectional power flow. *IEEE International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2003*.
- [24] Maksimovic, D. Design of the clamped-current high-power-factor boost rectifier. *IEEE Applied Power Electronics Conference, 1994*.
- [25] Moschopoulos, G.; Jain, P. K.; Liu, Y. F. & Joós, G.; A zero-voltageswitched pwm boost converter with an energy feedforward auxiliary circuit. *IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 4, Julho 1999*.
- [26] Nakamura, N.; Shimada, M.; Myoui, T.; Sadakata, H.; Moisseev, S. & Nakaoka, M. Performance evaluations on soft-switching boost power converter with a single auxiliary passive resonant snubber. *IEEE Power Electronics Specialist Conference, 2001*.
- [27] Oliver, G.; April, G. E.; Ngandhui, E. & Guimaraes, C. Novel transformer connection to improve current sharing in high-current dc rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 1, Jan./Feb. 1995*.
- [28] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Módulo 2 – Sub-módulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica, Rev. 2, *Dezembro de 2002*.
- [29] Pice, D. A. Power Electronic Converter Harmonics - Multipulse Methods for Clean Power. *IEEE Press, 1996*.
- [30] Prasad, A. R.; Ziogas, P. D. & Manias, S. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, no. 1, Janeiro 1991*.
- [31] Prasad, A. R. & Ziogas, P. D. Active input current waveshaping method for three-phase diode rectifiers with zero switching losses. *IEEE Industry Application Society - Annual Meeting, 1991*.
- [32] Prasad, A. R. & Ziogas, P. D. Single-switch three-phase ac/dc converter with high power factor and wide regulation capability. *IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1992*.

- [33] Ray, W. F.; Davis, R. M. & Weatherhogg, I. D. The three-phase bridge rectifier with capacitive load. *Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drivers, 1988*.
- [34] Redl, R. & Erisman, B. P. Reducing distortion in peak-current-controlled boost power-factor correctors. *IEEE Applied Power Electronics Conference, 1994*.
- [35] Redl, R. Low-cost line harmonics reduction. *IEEE Applied Power Electronics Conference - Seminar 7, 1995*.
- [36] Rendusara, D. A.; Jouanne, A. V.; Enjeti, P. N. & Paice, D. A. Design considerations for 12-pulse diode rectifier system operating under voltage unbalance and pre-existing voltage distortion with some corrective measures. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1995*.
- [37] Resende, J. W.; Samesima, M. I.; Gomes, D. B.; Couto, L. M. & Jr., J. R. M. Avaliação das perdas técnicas em sistemas elétricos de distribuição suprindo cargas não-lineares. *V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto 2003*.
- [38] Santos, A. H. M, *et al.* Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. *Editora da EFEI, 2001*.
- [39] Rice, D. E. A detailed analysis of six-pulse converter harmonic currents. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 2, Mar./Apr. 1994*.
- [40] Schaffer, J. Rectifier Circuits: Theory and Design. *New York: John Wiley & Sons-Interscience, 1965*.
- [41] Spiazzi, G. & Lee, F. C. Implementation of single-phase boost power-factor correction circuits in three-phase applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 3, Junho 1997*.
- [42] Todd, P. C. Uc3854 controlled power factor correction circuit design. *Application note U-134 - Unitrode*.
- [43] Tostes, M. E. L.; Moura, C. C.; Bezerra, U. H.; de Souza, R. D. & Branco, S. T. M. Fluxo de harmônico trifásico via método somatório de corrente. *V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto 2003*.

- [44] Wakabayashi, F. T. & Canesin, C. A. Retificador pre-regulador boost com elevados fator de potência e rendimento, para sistemas de telecomunicações. *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 7, no. 1, Novembro 2002.