

Capítulo 7

Implementação do Protótipo do RHM operando com Corrente CA de Alimentação de 12 Pulsos Imposta

7.1 Introdução

Durante os estudos realizados em laboratório, três protótipos do RHM proposto, operando com correntes CA de alimentação de 12 pulsos impostas, foram construídos. Primeiramente, para analisar o desempenho do RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados para compor o grupo retificador 2 (Ret-2), construiu-se um protótipo de 3 kW [32], [35].

Através da implementação deste primeiro protótipo, foi possível aprimorar o circuito de controle utilizado e mais dois protótipos de 6 kW foram implementados.

Desse modo, são apresentados neste capítulo, os resultados experimentais referentes a implementação de dois retificadores de 12 pulsos de 6 kW [33], [34], [53].

No primeiro protótipo de 6 kW, o RHM proposto foi construído utilizando-se conversores *SEPIC* modificados para compor o grupo retificador 2 (Ret-2). O segundo protótipo de 6 kW foi construído utilizando-se conversores *Boost* alimentados através de transformadores isoladores.

Para a implementação dos protótipos do RHM proposto, operando como um retificador de 12 pulsos convencional, os conversores *SEPIC* modificados e os conversores *Boost* foram projetados utilizando-se os roteiros de projeto apresentados em [54] e [55].

7.2 Estratégia de Controle Implementada em Laboratório

Os protótipos foram construídos utilizando-se dispositivos analógicos na implementação do circuito de controle.

A Fig.7.1 ilustra o diagrama elétrico do circuito implementado e detalhes do circuito de controle utilizado para controlar a corrente de alimentação dos conversores chaveados, compondo os 12 pulsos da corrente CA de alimentação (Fase A) do RHM.

Conforme apresentado na Fig.7.1, no primeiro bloco (gerador de pulsos), uma amostra da tensão fase-neutro de alimentação é retificada e comparada com níveis CC de tensão.

O sinal de saída dos comparadores é aplicado a uma porta *OR* resultando em um sinal pulsado com largura de pulso igual a 60° e amplitude igual à tensão de alimentação dos

comparadores. Desta maneira, a forma de onda do sinal de referência de corrente desejado é obtido.

Em um segundo estágio (circuito multiplicador), o sinal de referência de corrente é filtrado e sua amplitude é reduzida a um valor unitário para que seja aplicado ao circuito multiplicador.

Através da utilização de um sensor de efeito hall colocado no lado CC do retificador de seis pulsos não-controlado, tem-se, na saída do circuito multiplicador, um sinal proporcional ao valor médio da corrente que flui através do indutor de filtro (L_{F1}).

No modo de operação com corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta, o sinal de referência deve ser proporcional a $1/3$ da corrente I_{Ret-1} . Desta maneira, o sinal de referência de corrente para impor a forma de onda desejada da corrente de alimentação do conversor *SEPIC* modificado, é obtido na saída do circuito multiplicador.

Finalmente, o circuito para geração de um sinal PWM de referência recebe o sinal proveniente do circuito multiplicador que, somado a um sinal *Dente de Serra* (V_S), fornece um sinal PWM de referência de corrente.

Este sinal é comparado com o sinal da corrente que flui através dos indutores de entrada do conversor *SEPIC* modificado (obtido através de um sensor de efeito hall) e, conseqüentemente, o sinal de ataque de gatilho para acionar o interruptor de cada conversor chaveado é obtido.

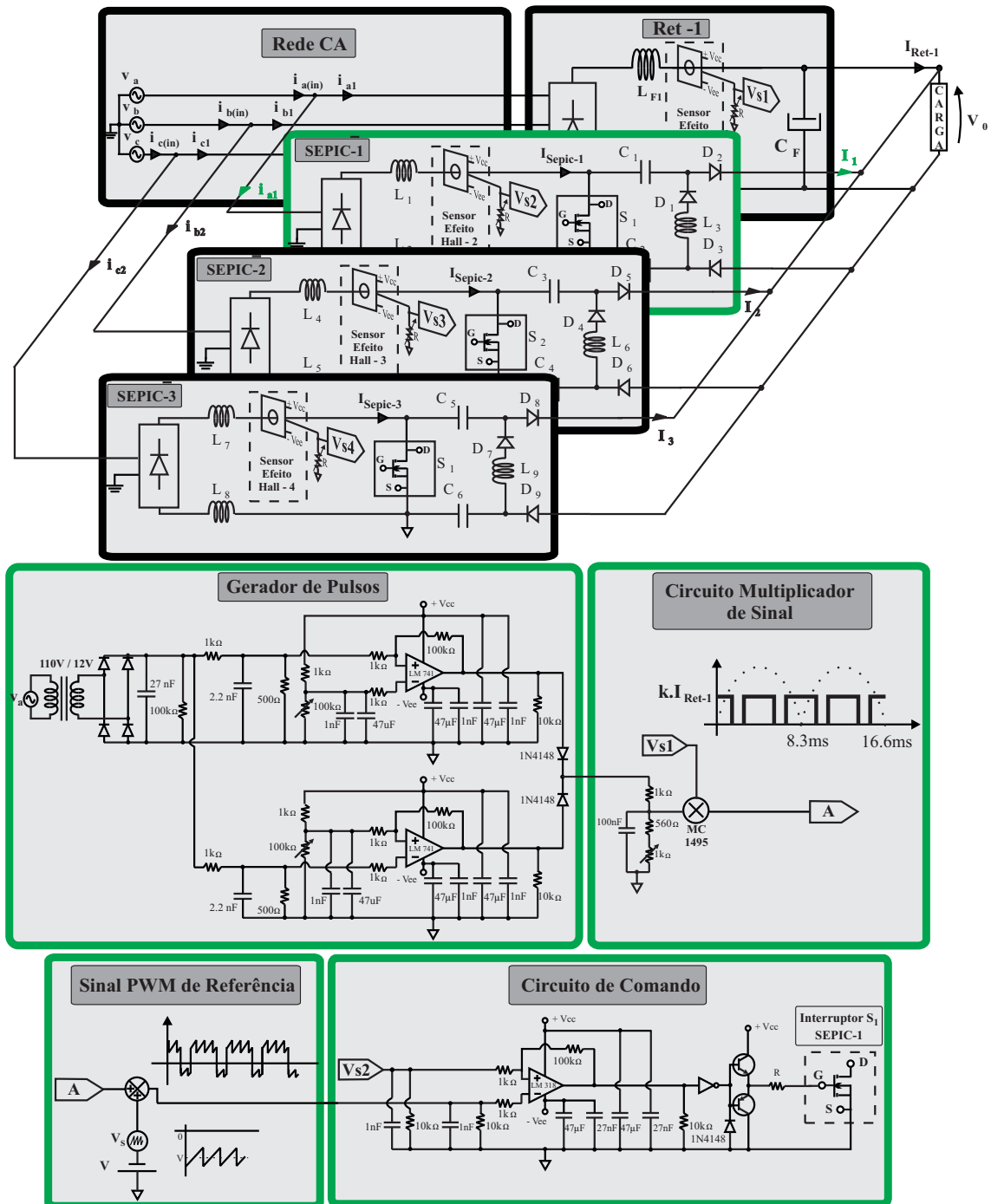


Figura 7.1: Controle implementado em laboratório para impor correntes de 12 pulsos na rede CA de alimentação.

7.3 Resultados Experimentais

Foram implementados dois protótipos do RHM operando como um retificador de 12 pulsos convencional, com potência nominal de saída igual a 6 kW. O primeiro protótipo

foi construído utilizando-se conversores *SEPIC* modificados, e o segundo protótipo foi construído utilizando-se conversores *Boost* alimentados por transformadores isoladores.

Utilizando-se dispositivos analógicos, a estratégia de controle apresentada na Fig. 7.1, foi implementada na análise experimental.

7.3.1 RHM Utilizando Conversores *SEPIC* Modificados

Após a realização de um detalhado estudo desenvolvido por simulações utilizando-se o software *PSpice*®, um protótipo de 6 kW do RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados foi construído e avaliado em laboratório, como mostram as Figs.7.2 e 7.3.

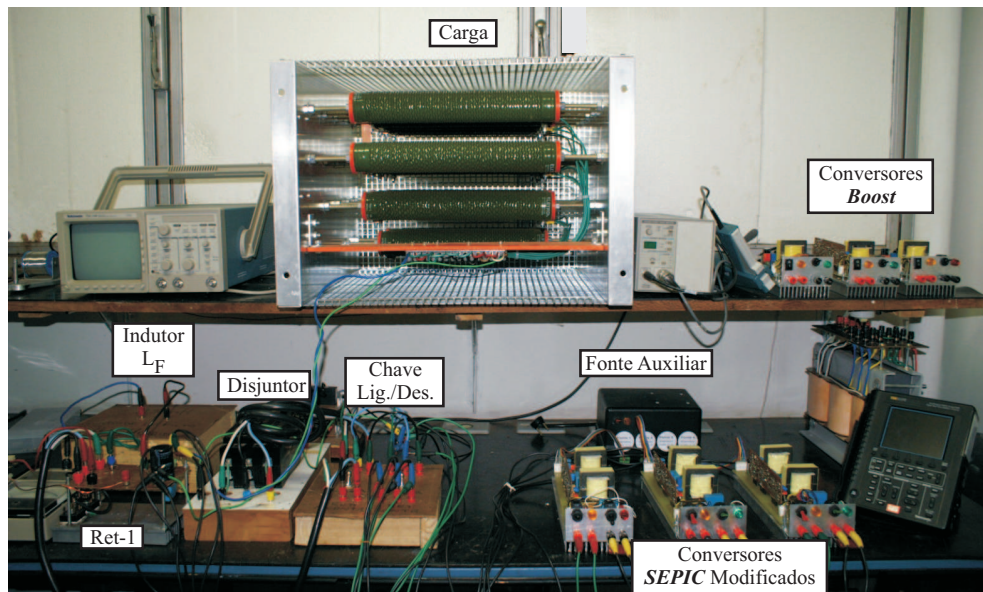
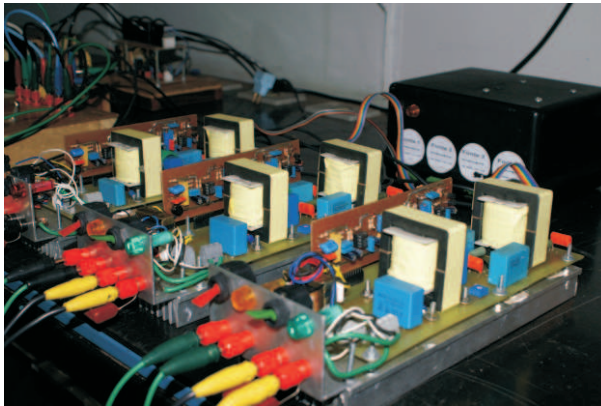


Figura 7.2: Ensaio realizado em laboratório - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

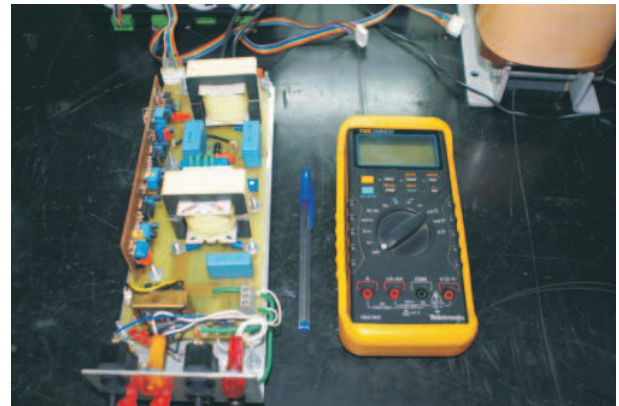
Todos os parâmetros utilizados para a implementação do protótipo mostrado na Fig.7.2 são apresentados na Tab.7.1.

Os principais resultados experimentais são apresentados nas Fig.7.4 até Fig. 7.10.

As correntes CA de alimentação do Ret-1 e do Ret-2 são mostradas na Fig.7.4. Na



(a) Grupo retificador 2

(b) Conversor *SEPIC* modificadoFigura 7.3: Protótipo implementado em laboratório - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.Tabela 7.1: Parâmetros Ajustados - Protótipo do RHM Utilizando Conversores *SEPIC* Modificados - Corrente CA Alimentação de 12 Pulsos Imposta

Retificador de Seis pulsos Não-controlado (Ret-1)	Conversores <i>SEPIC</i> Modificados (Ret-2)
Capacitor de filtro, $C_F = 470 \mu$	Capacitores, $C_{F1-F3} = 47 \mu F$
-	Capacitores, $C_{1-6} = 1 \mu F$
Indutor de filtro, $L_{F1} = 10 \text{ mH}$	Ind. acoplados de entrada, $L_{1-6} = 400 \mu H$
Indutor de filtro, $L_{F2} = 5 \text{ mH}$	-
-	Indutores, $L_{7-9} = 2 \text{ mH}$
Ponte retificadora trifásica - Toshiba 30J6P41	Ponte retificadora monofásica - HFA15TB60
-	Interruptores, $S_{1-3} = \text{IRFP 460}$
-	Diodos, $D_{1-6} = \text{HFA08TB60}$
-	Snubber, RC - 47Ω e 2.2 nF
-	Snubber, RCD - 47Ω , 2.2 nF e UF4007
Potência Processada, $P_{Ret-1} = 5,800 \text{ kW}$ 85,30%	Potência Processada, $P_{Ret-2} = 1,000 \text{ kW}$ 14,70%

Fig.7.4(a) observa-se a corrente da fase A do retificador de seis pulsos convencional, e na Fig.7.4(b) é apresentada a forma de onda da corrente imposta no conversor *SEPIC* modificado conectado à fase da rede CA de alimentação.

O acentuado *ripple* de alta frequência da corrente i_{a2} acontece em função da presença do capacitor série do conversor *SEPIC* que, juntamente com o capacitor do barramento CC do Ret-1, força o decrescimento de i_{a2} enquanto o interruptor é mantido aberto. Destaca-se que o *ripple* da corrente i_{a2} é bem menor quando conversores *Boost* são utilizados para

compor o Ret-2.

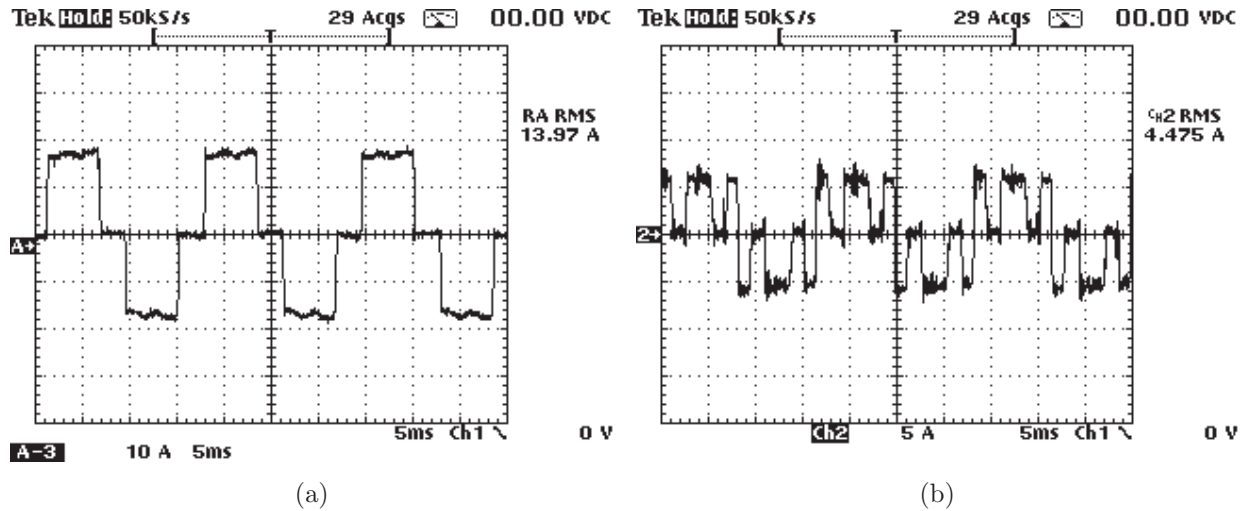


Figura 7.4: Correntes CA de alimentação: (a) retificador de seis pulsos não-controlado i_{a2} (Ret-1) (b) conversor Boost conectado à fase A i_{a2} (Ret-2)

A corrente de linha da fase A com forma de 12 pulsos é apresentada na Fig.7.5(a). Observa-se que a composição dos 12 pulsos da corrente CA de alimentação do RHM é alcançada com sucesso.

Na Fig.7.5(b), a corrente de linha da fase A é mostrada juntamente com a tensão fase-neutro da rede CA de alimentação, destacando-se que o fator de deslocamento entre a tensão e a corrente é praticamente nulo. Este fato, associado ao baixo conteúdo harmônico da corrente de linha, torna possível a obtenção de um elevado fator de potência de entrada.

Ilustrando a composição da forma de onda da corrente CA de alimentação da fase A, são apresentadas na Fig.7.6(a), as correntes de entrada do Ret-1 e do Ret-2.

Na Fig.7.6(b), são mostradas as três correntes drenadas da rede CA de alimentação com forma de onda de 12 pulsos imposta.

Com o *Trigger* do osciloscópio de dois canais ajustado para o sinal da tensão v_{an} , foi

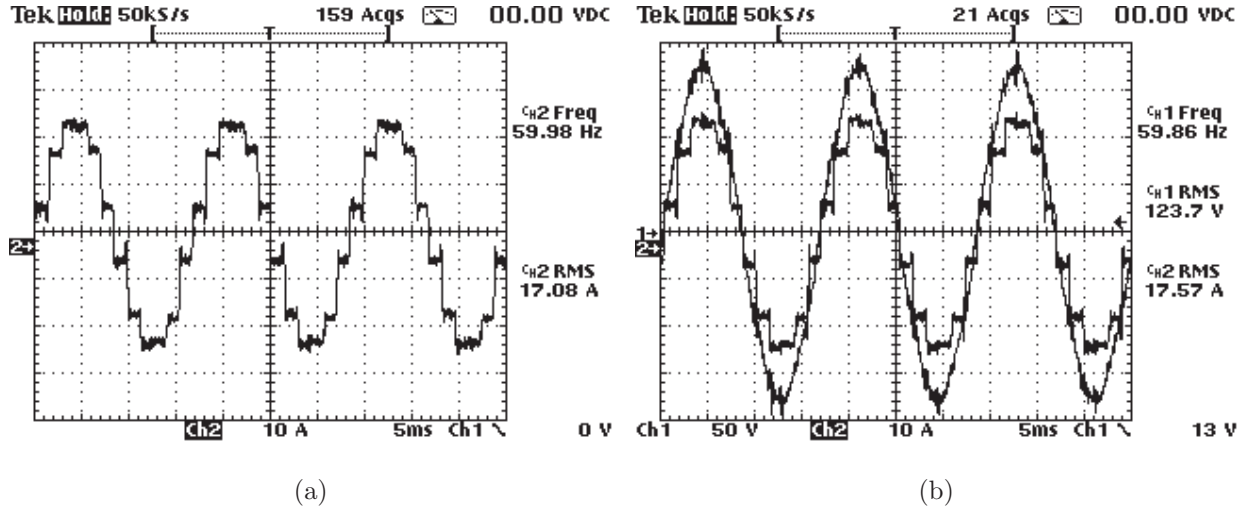


Figura 7.5: (a) Corrente de linha de alimentação $i_{a(in)}$ (b) Ch.2 - Corrente de linha de alimentação $i_{a(in)}$ and Ch.1 - tensão fase-neutro v_{an}

possível adquirir os sinais das correntes $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ sincronizados no tempo.

Desta forma, ilustra-se que a operação do RHM, utilizando conversores *SEPIC* modificados, como um retificador trifásico de 12 pulsos convencional foi alcançada, porém, sem utilizar transformadores defasadores e/ou transformadores de interfase.

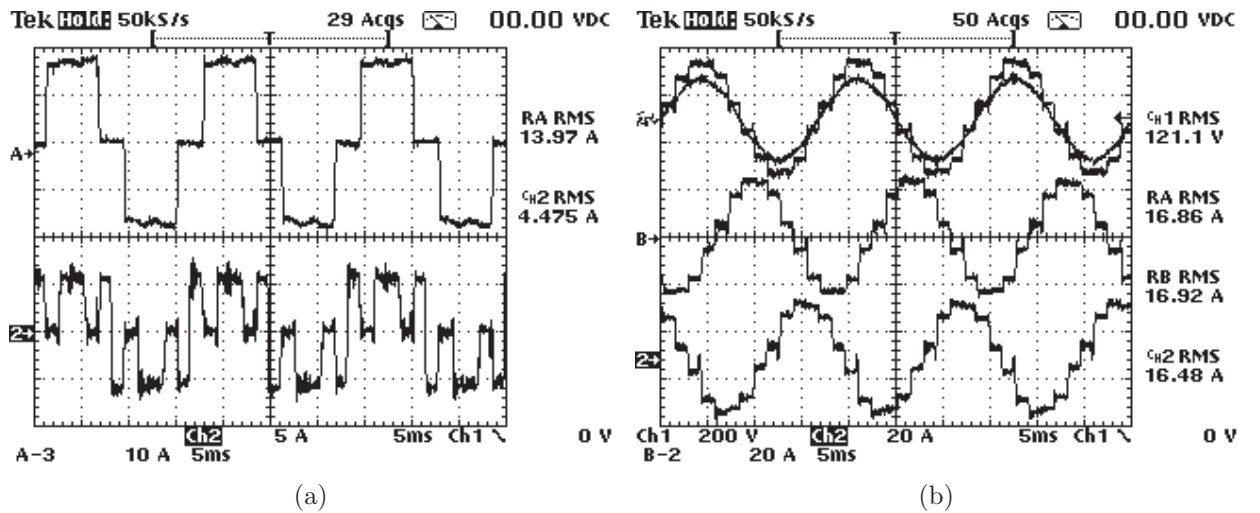


Figura 7.6: (a) Ref.A - Correntes CA de alimentação: i_{a1} (Ret-1), i_{a2} (Ret-2) (b) Correntes de linha de alimentação: Ref.A - $i_{a(in)}$, Ref.B - $i_{b(in)}$, and Ch.2 - $i_{c(in)}$ e Ch.1 - tensão fase-neutro (v_{an})

No intuito de quantificar a parcela de contribuição dos conversores *SEPIC* modificados,

são apresentadas na Fig.7.7, a potência ativa média processada pelo retificador de seis pulsos convencional - Ret-1 e a potência ativa média entregue à carga.

A Fig.7.7(a) mostra que o Ret-1 processa cerca de 5,8 kW enquanto a Fig.7.7(b) mostra que a potência ativa média entregue à carga durante o ensaio realizado foi de aproximadamente 6,8 kW.

Assim, conclui-se que os três conversores *SEPIC* modificados processam, juntos, cerca de 15% da potência ativa total que é transferida para a carga. Este resultado corrobora com as análises matemática e de simulação, apresentadas nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

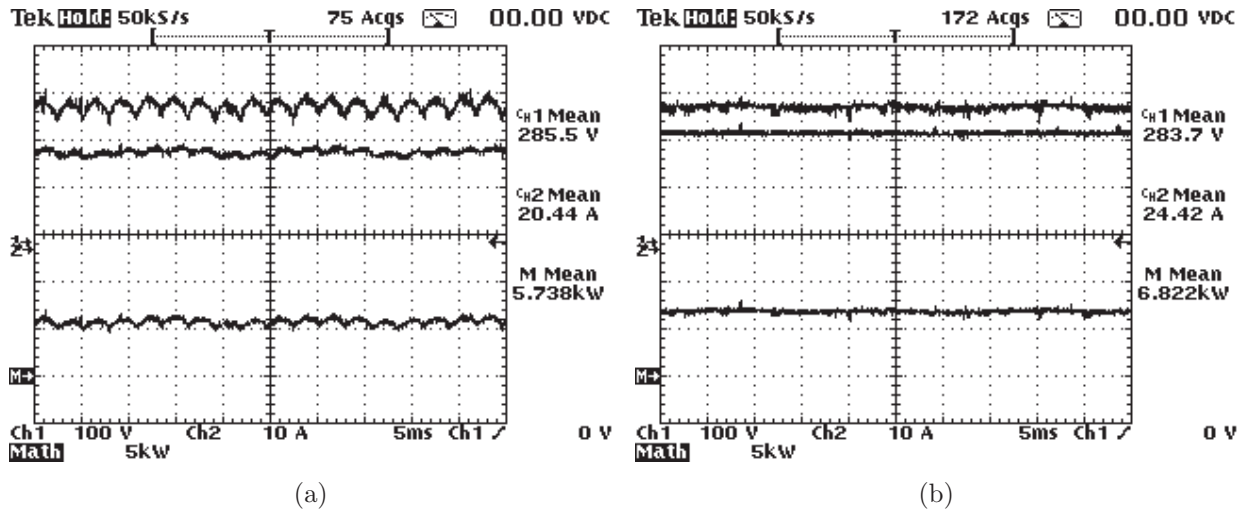


Figura 7.7: (a) Ch.1 - Tensão nos terminais + e - da ponte retificadora trifásica (V_{DC}), Ch.2 - Corrente no indutor de filtro L_F (I_{L_f}), Ch.M - Potência média de saída do retificador não-controlado (Ret-1) - Ch.1 x Ch.2 (b) Ch.1 - Tensão no barramento CC (V_0), Ch.2 - Corrente na carga resistiva R_0 (I_0), Ch.M - Potência média na carga (P_0) - Ch.1 x Ch.2

Mostrando o desempenho do RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados, no ensaio realizado em laboratório, são apresentados nas Fig.7.8, 7.9 e 7.10, um resumo referente aos dados das fases A, B e C, respectivamente.

Juntamente com o espectro harmônico de cada corrente de linha, são apresentados:

valor rms da tensão fase-neutro, valor rms da corrente CA de alimentação, potência ativa média de entrada, DHT da tensão fase-neutro e da corrente de linha, fator de potência de entrada, fator de deslocamento, potência aparente média de entrada e, finalizando, a potência reativa média de entrada.

Observa-se que os componentes harmônicos mais relevantes das correntes $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ são de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a ordens, conforme esperado. A exceção se encontra na corrente $i_{b(in)}$, onde o componente harmônico de 15^a ordem aparece um pouco acentuado.

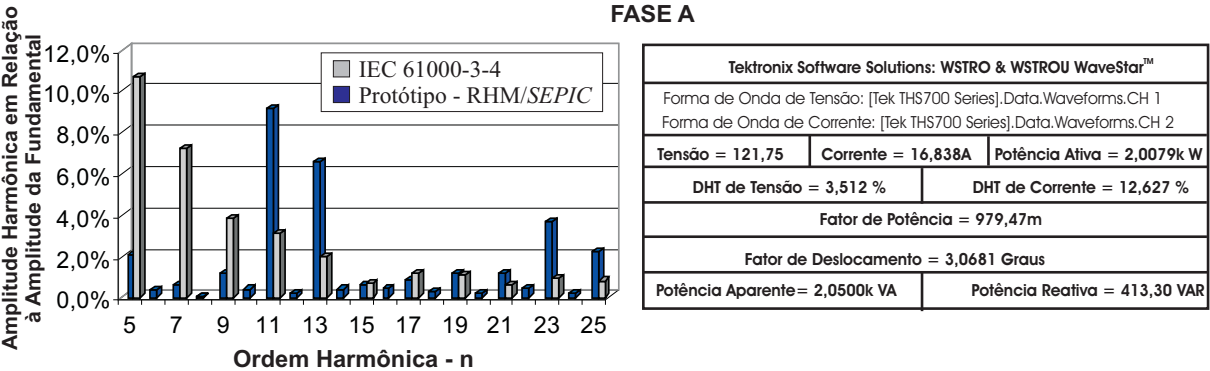


Figura 7.8: Resumo dos dados relativos à fase A - Resultados Experimentais - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 pulsos imposta.

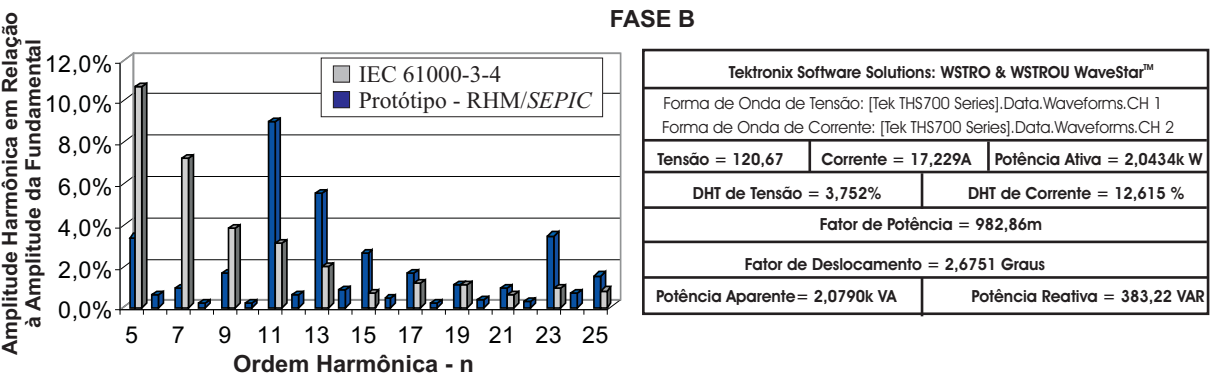


Figura 7.9: Resumo dos dados relativos à fase B - Resultados Experimentais - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 pulsos imposta.

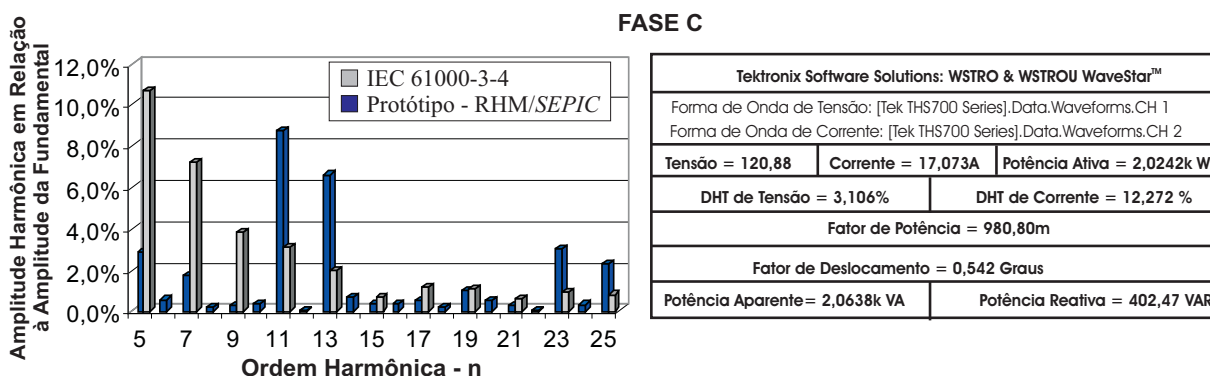


Figura 7.10: Resumo dos dados relativos à fase C - Resultados Experimentais - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 pulsos imposta.

7.3.2 RHM Utilizando Conversores *Boost*

O protótipo de 6 kW do RHM utilizando conversores *Boost* foi construído e avaliado em laboratório, como mostram as Figs.7.11 e 7.12.

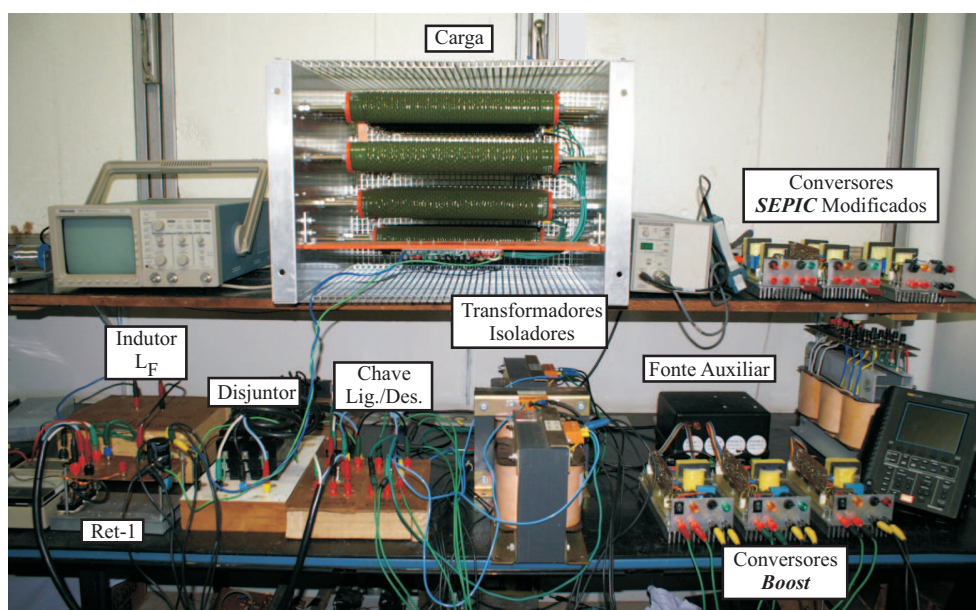
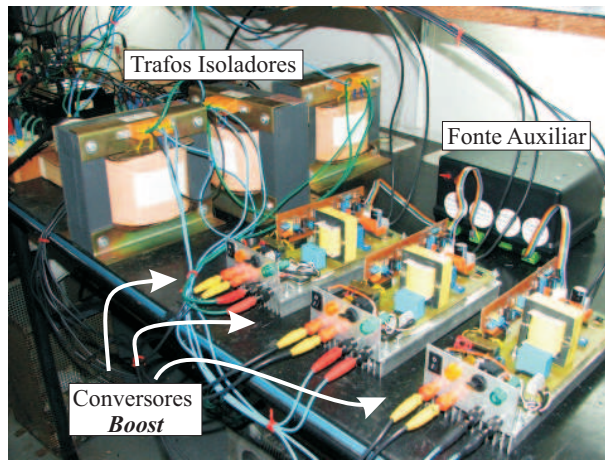


Figura 7.11: Ensaio realizado em laboratório - RHM utilizando conversores *Boost*.

Para ilustrar a operação do protótipo construído em laboratório, resultados experimentais são apresentados nas figuras 7.13 a 7.19. A Tab.7.2 apresenta todos os dados relativos aos parâmetros ajustados para RHM utilizando conversores *Boost*.



(a) Grupo retificador 2

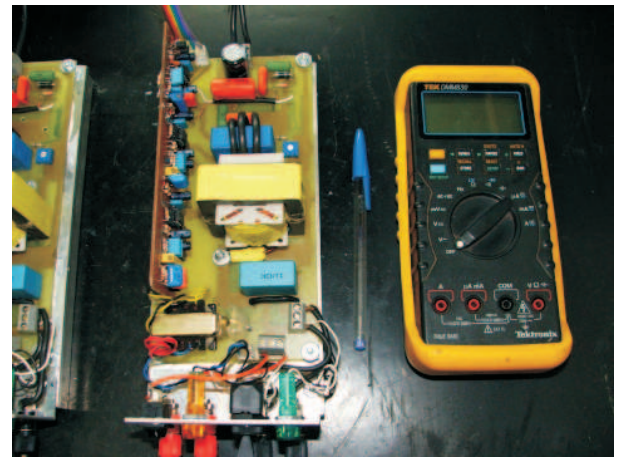
(b) Conversor *Boost*Figura 7.12: Protótipo implementado em laboratório - RHM utilizando conversores *Boost*.

Tabela 7.2: Parâmetros Ajustados - Protótipo do RHM Utilizando Conversores Boost - Corrente CA Alimentação de 12 Pulsos Imposta

Retificador de Seis pulsos Não-controlado - (Ret-1)	Conversores <i>Boost</i> - (Ret-2)
Ponte retificadora trifásica - Toshiba 30J6P41	Ponte retificadora monofásica - HFA15TB60
Indutor de filtro, L_F - 15 mH	Indutores de entrada, L_1 - L_3 - 1.5 mH
Capacitor de filtro, C_F - 470 μ F	Capacitores de filtro, C_{F1-F3} - 47 μ F
-	Interruptores, S_1 - S_3 - IRFP 460
-	Diodos, D_1 - D_3 - MUR1560
-	Snuber, RC - 47 Ω e 2.2 nF
-	Snuber, RCD - 47 Ω , 2.2 nF e UF4007
Potência Processada, $P_{Ret-1} = 4,858kW$ 81,91%	Potência Processada, $P_{Ret-2} = 1,073kW$ 18,09%
Transformadores Isoladores Monofásicos	
Relação de transformação	1:1
Potência nominal, S_{n1} - S_{n3}	2,5 kVA

Deve-se ressaltar que a potência nominal dos transformadores isoladores disponíveis em laboratório e utilizados para a construção do protótipo, é muito maior que a potência processada pelos conversores *Boost* (Ret-2).

Entretanto, uma vez que os conversores *Boost* processam menos de 20% da potência total de saída (operando com corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta), é possível concluir que o volume e o peso dos transformadores isoladores necessários para alimentar

os conversores *Boost*, são extremamente reduzidos, quando comparado com as estruturas de retificadores multipulsos apresentadas em [25], [30].

A Fig. 7.13(a) ilustra a corrente CA de alimentação (i_{a1}) do retificador de seis pulsos não-controlado (Ret-1) e a Fig. 7.13(b) ilustra a corrente CA de alimentação (i_{a2}) do conversor *Boost* conectado à fase A. Neste caso, observa-se que o *ripple* de alta frequência da corrente i_{a2} é bastante reduzido quando comparado com a corrente imposta nos conversores *SEPIC* modificados.

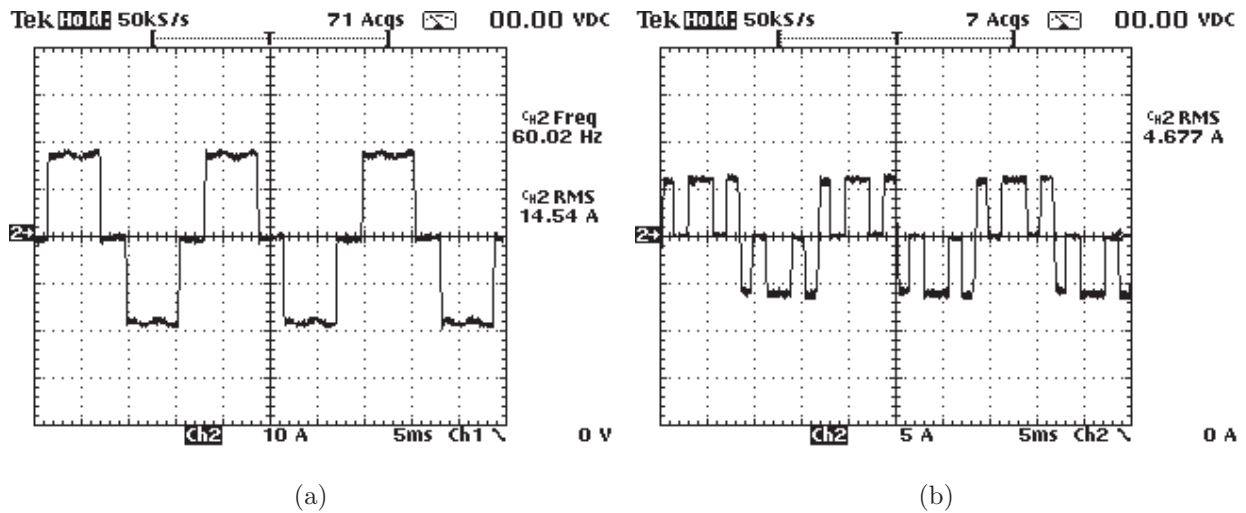


Figura 7.13: Correntes CA de alimentação: (a) retificador de seis pulsos não-controlado i_{a2} (Ret-1) (b) conversor *Boost* conectado à fase A i_{a2} (Ret-2) - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

A forma de onda da corrente de linha $i_{a(in)}$, resultado da combinação das correntes i_{a1} e i_{a2} ($i_{a(in)} = i_{a1} = i_{a2}$), é apresentada na Fig. 7.14(a).

A corrente de linha da fase A da rede CA de alimentação, ($i_{a(in)}$), é mostrada conjuntamente com a tensão fase-neutro (v_a) na Fig. 7.14(b), ilustrando que o fator de deslocamento é praticamente nulo. Logo, devido ao baixo conteúdo harmônico, o fator de potência de entrada também é muito próximo da unidade, conforme observado no ensaio

realizado com o RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

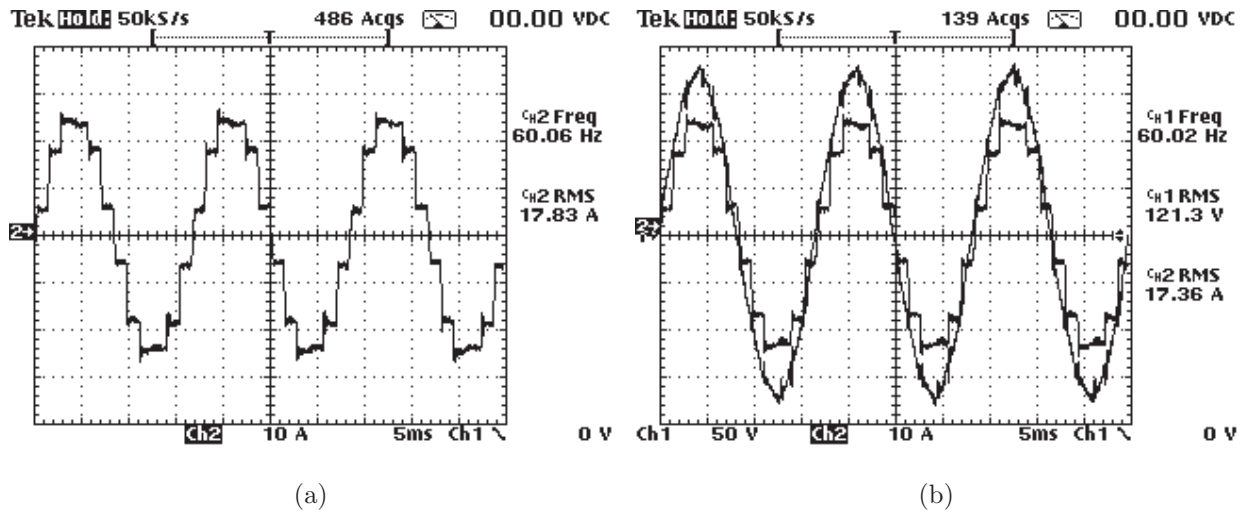


Figura 7.14: (a) Corrente de linha de alimentação $i_{a(in)}$ (b) Ch.2 - Corrente de linha de alimentação $i_{a(in)}$ and Ch.1 - tensão fase-neutro v_{an} - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

Ilustrando a composição da forma de onda da corrente CA de alimentação da fase A (corrente $i_{a(in)}$), a Fig.7.13 mostra as correntes CA de alimentação do Ret-1 e do conversor *Boost* conectado à fase A.

As correntes de linha $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, $i_{c(in)}$ e a tensão fase-neutro (v_a) são apresentadas na Fig. 7.15(b). Comparando-se o resultados alcançados com o RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados, as formas de ondas das correntes drenadas da rede CA de alimentação, quando o RHM utiliza conversores *Boost* para compor o grupo retificador 2, se apresentam mais comportadas em função da utilização de transformadores isoladores para a alimentação dos mesmos.

Cada transformador se comporta como um filtro, não permitindo que ruídos provenientes do chaveamento em alta frequência, apareçam na forma de onda das correntes CA de alimentação.

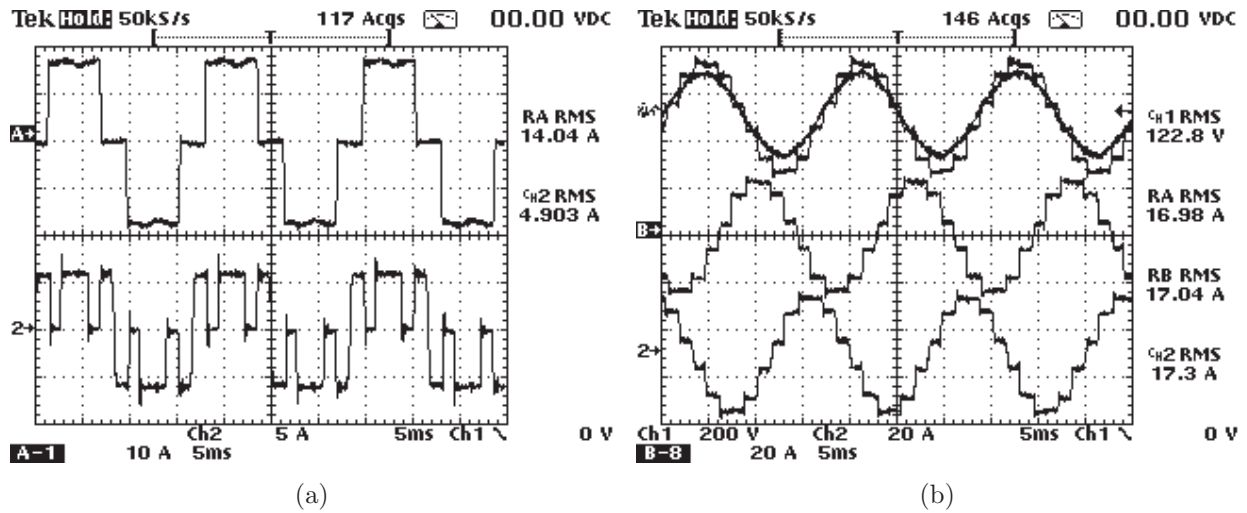


Figura 7.15: (a) Ref.A - Correntes CA de alimentação: i_{a1} (Ret-1), i_{a2} (Ret-2) (b) Correntes de linha de alimentação: Ref.A - $i_{a(in)}$, Ref.B - $i_{b(in)}$, and Ch.2 - $i_{c(in)}$ e Ch.1 - tensão fase-neutro (v_{an}) - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

A potência ativa média processada pelo retificador de seis pulsos não-controlado (Ret-1) é apresentada na Fig. 7.16(a) e a potência ativa total de saída é apresentada na Fig. 7.16(b).

Neste ensaio, cerca de 4,8 kW foram processados pela Ret-1 e a potência ativa média entregue à carga foi cerca de 5,9 kW. Logo, conclui-se que os conversores *Boost* alimentados através de transformadores isoladores processaram cerca de 1,1 kW, isto significa que o Ret-2 processa em torno de 18,6% da potência ativa total de saída.

Conforme esperado, observa-se um acréscimo de cerca de 3% na potência ativa média processada pelo Ret-2 composto por conversores *Boost*, em relação ao Ret-2 composto por conversores *SEPIC* modificados. Essa diferença percentual se explica em função das perdas por *histerese* e correntes de *Foucault* presentes nos transformadores isoladores utilizados para alimentar os conversores *Boost*.

Ensaio realizado em laboratório mostram que as perdas à vazio nos transformadores

utilizados, chegam a cerca de 120 W, deste modo, considerando-se que os 18,6% da potência ativa média processada pelo Ret-2 incluem 120 W de perdas nos transformadores, conclui-se que os conversores *Boost* processam apenas cerca de 15% da potência ativa total de saída, tal qual os conversores *SEPIC* modificados.

Ressalta-se aqui o fato de que, como a potência nominal dos transformadores é 2,5 kVA e cada conversor *Boost* processa cerca de 300 W, as perdas de curto-circuito são praticamente desprezíveis.

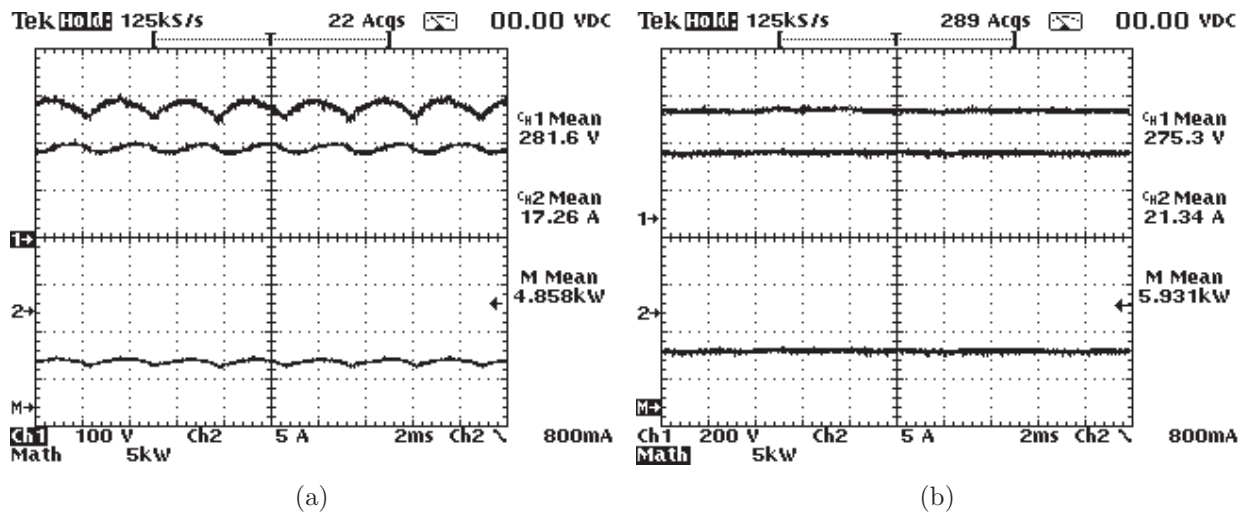


Figura 7.16: (a) Ch.1 - Tensão nos terminais + e - da ponte retificadora trifásica (V_{DC}), Ch.2 - Corrente no indutor de filtro L_F (I_{L_f}), Ch.M - Potência média de saída do retificador não-controlado (Ret-1) - Ch.1 x Ch.2 (b) Ch.1 - Tensão no barramento CC (V_0), Ch.2 - Corrente na carga resistiva R_0 (I_0), Ch.M - Potência média na carga (P_0) - Ch.1 x Ch.2) - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

O espectro harmônico das correntes $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$, são apresentados nas Figs.7.17, 7.18 e 7.19, respectivamente.

Conforme esperado, os harmônicos de ordens $12n \pm 1$ são os mais relevantes, tal qual nos retificadores trifásicos de 12 pulsos convencionais. Ressalta-se que o componente harmônico de 19ª ordem aparece de forma mais acentuada nas três fases.

Um resumo contendo: o conteúdo harmônico das correntes de linha e das tensões fase-neutro da rede CA de alimentação, o fator de potência de entrada, o fator de deslocamento, a potência ativa, a potência reativa e a potência aparente de cada fase do sistema CA são também apresentados nas Figs. 7.17, 7.18 e 7.19.

Estes resultados foram obtidos utilizando-se o software *Tektronix Software Solutions: WSTRO & WSTROU WaveStarTM Software for Oscilloscopes / Versão Demo*.

Concluindo, observa-se que o conteúdo harmônico das correntes de linha ficou abaixo de 14%, assim como mostram os resultados experimentais obtidos quando o RHM proposto foi avaliado utilizando-se conversores *SEPIC* modificados para compor o grupo retificador 2.

Desta forma, destaca-se que o desempenho do RHM proposto, operando como um retificador de 12 pulsos convencional, independe do conversor chaveado utilizado. Assim, o fator econômico e o tamanho, peso e volume da estrutura devem ser decisivos para definir se conversores *SEPIC* modificados devam ser preferidos no lugar de conversores *Boost*, uma vez que para se utilizar conversores *Boost*, um transformador trifásico ou três transformadores monofásicos são necessários para a implementação do RHM proposto.

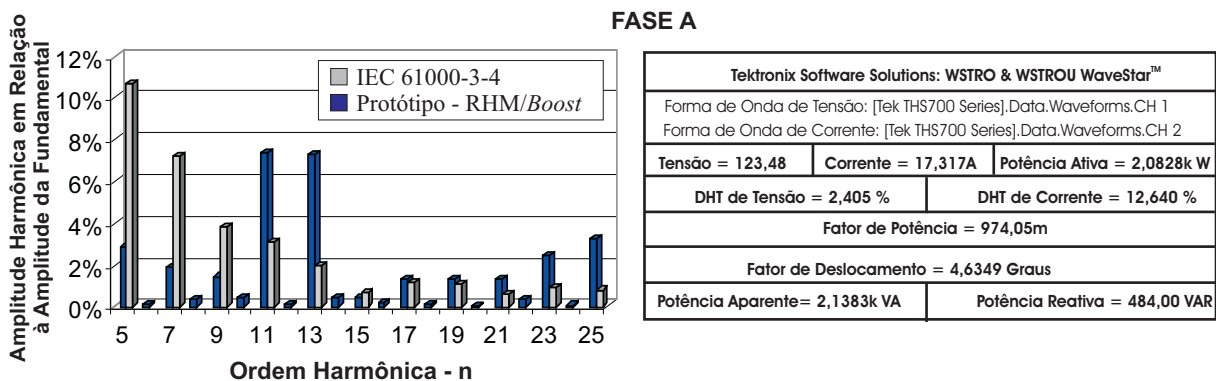


Figura 7.17: Resumo dos dados relativos à fase A - Resultados Experimentais - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

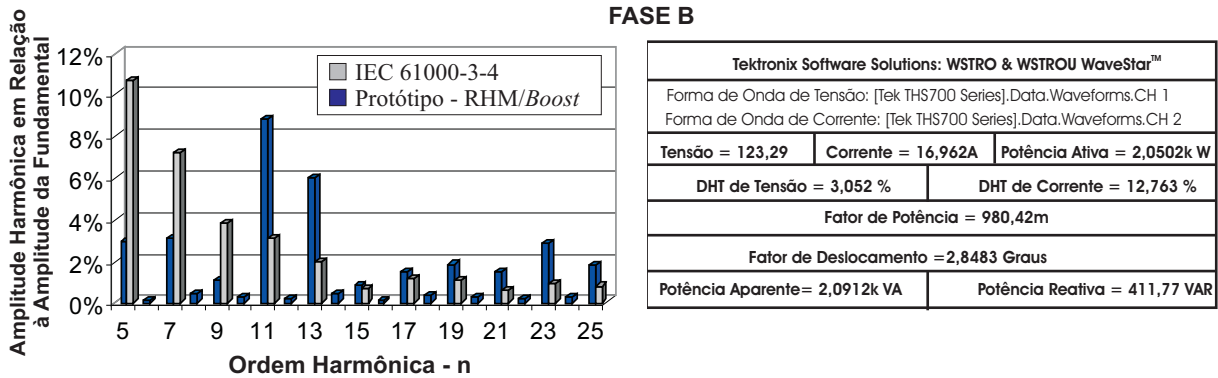


Figura 7.18: Resumo dos dados relativos à fase B - Resultados Experimentais - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

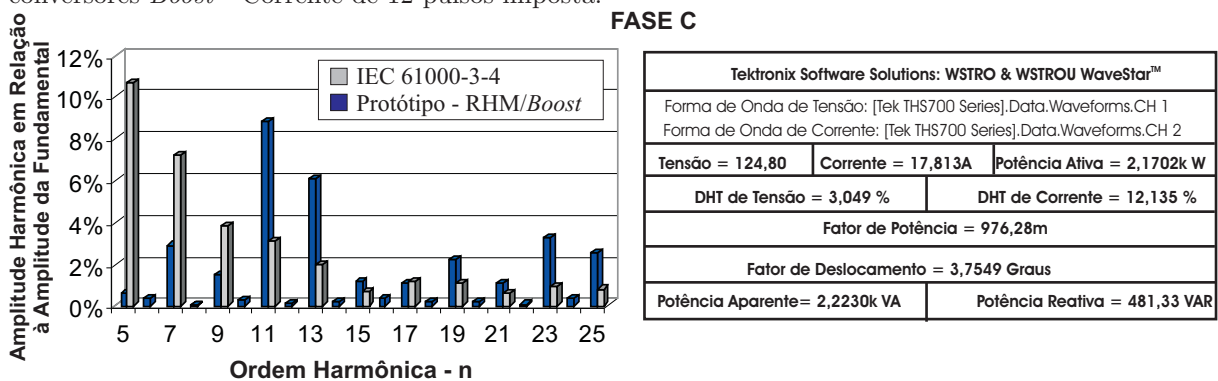


Figura 7.19: Resumo dos dados relativos à fase C - Resultados Experimentais - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

7.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais obtidos quando da implementação em laboratório de dois protótipos de 6 kW, com RHM proposto operando como um retificador de 12 pulsos.

Foram implementadas duas estruturas, uma utilizando conversores *SEPIC* modificados e outra utilizando conversores *Boost*, conectados em paralelo com cada braço de um retificador trifásico de seis pulsos convencional.

Destaca-se que os resultados experimentais apresentados corroboram com as análises matemáticas apresentadas nos capítulos 4 e 5, assim como com os resultados encontrados

através de análises realizadas por simulação.

O espectro harmônico da corrente de 12 pulsos imposta na rede CA de alimentação foi analisado e comparado com os limites de DHT_I impostos pela norma *IEC 61000/Estágio 1*, ficando comprovado que os componentes harmônicos mais relevantes presentes na corrente de entrada são de ordens $12n \pm 1$, conforme esperado. Destaca-se que, neste modo de operação e para o atendimento incondicional à norma *IEC 61000-3-4*, a utilização de filtros passivos na entrada do RHM é necessária.

Verificou-se que a parcela de contribuição de potência ativa dos conversores chaveados é menor que 20% da potência ativa total entregue à carga, ficando comprovada a principal contribuição do RHM proposto, ou seja, a partir deste trabalho, ficou demonstrado que é possível obter retificadores de 12 pulsos utilizando-se uma estrutura de baixo custo, alta confiabilidade operacional, elevada eficiência e de tamanho e peso bastante reduzidos.
