

Capítulo 6

Utilização dos Conversores *SEPIC* e *Boost* para Compor o Grupo Retificador 2

6.1 Introdução

Os resultados de simulação apresentados neste capítulo ilustram a performance do retificador híbrido multipulsos (RHM) proposto em quatro diferentes modos de operação, impondo correntes CA de alimentação de 12 pulsos, trapezoidais, de 20 pulsos e senoidais.

Em cada modo de operação, é apresentada uma discussão sobre a fração da potência ativa total de saída que é processada pelos conversores CC-CC (Ret-2) associados em paralelo com cada braço do retificador de seis pulsos não-controlado (Ret-1). Destaca-se que, conforme apresentado nos Capítulos 4 e 5, a DHT final da corrente de linha e a

potência ativa média processada pelos conversores chaveados (Ret-2) dependem do valor de pico da corrente imposta nos mesmos (I_{2P}).

Desde que um indutor de filtro bastante grande seja colocado no lado CC do retificador de seis pulsos não-controlado, pode-se afirmar que a corrente $I_{L_{F1}}$ é igual ao valor de pico da corrente de linha de entrada do Ret-1 (I_{1P}) e, portanto, o parâmetro k é definido como sendo a razão entre I_{2P} e I_{1P} ($k = I_{2P}/I_{1P}$). Neste contexto, são apresentados gráficos que ilustram a contribuição de cada grupo retificador e a DHT da corrente CA de entrada em relação ao parâmetro k .

6.2 Imposição de uma Corrente CA de Alimentação de 12 Pulsos

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, a forma de onda da corrente CA de alimentação é resultado da combinação entre a corrente de entrada do Ret-1 e a corrente imposta nos conversores chaveados ($i_{a(in)} = i_{a1} + i_{a2}$). Desta maneira, a corrente imposta nos conversores chaveados deve compor a forma de onda da corrente CA de alimentação do RHM proposto neste trabalho.

Destaca-se que a relação entre o valor de pico da corrente imposta nos conversores chaveados (I_{2P}) e o valor de pico da corrente de linha do retificador de seis pulsos não-controlado (I_{1P}) é determinante no que se refere à DHT da corrente CA de alimentação alcançada, conforme comprovação matemática apresentada no Capítulo 4.

6.2.1 Estratégia de Controle

A técnica de controle utilizada se baseia na imposição da corrente de linha de entrada com baixa DHT_I e elevado fator de potência (FP).

Conforme apresentado nos Capítulos 4 e 5, com utilização de um indutor de filtro suficientemente grande no lado CC do Ret-1, pode-se afirmar que $I_{1P} = I_{LF} = I_{Ret-1}$, portanto, a estratégia de controle se concentra em estabelecer a melhor relação entre o valor de pico da corrente CA de alimentação do Ret-1 ($I_{1P} = I_{Ret-1}$), e o valor de pico da corrente CA de alimentação dos conversores chaveados (I_{2P}) ou do grupo retificador 2 (Ret-2).

Por exemplo, se uma corrente de linha de entrada ($i_{a(in)}$) de 12 pulsos é desejada, a estratégia de controle apresentada na Fig. 6.1 deve ser implementada. Para compor a forma de onda da corrente CA de alimentação ($i_{a(in)}$), uma amostra da tensão fase-neutro (v_a) deve ser retificada e comparada com níveis de tensão CC gerando uma forma de onda quadrada sincronizada com a tensão v_a , para impor a corrente i_{a2} na forma de onda desejada, conforme apresentado na Fig. 3.3. A tensão V_{REF} consiste na forma de onda de referência de corrente e pode ser fornecida por dispositivos analógicos ou digitais.

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 corrente (V_{REF}) é comparado com a corrente através do indutor de entrada de cada conversor chaveado (Ret-2), para gerar o sinal de ataque de comando para o interruptor principal. Conseqüentemente, a corrente através do indutor de entrada seguirá a forma de onda da referência imposta por uma simples técnica de controle de modulação por largura

de pulso - PWM.

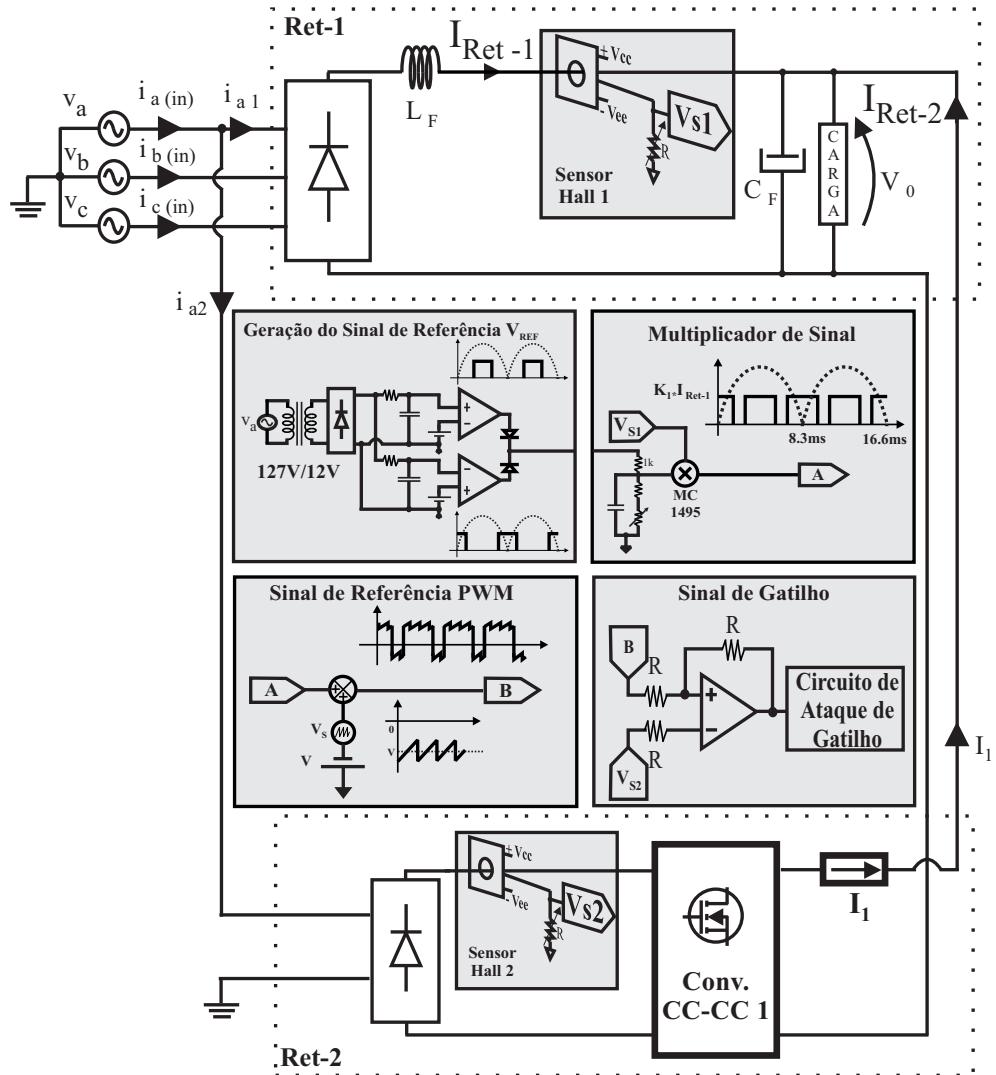


Figura 6.1: Diagrama de blocos esquemático representando a estratégia de controle PWM em malha fechada - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

6.3 Resultados de Simulação

Uma vez que o RHM proposto é adequado para aplicações de elevada potência (até cerca de 50 kW), a análise sobre o espectro harmônico da corrente CA de alimentação é realizada, levando-se em consideração os limites de DHT_I impostos pela norma IEC

61000-3-4: *Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A per phase.*

Particularmente, os limites apresentados na Tab.6.1, são chamados de *Estágio 1: Emissão de correntes harmônicas para conexão simplificada de equipamentos* ($S_{equ} \leq S_{SC}/33$), e são válidos para aplicações em que a potência aparente da carga é menor que 3% da potência de curto-circuito do alimentador.

Observa-se que o limite de cada componente harmônico de corrente é especificado em função da magnitude da componente fundamental. Este fato torna possível realizar uma análise sobre o espectro harmônico da corrente CA de alimentação do RHM, independentemente da magnitude da potência de entrada [51].

Tabela 6.1: Limites da IEC 61000-3-4 - Estágio 1: Emissão de correntes para conexão simplificada de equipamentos ($S_{equ} \leq S_{SC}/33$)

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	≥ 33	0,6
17	1,2		
19	1,1	Par	$\leq 8/n$ ou $\leq 0,6$

6.3.1 RHM Utilizando Conversores *SEPIC* Modificados

Utilizando-se o software *PSpice*[®], uma simulação digital foi realizada impondo-se correntes CA de alimentação com formas de onda de 12 pulsos. Os parâmetros ajustados para o circuito de potência são apresentados na Tab. 6.2.

Uma estratégia de controle PWM foi aplicada no intuito de controlar os conversores chaveados, impondo a forma de onda desejada nas correntes de linha de entrada. Nesse sentido, a estratégia de controle apresentada na Fig. 6.1 foi implementada nas análises realizadas por simulação digital.

Tabela 6.2: Parâmetros Ajustados - Simulação do RHM operando com correntes de linha de 12 pulsos imposta - Utilização de conversores *SEPIC* modificados

Especificações de Projeto	
Tensões fase-neutro, v_{an}, v_{bn}, v_{cn} (rms) = 127 V	
Tensão no barramento CC, V_{CC} (med) = 295 V	
Carga resistiva, $R_0 = 12,5 \Omega$	
Potência total de saída, $P_0 = 6$ kW	
Retificador de Seis pulsos Não-controlado (Ret-1)	Conversores <i>SEPIC</i> Modificados (Ret-2)
Capacitor de filtro, $C_F = 470 \mu\text{F}$	Capacitores, $C_{F1-F3} = 47 \mu\text{F}$
Indutor de filtro, $L_{F1} = 7,5$ mH	Indutores de entrada, $L_{1-6} = 400 \mu\text{H}$
Indutor de filtro, $L_{F2} = 7,5$ mH	-
-	Indutores, $L_{7-9} = 2$ mH
-	Capacitores, $C_{1-6} = 5 \mu\text{F}$
Ponte retificadora trifásica - Diodos $Dbreak$	Ponte retificadora monofásica - Diodos $Dbreak$
-	Interruptores, $S_{1-3} = \text{IRFP 460}$
-	Diodos, $D_{1-9} = \text{HFA25TB60}$
-	Snubber, RC - 47Ω e 2.2 nF
-	Snubber, RCD - 47Ω , 2.2 nF e HFA25TB60

No sentido de ilustrar o circuito de potência implementado durante os estudos realizados por simulação, é apresentado na Fig.6.2 o circuito elétrico simplificado implementado no software *PSpice*®.

Na figura 6.3 (a) é apresentada a magnitude da potência ativa processada pelo grupo retificador 2 (P_{Ret-2}) em função do parâmetro k , observa-se que, quanto maior for o valor de pico da corrente imposta nos conversores *SEPIC*, maior será a potência processada pelo Ret-2. A figura 6.3 (b) ilustra que, quando a constante de proporcionalidade k é ajustada em aproximadamente $1/3$, a mínima DHT da corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta é alcançada.

Os resultados apresentados na Fig.6.3 mostram que os resultados obtidos, nos Capítu-

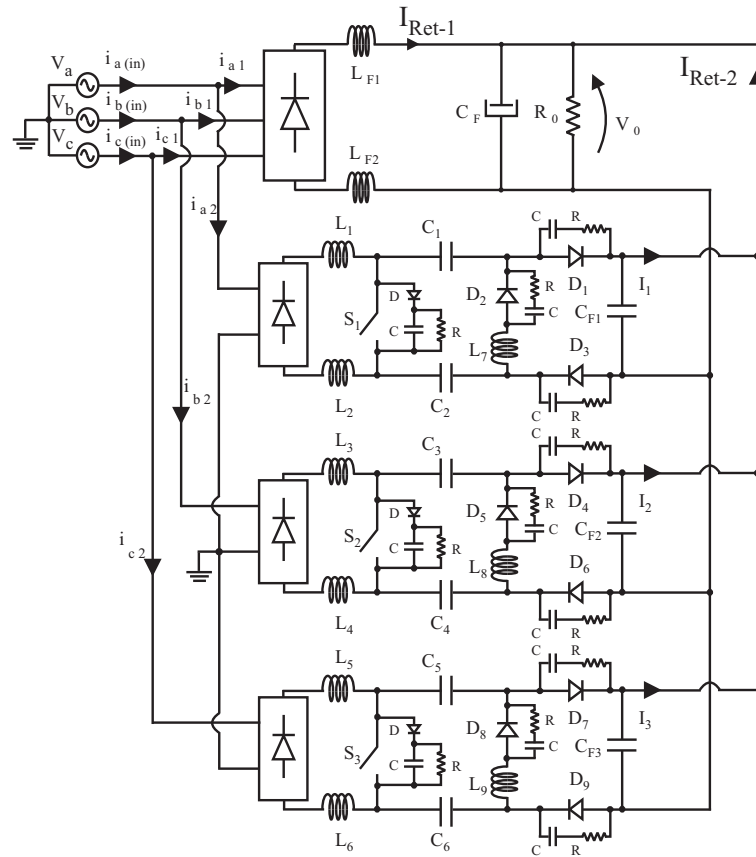


Figura 6.2: Circuito implementado no Schematic do Pspice - Utilizando Conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

los 4 e 5, quando o RHM proposto opera como um retificador de 12 pulsos convencional, estão de acordo com os resultados obtidos por simulação.

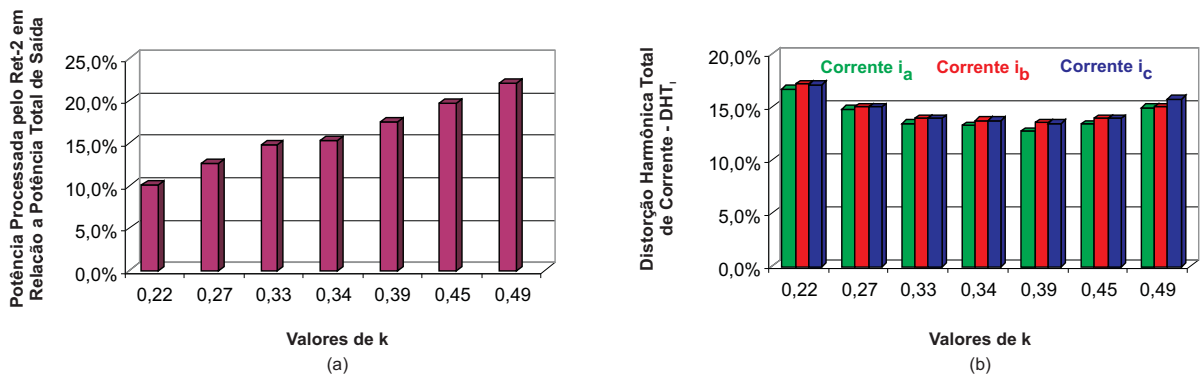


Figura 6.3: (a) Potência ativa processada por Ret-2 em função de k (b) DHT_I em função de k - Corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

Os principais resultados de simulação que ilustram a operação do RHM proposto utilizando conversores *SEPIC* modificados para impor uma corrente CA de alimentação de 12 pulsos, são apresentados nas Figs. 6.4 a 6.7.

Na figura 6.4 são apresentadas as correntes de alimentação na fase A do Ret-1, do Ret-2 e do RHM proposto.

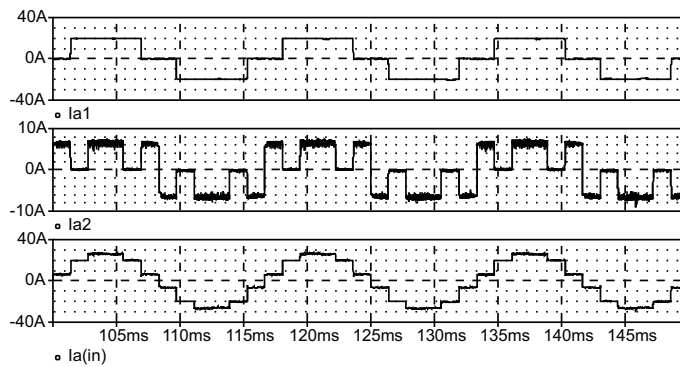


Figura 6.4: Correntes de linha: do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$) - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

Observa-se que a corrente CA de alimentação assume a forma de onda de 12 pulsos tal qual nos retificadores de 12 pulsos convencionais, porém, sem a utilização de transformadores defasadores e transformadores de interfase. A figura 6.5 ilustra as correntes de alimentação $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$.

A corrente de linha da fase A ($i_{a(in)}$) e a tensão fase-neutro v_{an} são apresentadas na Fig.6.6, observa-se que o fator de deslocamento é praticamente nulo.

Na figura 6.7 são apresentados, os espectros harmônicos das correntes CA de alimentação e, para que se possa avaliar os resultados alcançados, são apresentados os níveis de DHT_I impostos pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*, mostrados na Tab.6.1.

Conforme esperado, observa-se que as magnitudes das 11^a, 13^a, 23^a e 25^a harmônicas

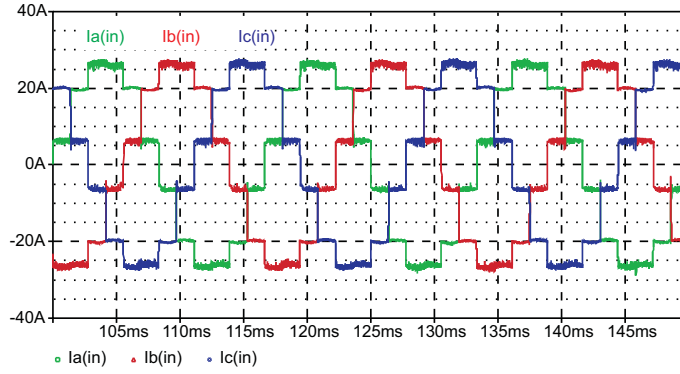


Figura 6.5: Corrente CA de alimentação do RHM $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

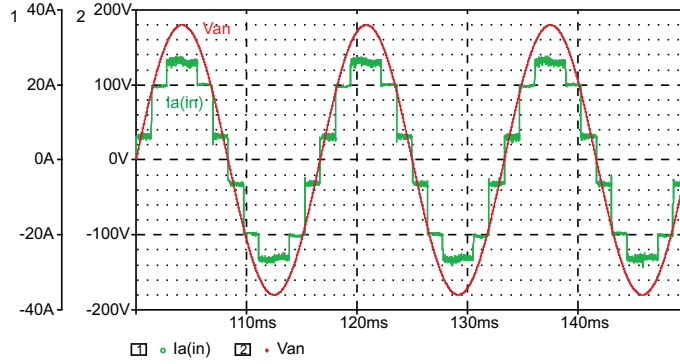


Figura 6.6: Tensão fase-neutro V_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

são maiores que os níveis máximos estabelecidos pela norma IEC 61000-3-4. Entretanto, quando comparado com estruturas tradicionais de retificadores de 12 pulsos que utilizam transformadores defasadores, IPTs, transformadores bloqueadores de harmônicos e transformadores diferenciais, o RHM proposto pode ser mais vantajoso uma vez que consegue-se reduzir, sensivelmente, o volume e o preço da estrutura, alcançando resultados idênticos aos apresentados por retificadores de 12 pulsos convencionais descritos na literatura [19], [20], [25], [31].

Para adequar a operação do RHM com corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta, aos níveis de qualidade impostos pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*, torna-se

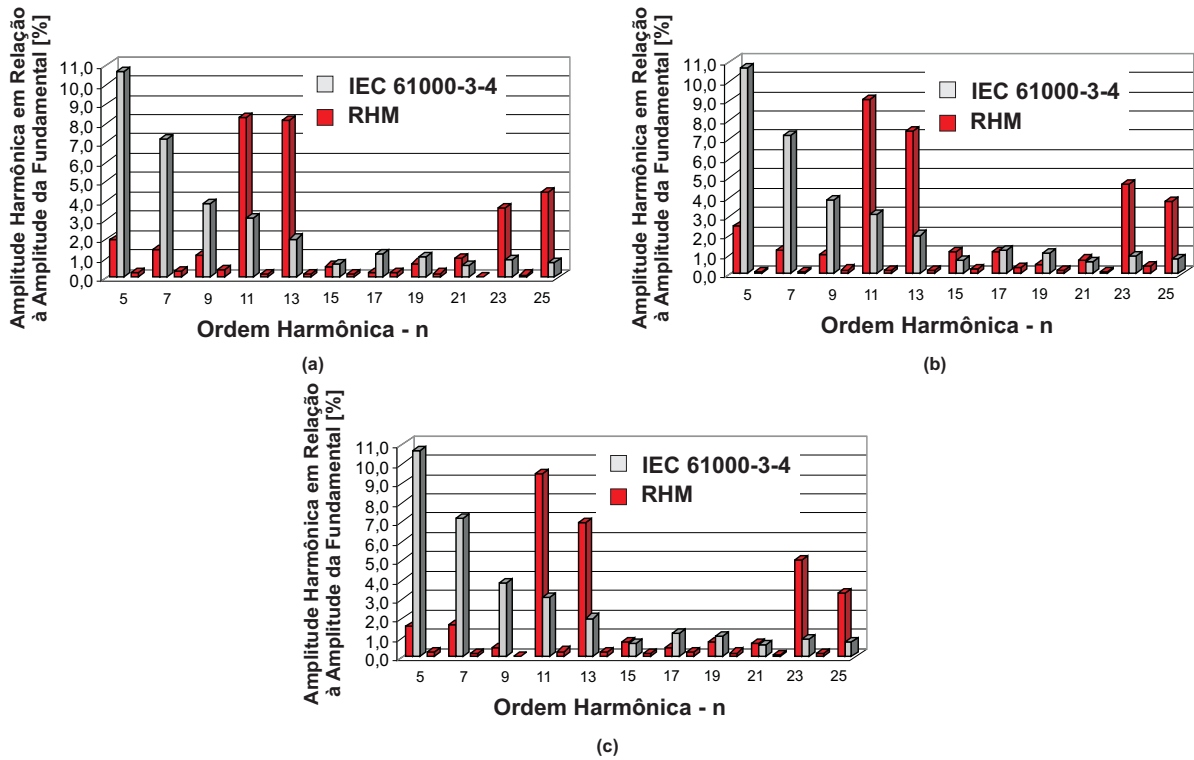


Figura 6.7: Espectro harmônico das correntes de linha de 12 pulsos - (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

necessária a utilização de filtros passivos na entrada do retificador proposto.

O gráfico ilustrado na Fig.6.8 representa o comportamento de cada grupo retificador no que diz respeito à parcela de potência ativa média que é processada por cada um deles. Nesse sentido, observa-se que a região de operação compreendida no intervalo $0,34 < k < 0,36$ (região de mínima DHT_I), maximiza a potência processada por Ret-1 e minimiza a potência processada por Ret-2. As regiões de operação restantes são meramente ilustrativas e devem ser evitadas objetivando melhores DHT_I e menor P_{Ret-2} .

Estes resultados comprovam que, quando a constante de proporcionalidade k é ajustada em $1/3$, a potência processada pelo Ret-2 fica abaixo de 20%. Conseqüentemente, o conteúdo harmônico final das correntes de linha fica abaixo de 14%, conforme esperado.

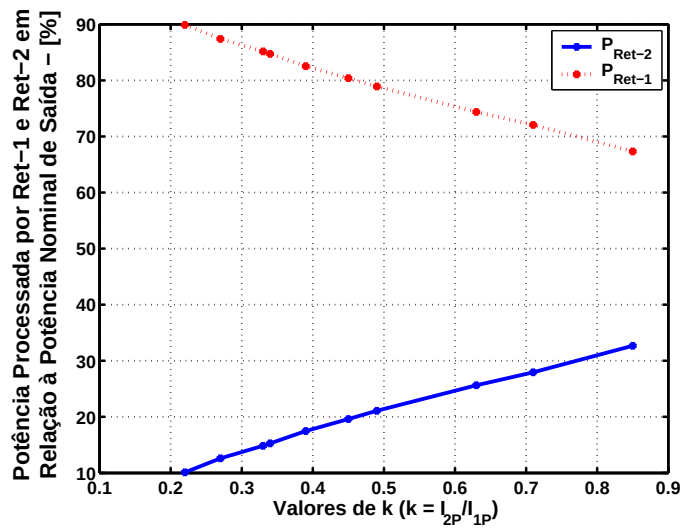


Figura 6.8: Potência processada por cada grupo retificador em função de k , impondo uma corrente CA de alimentação de 12 pulsos - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

6.3.2 RHM Utilizando Conversores *Boost*

Para analisar o RHM proposto utilizando conversores *Boost* alimentados por transformadores para compor o grupo Ret-2, uma simulação digital com os dados apresentados na Tab. 6.3, foi realizada impondo-se correntes CA de alimentação de 12 pulsos.

A estratégia de controle implementada foi a mesma implementada no caso em que o RHM proposto foi analisado utilizando conversores *SEPIC* modificados para o compor o grupo retificador 2.

No sentido de ilustrar o circuito de potência implementado durante os estudos realizados por simulação, é apresentado na Fig.6.9 o circuito elétrico simplificado implementado no software *PSpice*®.

O desempenho do RHM utilizando conversores *Boost* é idêntico ao desempenho do RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados, conforme ilustrado na Fig.6.10. Isto quer dizer que, consegue-se impor correntes de 12 pulsos na rede CA de alimentação, com

Tabela 6.3: Parâmetros Ajustados - Simulação do RHM operando com corrente de linha de 12 pulsos imposta - Utilização de conversores *Boost* alimentados por transformadores

Especificações de Projeto	
Tensões fase-neutro, v_{an}, v_{bn}, v_{cn} (rms) = 127 V	
Tensão no barramento CC, V_{CC} (med) = 295 V	
Carga resistiva, $R_0 = 12,5 \Omega$	
Potência total de saída, $P_0 = 6$ kW	
Retificador de Seis pulsos Não-controlado (Ret-1)	Conversores Boost (Ret-2) (Ret-2)
Capacitor de filtro, $C_F = 470 \mu$	Capacitores, $C_{F1-F3} = 47 \mu F$
Indutor de filtro, $L_F = 15$ mH	Indutores de entrada, $L_{1-3} = 1,0$ mH
Ponte retificadora trifásica - Diodos <i>Dbreak</i>	Ponte retificadora monofásica - Diodos <i>Dbreak</i>
-	Interruptores, $S_{1-3} =$ IRFP 460
-	Diodos, $D_{1-3} =$ HFA25TB60
-	Snuber, RC - 47Ω e 2.2 nF
-	Snuber, RCD - 47Ω , 2.2 nF e HFA25TB60
-	Transformadores
-	Indutância de Magnetização, $L_m = 900$ mH
-	Coefficiente de acoplamento, $k = 0,9998$

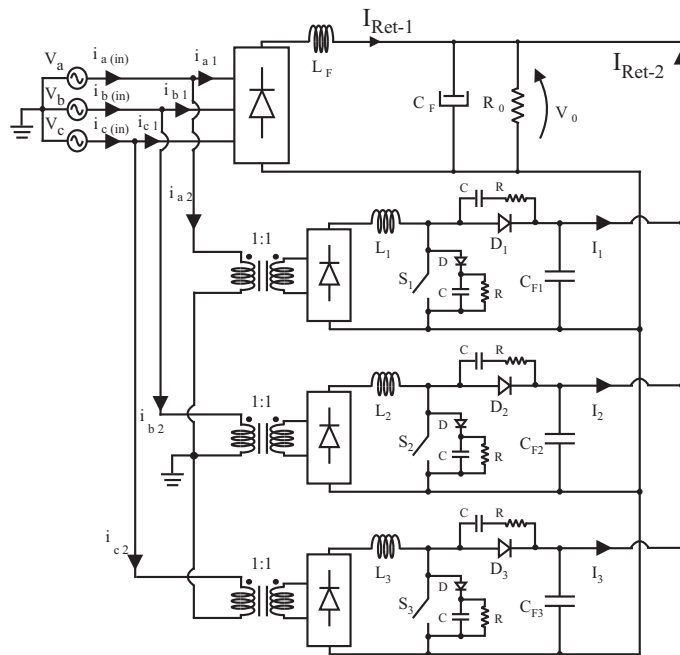


Figura 6.9: Circuito implementado no Schematic do Pspice - Utilizando Conversores *Boost* - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

DHT menor que 14% e processando menos de 20% da potência ativa total entregue à carga.

Deve-se destacar que a potência processada pelo grupo Ret-2 é cerca de 3% maior do

que o observado na seção anterior, onde foram utilizados conversores *SEPIC* modificados. Este fato pode ser explicado em função da utilização de transformadores isoladores para alimentar os conversores *Boost*. Portanto, neste caso, a potência processada pelo Ret-2 é resultado da soma entre a potência ativa processada pelos conversores *Boost*, e a potência reativa necessária para magnetização dos transformadores.

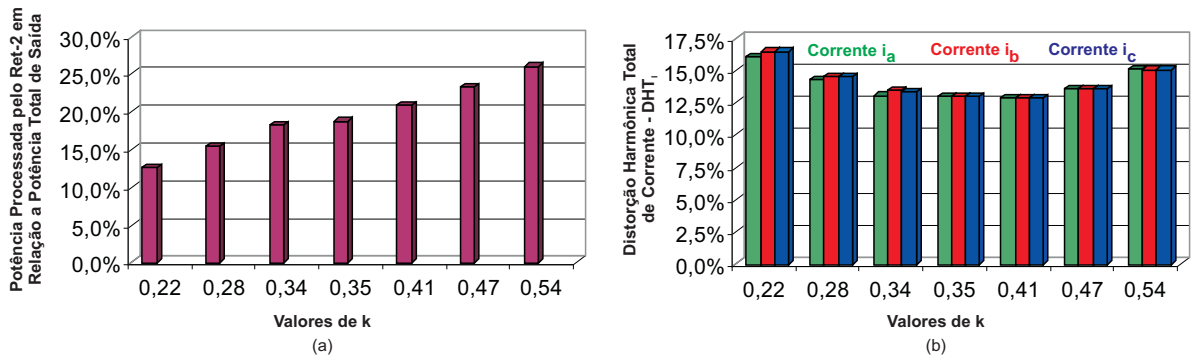


Figura 6.10: (a) Potência ativa processada por Ret-2 em função de k (b) DHT_I em função de k - Corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta - RHM utilizando conversores *Boost*.

As figuras 6.11 a 6.14 ilustram os principais resultados obtidos por simulação. Na figura 6.11, a corrente de linha do Ret-2 (i_{a2}) é ilustrada. Observa-se que, devido a componente de magnetização, essa corrente apresenta um nível CC.

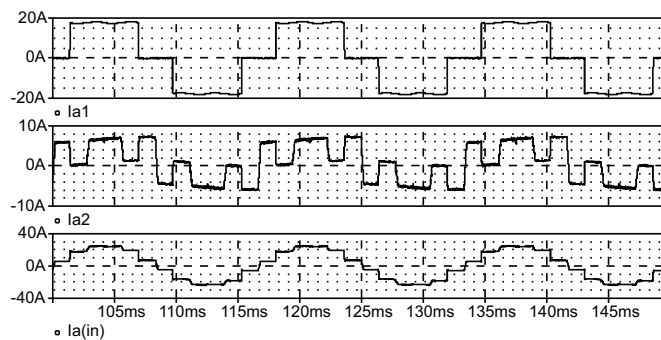


Figura 6.11: Correntes de linha: do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$) - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

As formas de ondas das correntes de linha são mostradas na Fig.6.12 e a tensão fase-

neutro juntamente com a corrente de linha relativas à fase A são mostradas na Fig.6.13.

Obseva-se que o fator de deslocamento entre a corrente de linha e a tensão fase-neutro é praticamente nulo, o que contribui para a obtenção de um fator de potência muito próximo da unidade na entrada do RHM proposto.

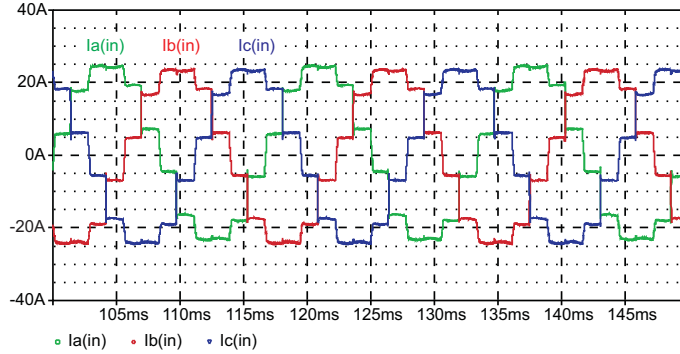


Figura 6.12: Correntes CA de alimentação do RHM: $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

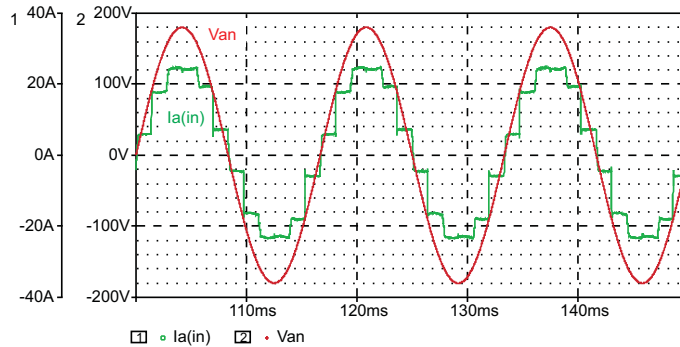


Figura 6.13: Tensão fase-neutro V_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 Pulsos Imposta.

O espectro harmônico das correntes de linha é apresentado na Fig.6.14. Os componentes harmônicos de 11^a , 13^a , 23^a e 25^a ordens não são canceladas, conforme esperado.

Concluindo, é apresentado na Fig.6.15 um gráfico representado a parcela de contribuição de potência ativa dos conversores *Boost*, quando o RHM proposto opera com correntes CA de alimentação de 12 pulsos impostas. Observa-se que, quando k é ajustado

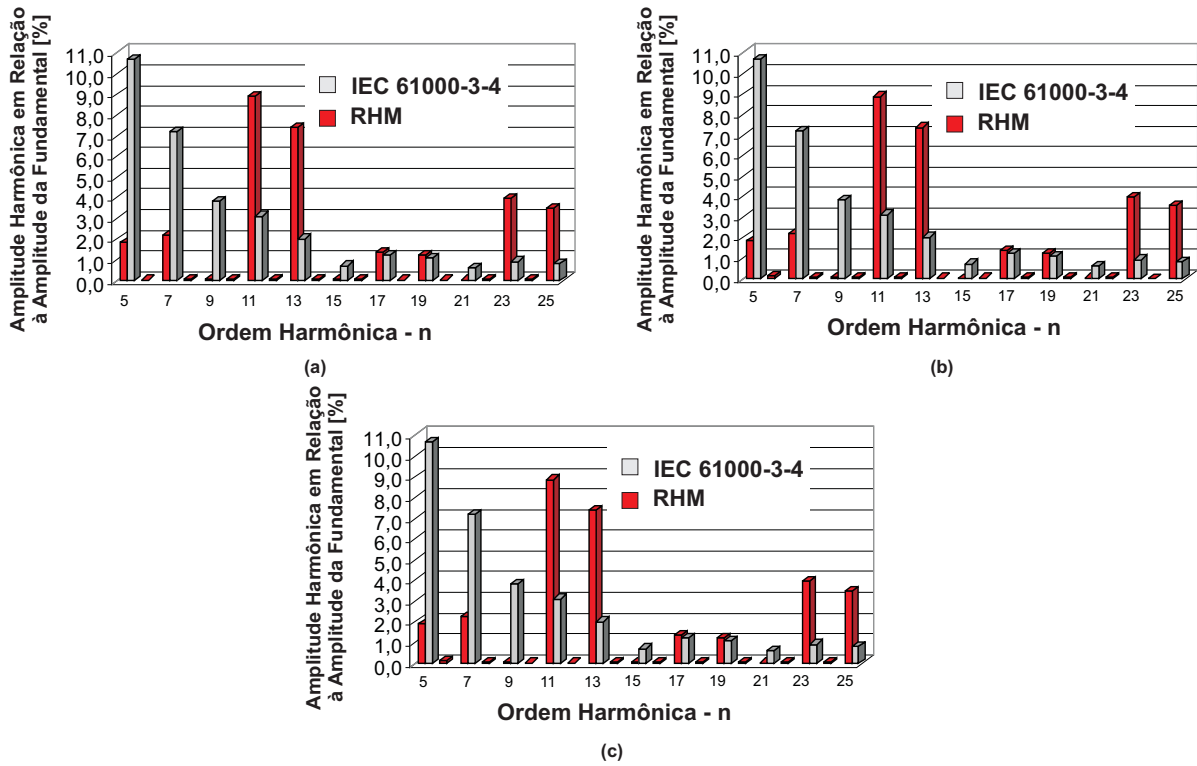


Figura 6.14: Espectros harmônicos das correntes de linha do RHM proposto - (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente de 12 pulsos imposta.

em torno de $1/3$ ($DHT_I \leq 14\%$), a potência processada pelos conversores *Boost* é cerca de 3% maior que a potência processada pelos conversores *SEPIC* modificados, conforme ilustrado anteriormente, entretanto, permanece abaixo de 20%.

6.4 Imposição de uma Corrente CA de Alimentação Senoidal

No modo de operação com corrente senoidal imposta, o RHM proposto apresenta o seu melhor desempenho no que se refere à DHT da corrente CA de alimentação alcançada. Neste caso, consegue-se impor uma forma de onda senoidal na corrente de

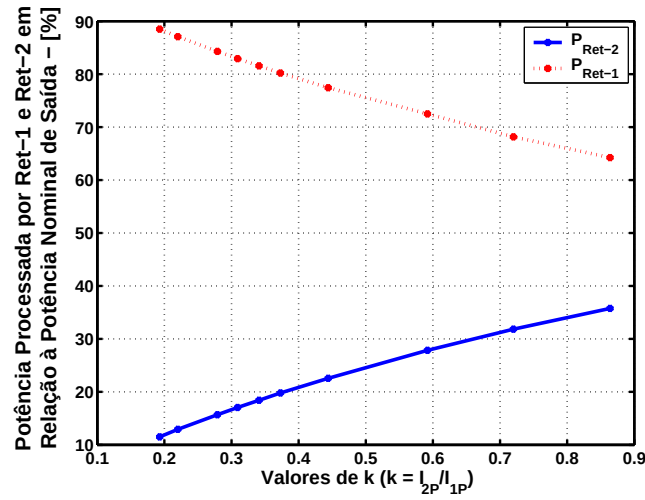


Figura 6.15: Potência processada por cada grupo retificador em função de k , impondo uma corrente CA de alimentação de 12 pulsos.

entrada, eliminando-se os harmônicos de ordens $12n \pm 1$, característicos de retificadores de 12 pulsos, conforme observado na seção anterior.

Entretanto, para impor correntes senoidais na rede CA de alimentação, é necessário que a parcela de potência ativa que é processada pelo Ret-2 seja aumentada sensivelmente, quando comparado com RHM operando com corrente CA de alimentação de 12 pulsos imposta.

Utilizando-se o software *PSpice*®, uma simulação digital com os dados apresentados nas Tabs.6.2 e 6.3, foi realizada impondo correntes CA de alimentação com forma de onda senoidal.

6.4.1 Estratégia de Controle

A técnica de controle utilizada para impor correntes senoidais de entrada segue os mesmos princípios utilizados para impor correntes de entrada de 12 pulsos, ou seja, a estratégia de controle deve estabelecer a melhor relação entre a corrente que flui através

do indutor de filtro no lado CC do retificador não-controlado (I_{Ret-1}), e o valor de pico da corrente de entrada i_{a2} do conversor chaveado (Ret-2). Desta maneira, obtém-se uma corrente de linha de entrada ($i_{a(in)}$) com baixa DHT.

Para impor uma corrente de linha de entrada ($i_{a(in)}$) senoidal, a estratégia de controle apresentada na Fig. 6.16 foi implementada.

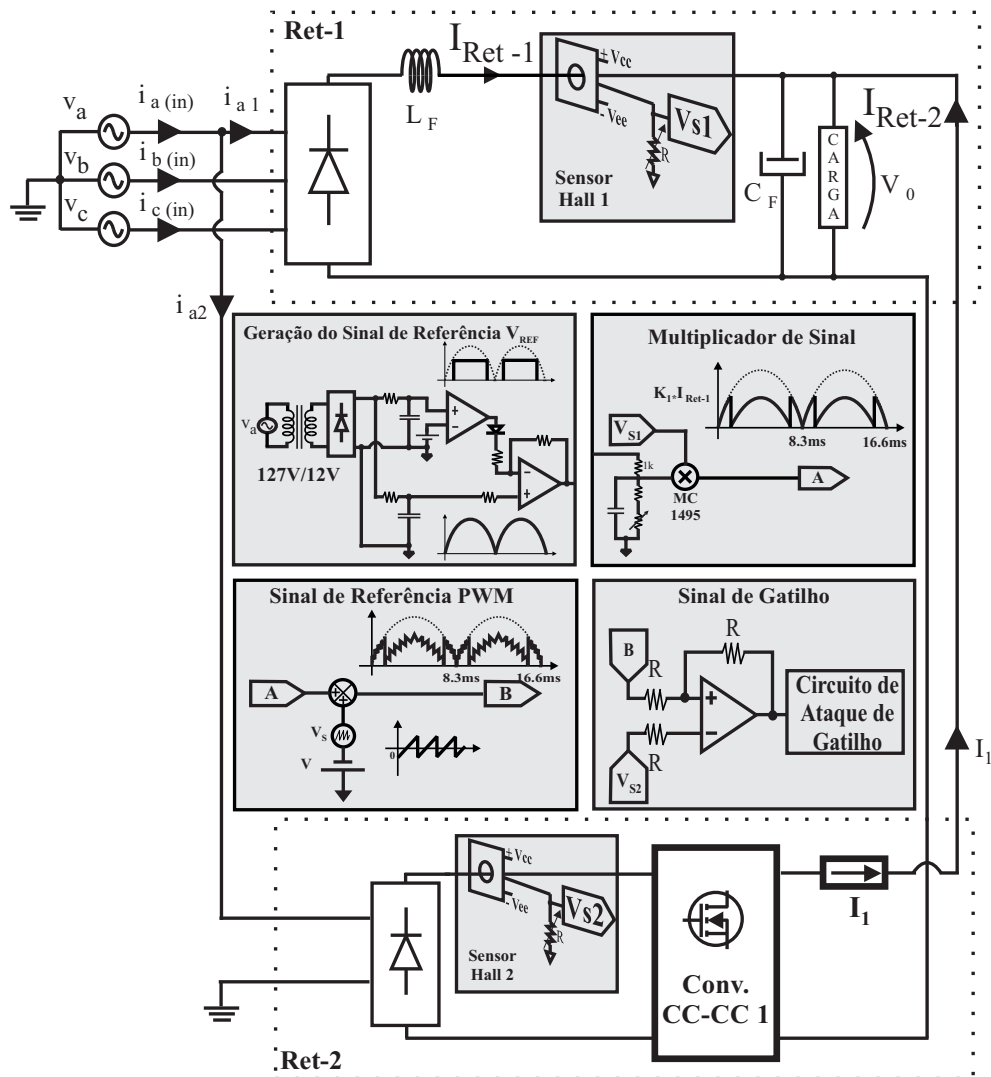


Figura 6.16: Diagrama de blocos esquemático representando a estratégia de controle PWM em malha fechada - Corrente de Senoidal Imposta.

Uma amostra da tensão fase-neutro é retificada e comparada com um sinal CC. A ma-

gnitude do sinal CC deve ser ajustada de maneira que se obtenha, na saída do comparador, um sinal pulsado com largura igual 120° .

Para se obter o sinal de referência de corrente, a senoide retificada deve ser subtraída do sinal pulsado obtido. Entretanto, os ganhos dos sinais da entrada do subtrator devem ser ajustados de maneira que o sinal de referência de corrente seja de amplitude igual a 50% do valor de pico da senoide retificada.

No intuito de se impor uma corrente senoidal na entrada do RHM proposto, o sinal de referência de corrente é multiplicado por uma fração da corrente I_{Ret-1} estabelecendo uma relação de 1,0 entre o valor de pico da corrente imposta nos conversores chaveados (I_{2P}), e o valor de pico da corrente CA drenada pelo Ret-1 (I_{1P}).

Em seguida, o sinal de referência de corrente é adicionado a uma forma de onda de tensão *dente de serra* V_S , gerando um sinal PWM de referência que é comparado com a corrente através do indutor de entrada dos conversores chaveados (Ret-2). Desta maneira, obtém-se o sinal de ataque de comando para o interruptor principal. Conseqüentemente, a corrente através do indutor de entrada seguirá a forma de onda da referência imposta por uma simples técnica de controle de modulação por largura de pulso - PWM.

6.5 Resultados de Simulação

Uma simulação digital com os dados apresentados na Tab. 6.2 foi realizada impondo correntes CA de alimentação senoidais. A estratégia de controle PWM apresentada na Fig. 6.16 foi implementada no intuito de controlar o RHM impondo a forma de onda

desejada nas correntes de linha de entrada.

6.5.1 RHM Utilizando Conversores *SEPIC* Modificados

A figura 6.17 (a) ilustra que, para k igual a 1 ($I_{2P}/I_{1P} = 1$), o grupo retificador 2 (Ret-2), composto por conversores *SEPIC* modificados, processa em torno de 40% da potência total entregue à carga, um resultado bastante próximo daquele obtido através da análise matemática apresentada no Capítulo 5.

A figura 6.17 (b) ilustra a DHT das correntes CA de alimentação em função dos valores de k . Observa-se que o menor conteúdo harmônico da corrente CA de alimentação é alcançado quando k é igual a 1. Isto significa que o valor de pico da corrente imposta nos conversores chaveados (I_{2P}) é igual ao valor de pico da corrente de linha do retificador de seis pulsos não-controlado (I_{1P}).

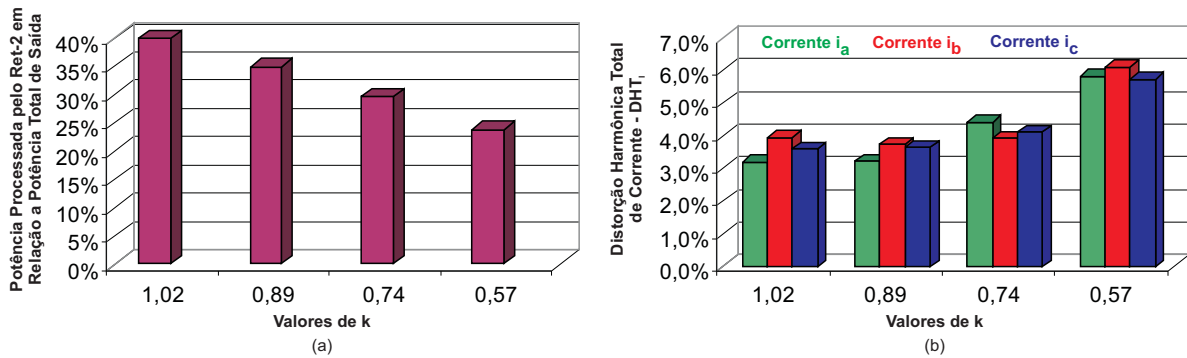


Figura 6.17: (a) Potência ativa processada pelo Ret-2 em função de k , impondo uma corrente CA de alimentação Senoidal (b) DHT_I das correntes de alimentação - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

Os principais resultados de simulação são apresentados nas Figs. 6.18 a 6.21.

Na figura 6.18 são apresentadas as correntes de alimentação na fase A do Ret-1, do Ret-2 e do RHM proposto. Observa-se que a corrente CA de alimentação assume uma

forma de onda senoidal tal qual nos retificadores PWM convencionais, porém, cerca de 60% da potência total entregue à carga é processada pelo retificador de seis pulsos não-controlado, o que torna o RHM proposto bastante atrativo do ponto de vista técnico e comercial.

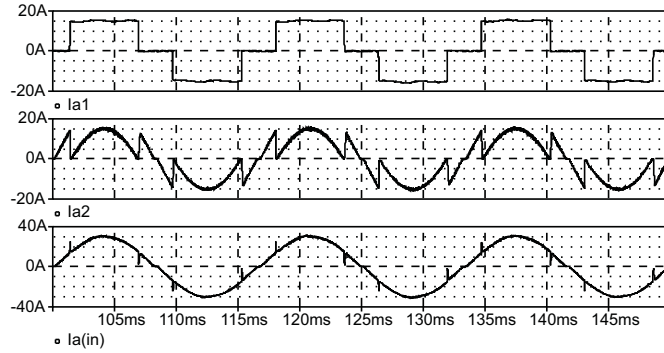


Figura 6.18: Correntes de linha: do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$) - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta.

A figura 6.19 ilustra as correntes de alimentação $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$.

A corrente na fase A ($i_{a(in)}$) e a tensão fase-neutro v_{an} são apresentadas na Fig.6.20, onde é possível constatar que, apesar de se utilizar um transformador, o fator de deslocamento é praticamente nulo.

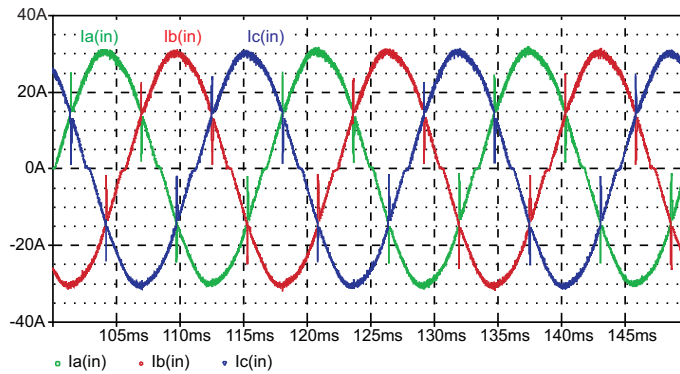


Figura 6.19: Correntes CA de alimentação do RHM: $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta.

Para que se possa avaliar os resultados alcançados, na figura 6.21 são apresentados os

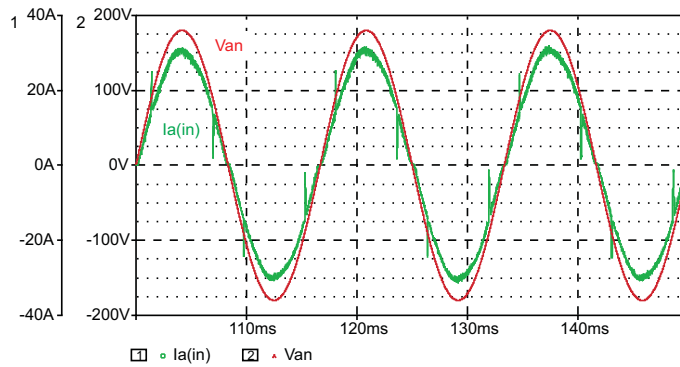


Figura 6.20: Tensão fase-neutro V_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta.

espectros harmônicos das correntes CA de alimentação obtidos e os limites impostos pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*.

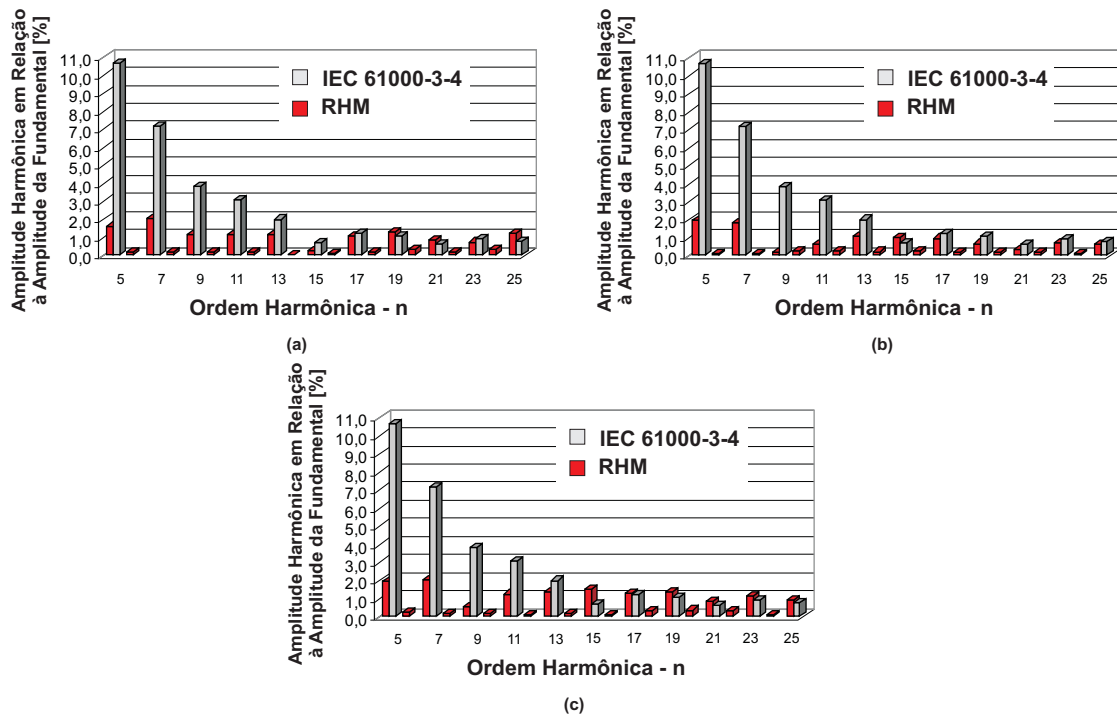


Figura 6.21: Espectros harmônicos das correntes de linha do RHM proposto - (a) $i_{a(in)}$ (b) $i_{b(in)}$ e (c) $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta.

Conforme ilustrado na Fig.6.21, observa-se que nem todas as restrições impostas pela norma *IEC 61000-3-4* são respeitadas. Isso acontece devido aos elevados transitórios

presentes no momento em que a corrente imposta nos conversores chaveados se soma com a corrente drenada pelo retificador de seis pulsos não-controlado.

Entretanto, caso seja considerada a presença da indutância de linha da rede CA de alimentação, os picos de corrente são minimizados.

Nesse sentido, foram realizadas novas análises por simulação, considerando-se a presença de uma indutância de linha com um valor da ordem de $100\mu\text{H}$.

Logo, observa-se que, em virtude da atenuação dos transitórios durante a soma das correntes i_{a1} e i_{a2} , os espectros harmônicos das correntes CA de alimentação são melhorados sensivelmente, conforme mostra os resultados de simulação apresentados nas Figs.6.22 a 6.36.

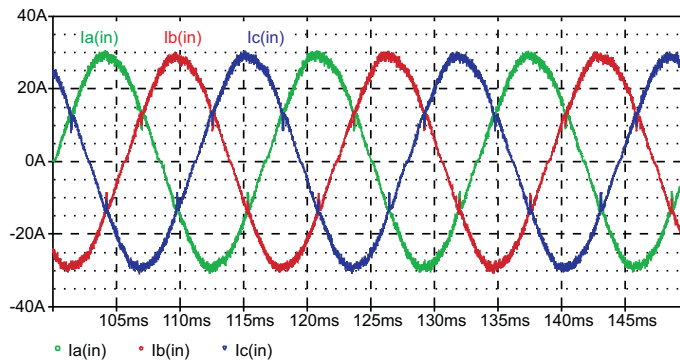


Figura 6.22: Correntes CA de alimentação do RHM: $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

Conforme esperado, a inserção de uma indutância de linha da ordem de $100\mu\text{H}$ na rede CA de alimentação, faz com que a DHT das correntes de linha seja reduzido para cerca de 3,8%, conseqüentemente, pode-se afirmar que o RHM proposto, operando com correntes senoidais impostas, opera em conformidade com a norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*, sem a necessidade de se utilizar filtros passivos na entrada, conforme ilustrado na Fig.6.24.

Na figura 6.25 são apresentadas curvas que representam o comportamento de cada

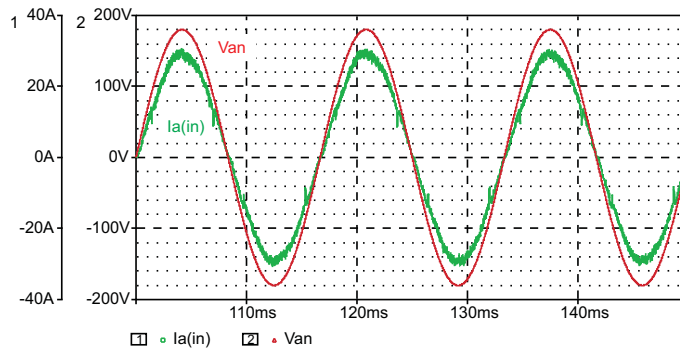


Figura 6.23: Tensão fase-neutro v_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

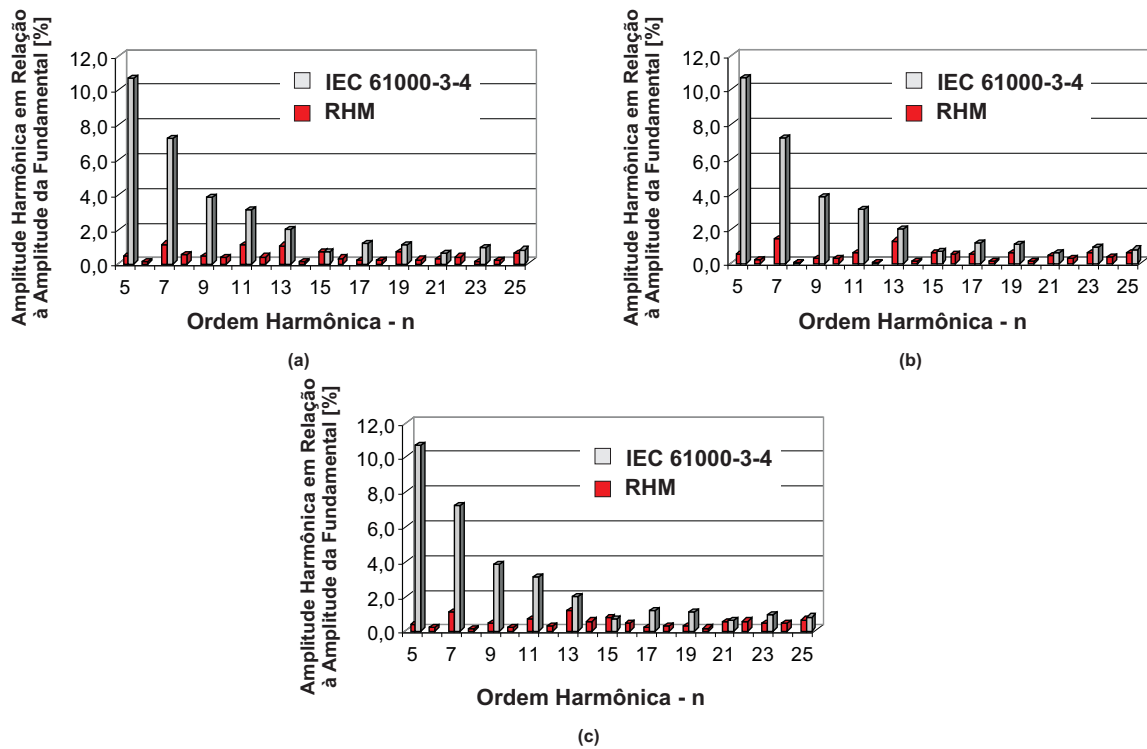


Figura 6.24: Espectros harmônicos das correntes de linha do RHM proposto - (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Senoidal Imposta - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

grupo retificador, no que se refere às magnitudes das potências ativas médias processadas pelos Ret-1 (P_{Ret-1}) e Ret-2 (P_{Ret-2}) em função do parâmetro k , quando o RHM proposto opera com correntes CA de alimentação senoidais.

O desempenho ideal do RHM proposto, no modo de operação com corrente senoidal

imposta, no que diz respeito à DHT da corrente CA de alimentação, é alcançado para valores de k em torno de 1,0. Neste caso, conforme a análise matemática apresentada no Capítulo 5, o grupo retificador 2 processa menos de 45% da potência ativa total entregue à carga.

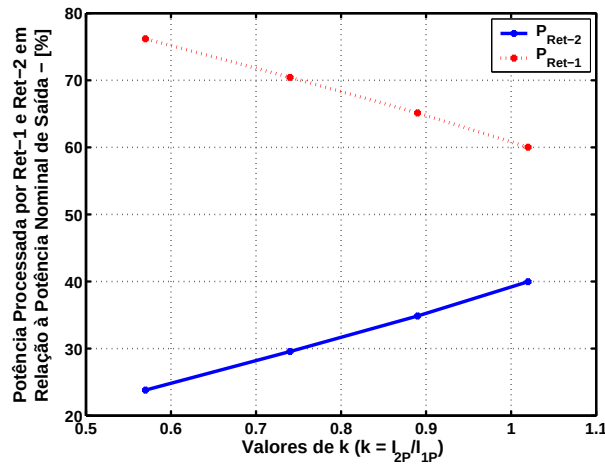


Figura 6.25: Potência processada por cada grupo retificador em função de k , impondo uma corrente CA de alimentação senoidal - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados.

Neste momento, é válido ressaltar que para valores de k menores que 1, a corrente CA de alimentação imposta sofre distorções que levam a um aumento de seu conteúdo harmônico.

Estudos realizados por simulação mostram que o RHM proposto pode operar em uma região intermediária ($k=0,54$), minimizando a potência processada pelos conversores chaveados. Em contrapartida, nota-se apenas um aumento de cerca de 3% na DHT_I final [52]. Neste caso, necessita-se de filtros passivos reduzidos, ajustados para filtrar acima do componente harmônico de corrente 17ª ordem para que a performance do RHM proposto possa se adequar às restrições impostas pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*.

Os resultados obtidos por simulação para o caso descrito anteriormente são apresen-

tados nas Figs.6.26 a 6.28.

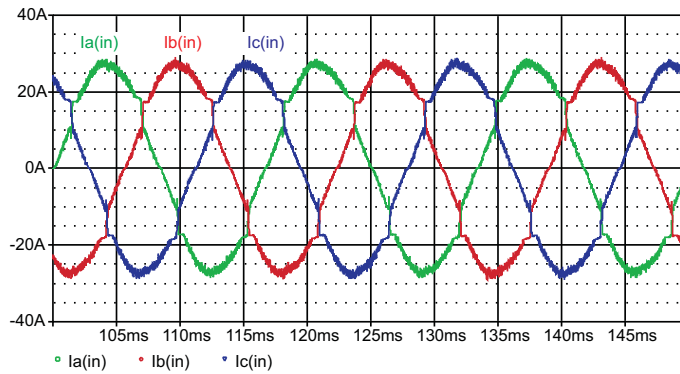


Figura 6.26: Corrente CA de alimentação do RHM $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente quase Senoidal Imposta - $k = 0,54$ - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

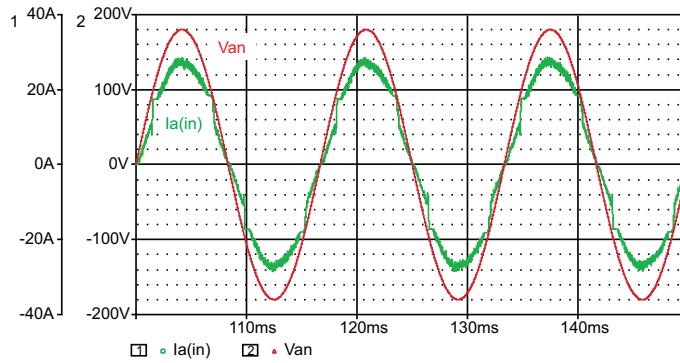


Figura 6.27: Tensão fase-neutro V_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente quase Senoidal Imposta - $k = 0,54$ - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

Conforme apresentado no capítulo 3, a forma de onda da corrente imposta nos conversores chaveados deve ser tal que o somatório das correntes drenadas da rede CA de alimentação no nó seja sempre zero, conseqüentemente, não haverá fluxo de corrente no neutro do sistema.

Portanto, torna-se necessário destacar que, no modo de operação com correntes senoidais impostas, valores de k menores que 1 fazem com que este princípio básico para composição da corrente CA de alimentação não seja respeitado, conforme ilustrado na Fig.6.29.

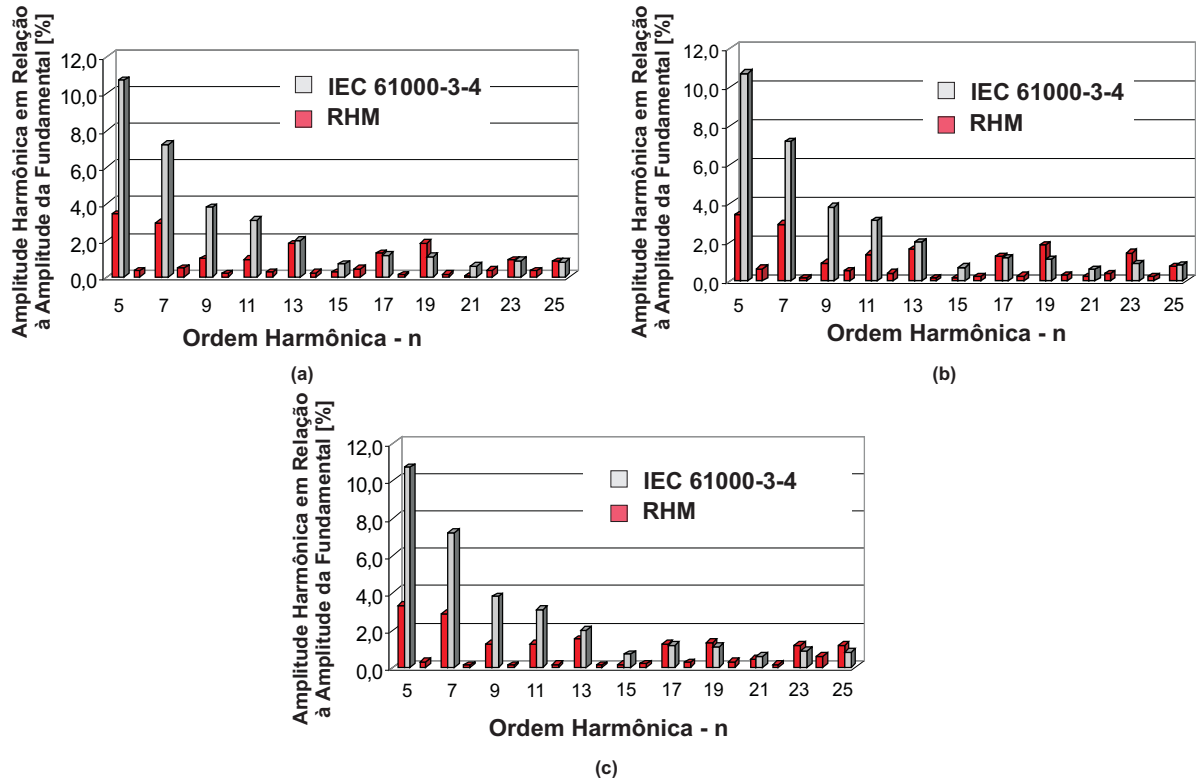


Figura 6.28: Espectro Harmônico das correntes de linha do RHM: (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente quase Senoidal Imposta - $k = 0,54$ - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

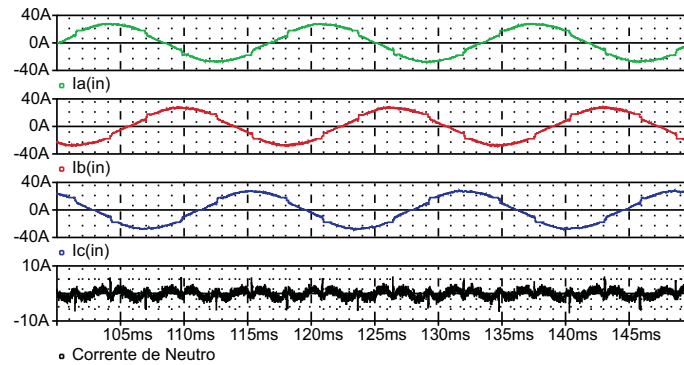


Figura 6.29: Correntes CA de alimentação quase senoidais - correntes $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$, $i_{c(in)}$ e corrente de neutro, respectivamente - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente quase Senoidal Imposta - $k = 0,54$ - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

Assim, caso seja atrativo reduzir a potência processada pelos conversores chaveados, cria-se a necessidade de se implementar artifícios que não permitam que a corrente resultante circule pelo neutro da rede CA. Por exemplo, pode-se criar um neutro para o

RHM através da conexão de capacitores de filtro entre cada fase e o ponto comum da alimentação dos conversores chaveados.

6.5.2 RHM Utilizando Conversores *Boost*

A figura 6.30 (a) ilustra que, para k igual a 1, o grupo retificador 2 (Ret-2), composto por conversores *Boost*, processa em torno de 43% da potência total entregue à carga, um resultado bastante próximo daquele obtido através da análise matemática apresentada no Capítulo 5.

A diferença de 3% em relação a utilização de conversores *SEPIC* modificados, conforme observado quando o RHM proposto opera como um retificador de 12 pulsos, ocorre em função da utilização de transformadores isoladores para alimentar os conversores *Boost*.

A figura 6.30 (b) ilustra o conteúdo harmônico das correntes CA de alimentação em função dos valores de k .

Assim, observa-se que, uma vez que o valor de pico da corrente imposta nos conversores *Boost* é igual ao valor de pico da corrente drenada pelo Ret-1, garante-se que RHM proposto opera com correntes CA de alimentação com conteúdo harmônico mínimo.

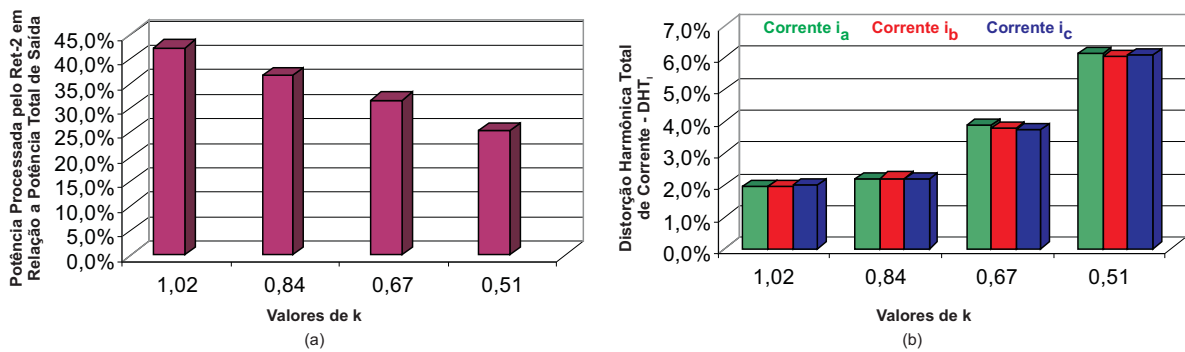


Figura 6.30: (a) Potência ativa processada pelo Ret-2 em função de k , impondo uma corrente CA de alimentação Senoidal (b) DHT_I das correntes de alimentação - RHM utilizando conversores *Boost*.

Os principais resultados de simulação são apresentados nas Figs. 6.31 a 6.34.

Na figura 6.31 são apresentadas as correntes de alimentação na fase A do Ret-1, do Ret-2 e do RHM proposto. Observa-se que a corrente CA de alimentação assume uma forma de onda senoidal tal qual nos retificadores PWM convencionais, porém, cerca de 57% da potência total entregue à carga é processada por um simples retificador de seis pulsos convencional, o que torna RHM proposto bastante atrativo do ponto de vista técnico e comercial.

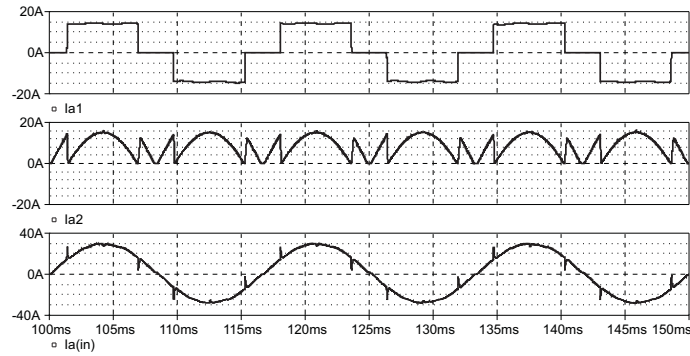


Figura 6.31: Corrente de linha do Ret-1 (i_{a1}), corrente de linha do Ret-2 (i_{a2}) e corrente CA de alimentação do RHM ($i_{a(in)}$) - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta.

Na figura 6.32, são apresentadas as correntes de alimentação $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$.

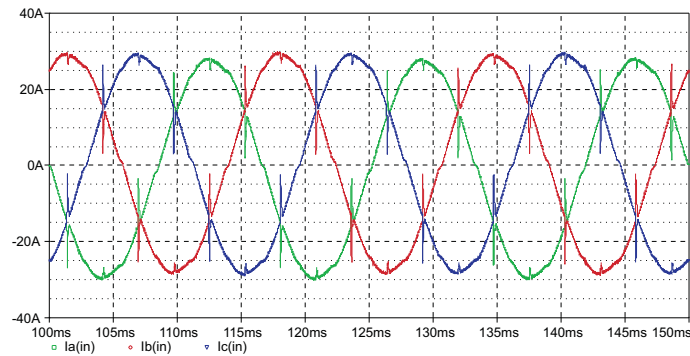


Figura 6.32: Corrente CA de alimentação do RHM $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta.

A corrente na fase A ($i_{a(in)}$) e a tensão fase-neutro v_{an} são apresentadas na Fig.6.33,

observa-se que o fator de deslocamento é praticamente nulo.

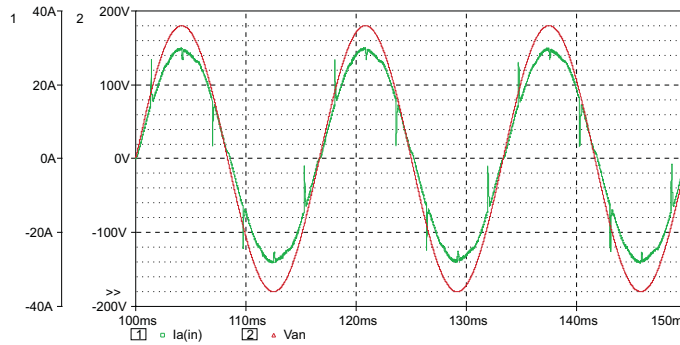


Figura 6.33: Tensão fase-neutro V_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta.

Na figura 6.34 são apresentados os espectros harmônicos das correntes CA de alimentação obtidos e, para que se possa avaliar os resultados alcançados, são apresentados os limites impostos pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*. Desta maneira, observa-se que, em virtude dos transitórios que ocorrem no momento em que a corrente i_{a2} se soma com a corrente i_{a1} , nem todas as restrições impostas pela norma são respeitadas.

Conforme ilustrado na seção anterior, com a inserção de uma indutância de linha da ordem de $100\mu\text{H}$ na rede trifásica de alimentação, os resultados alcançados demonstram que RHM proposto é capaz de operar com correntes CA de alimentação senoidais respeitando todos os limites impostos pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*, sem a necessidade de se utilizar filtros passivos.

Para ilustrar o que foi exposto anteriormente, são apresentados nas Figs.6.35 até 6.37, os principais resultados obtidos, levando-se em conta a presença de uma indutância de linha da ordem de $100\mu\text{H}$.

A figura 6.37 mostra que magnitude de todas os componentes harmônicos da corrente CA de alimentação estão abaixo dos níveis máximos impostos pela norma *IEC 61000-3-*

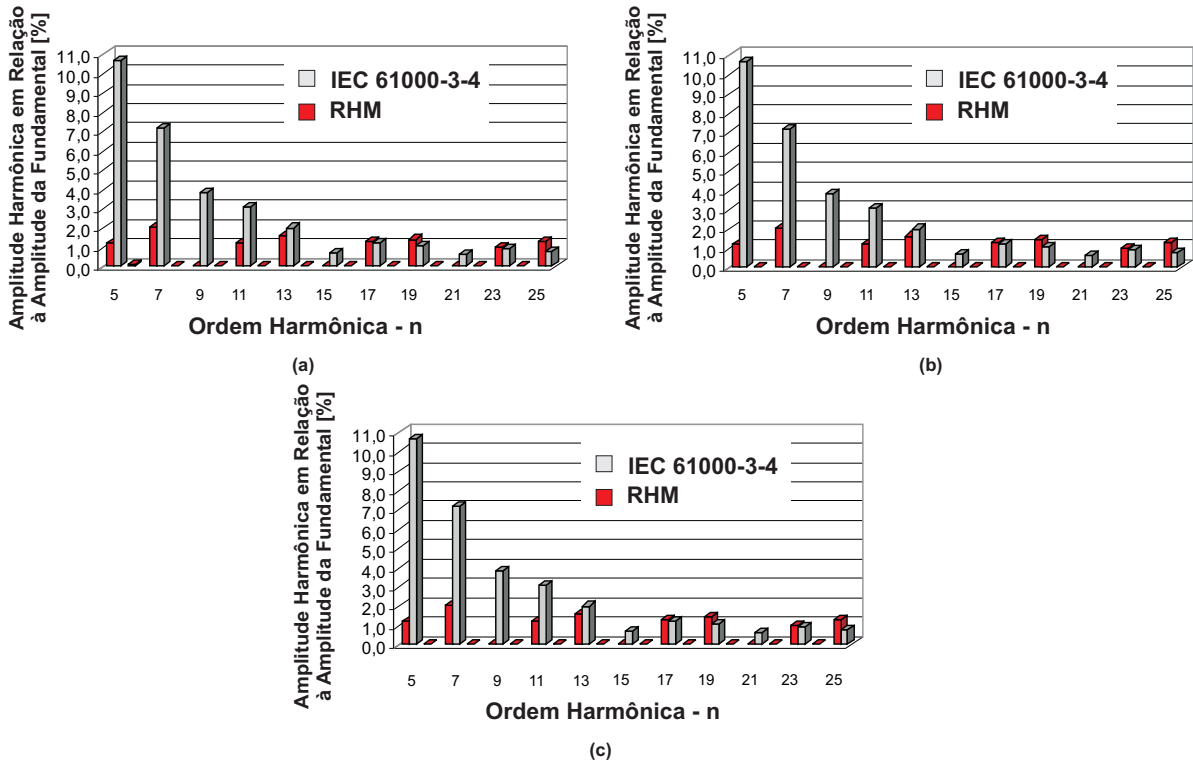


Figura 6.34: Espectro Harmônico das correntes de linha do RHM proposto, operando com corrente CA de alimentação Senoidal - (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta.

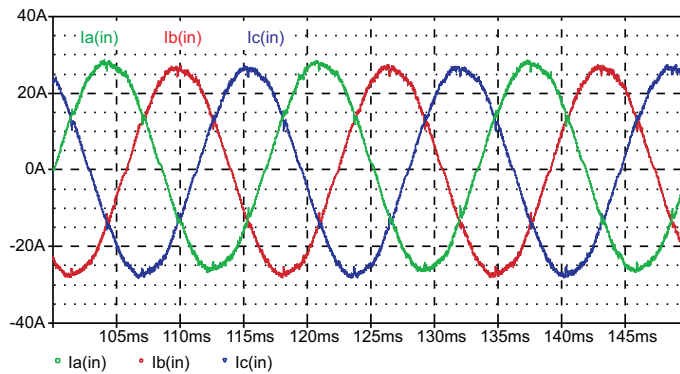


Figura 6.35: Correntes CA de alimentação do RHM $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

4/Estágio 1.

O gráfico apresentado na Fig.6.38, ilustra os dois pontos de operação referentes aos resultados de simulação apresentados nessa seção.

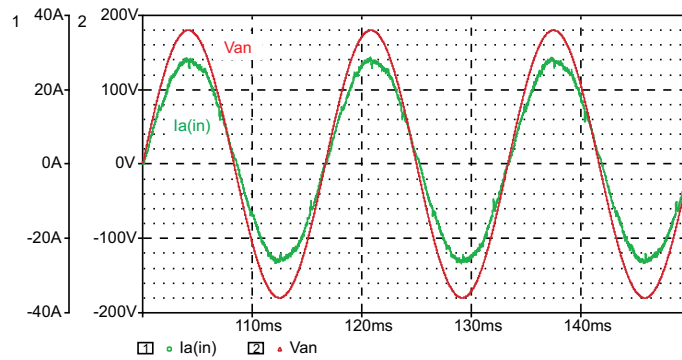


Figura 6.36: Tensão fase-neutro v_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

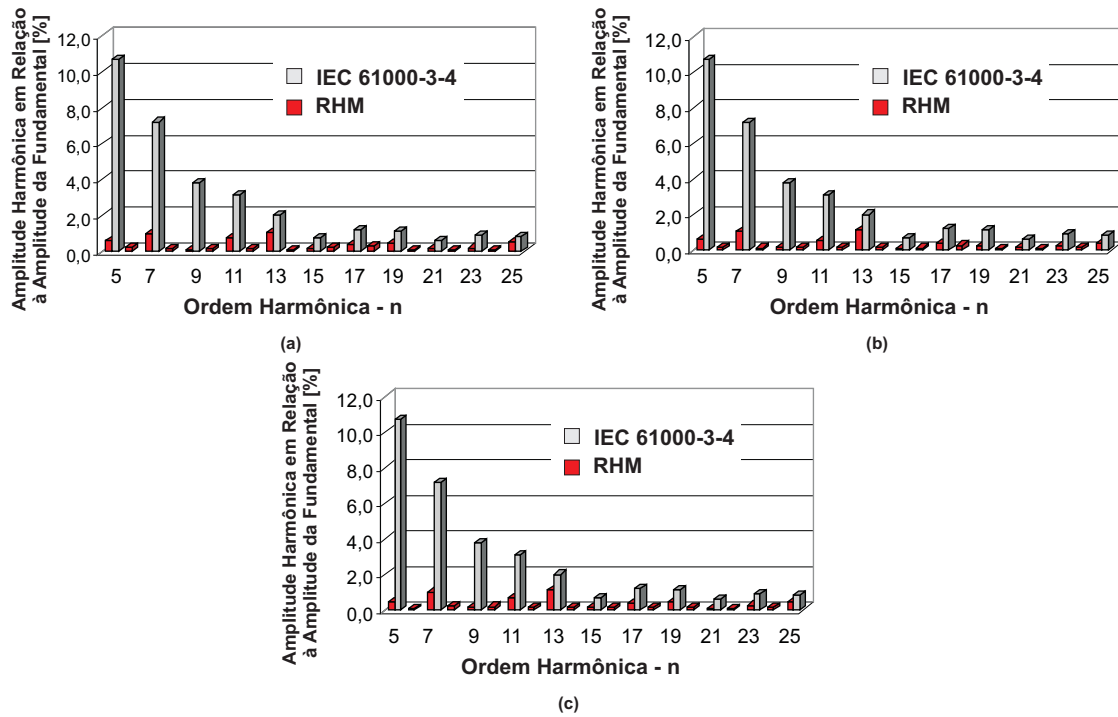


Figura 6.37: Espectros harmônicos das correntes de linha do RHM proposto - (a) $i_{a(in)}$ (b) $i_{b(in)}$ e (c) $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *Boost* - Corrente Senoidal Imposta - Indutância de Linha de $100\mu\text{H}$.

Assim, de acordo com a Fig.6.38, observa-se que para k igual 1, os conversores *Boost* processam cerca de 43% da potência total de saída. Quando k é igual a aproximadamente 0,5, a potência processada pelos conversores *Boost* é cerca de 23%.

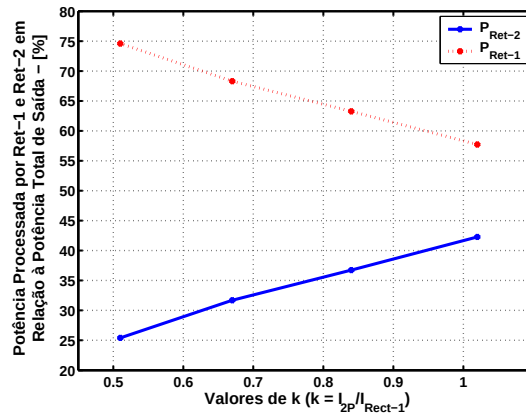


Figura 6.38: Potência processada por cada grupo retificador em função de k , impondo uma corrente CA de alimentação senoidal - RHM utilizando conversores *Boost*.

6.6 Imposição de uma Corrente CA de Alimentação Trapezoidal

A obtenção de uma corrente CA de alimentação com forma de onda trapezoidal consiste na imposição de uma corrente no indutor de entrada dos conversores chaveados (corrente i_{a2}) conforme apresentado na Fig.6.39.

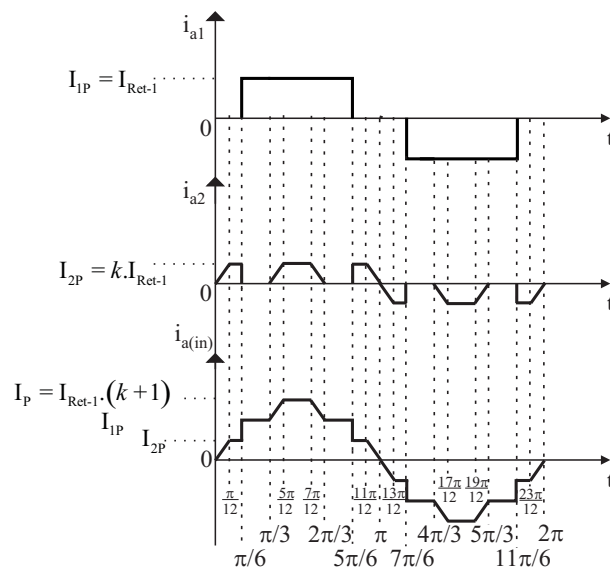


Figura 6.39: Formas de onda teórica das corrente no RHM e da rede CA de alimentação, com forma de onda trapezoidal

Os princípios para composição da forma de onda da corrente CA de alimentação são os mesmos, ou seja, a relação entre o valor de pico da corrente imposta nos conversores chaveados (I_{2P}) e o valor de pico da corrente de linha do retificador de seis pulsos não-controlado (I_{1P}) é determinante no que se refere à DHT_I alcançada.

Uma simulação digital com os mesmos parâmetros apresentados na Tab.6.2 foi realizada utilizando-se o software *PSpice*®. Serão apresentados resultados referentes a utilização de conversores *SEPIC* modificados, compondo o grupo retificador 2 (Ret-2).

O desempenho do RHM utilizando conversores *Boost* é muito parecido com o desempenho do RHM utilizando conversores *SEPIC*, conforme observado nos casos descritos anteriormente neste capítulo (corrente CA de alimentação de 12 pulsos e senoidal). Portanto, não se faz necessário a apresentação dos resultados de simulação do RHM utilizando conversores *Boost* para impor correntes trapezoidais e de 20 pulsos.

6.6.1 Resultados de Simulação

A Fig.6.40 ilustra a corrente imposta no conversor *SEPIC* (i_{a2}), a corrente de entrada do retificador de seis pulsos não-controlado (i_{a1}) e a corrente de linha ($i_{a(in)}$).

A Fig.6.41 ilustra a corrente de linha $i_{a(in)}$ e a tensão de fase-neutro v_a .

A Fig.6.42 ilustra as correntes de linha $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$.

A Fig.6.43 mostra que o desempenho do RHM proposto operando com corrente CA de alimentação com forma de onda trapezoidal imposta, é muito semelhante àquele com o RHM operando como um retificador de 12 pulsos convencional. Isto significa que os ganhos com relação à DHT_I alcançada são praticamente desprezíveis, uma vez que componentes

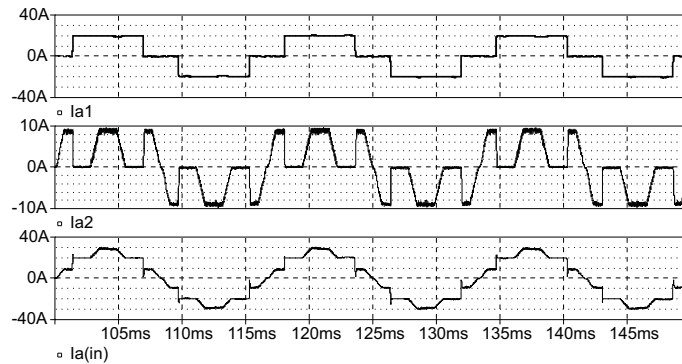


Figura 6.40: Correntes de linha: do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$) - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Trapezoidal Imposta.

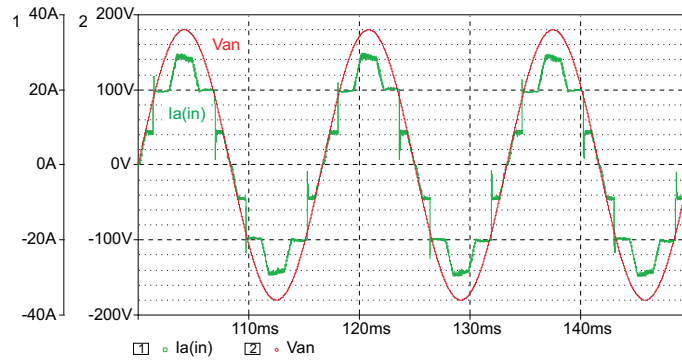


Figura 6.41: Tensão fase-neutro v_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Trapezoidal Imposta.

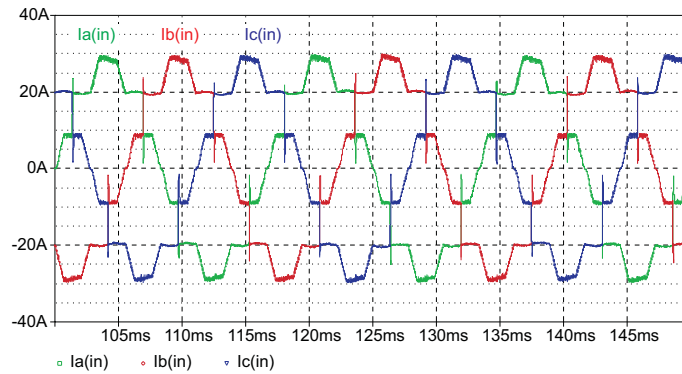


Figura 6.42: Correntes CA de alimentação do RHM: $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente Trapezoidal Imposta.

harmônicos de 11^a , 17^a , 23^a e 25^a ordens, ainda estão presentes na forma de onda final da corrente CA de alimentação.

Desta maneira, ainda existe a necessidade de se utilizar filtros passivos para filtrar tais

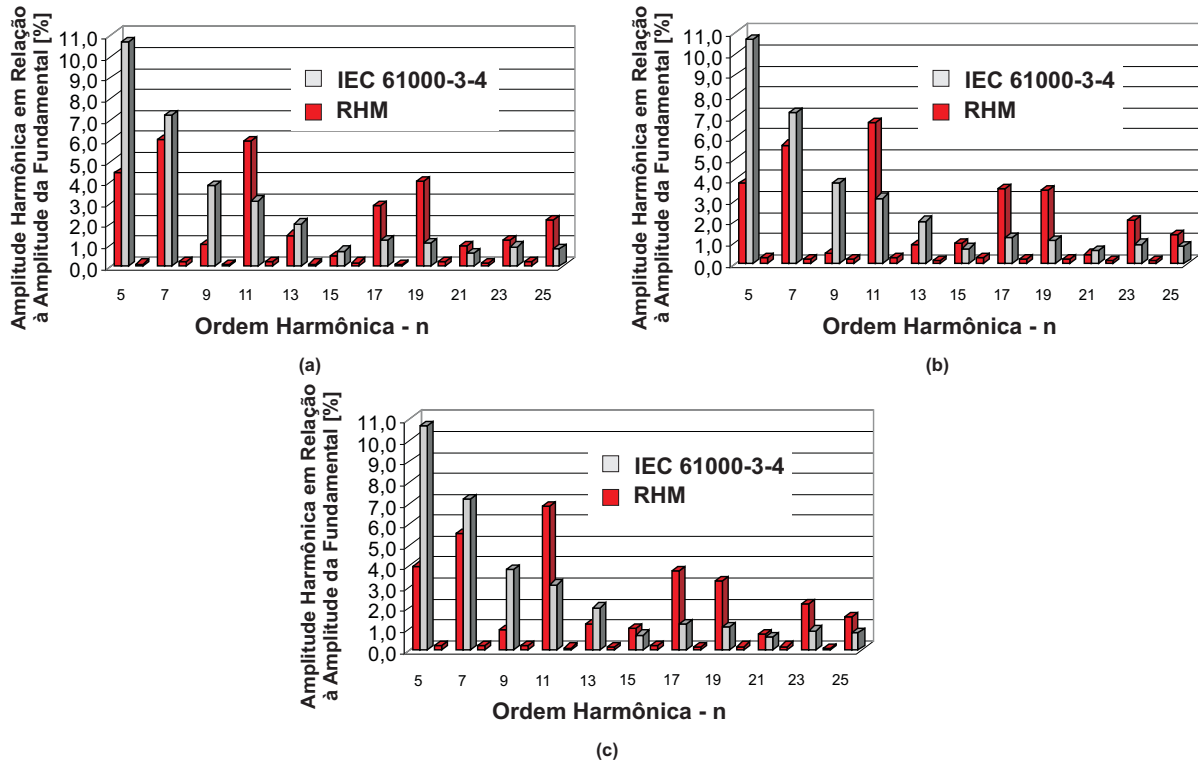


Figura 6.43: Distorção harmônica total de corrente do RHM proposto operando com corrente CA de alimentação trapezoidal - (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente trapezoidal Imposta.

componentes harmônicos de corrente e atender às restrições impostas pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*.

Um possível benefício adicional desta técnica estaria associado à redução dos níveis de interferências eletromagnéticas conduzidas, em função da redução de variações bruscas de corrente (di/dt), durante o intervalo de tempo em que as correntes i_{a1} e i_{a2} se somam.

Tabela 6.4: Resumo - Resultados de Simulação - RHM Utilizando Conversores *SEPIC* - Corrente Trapezoidal Imposta.

k	P_0 (W)	P_{Ret-1} (W)	P_{Ret-2} (W)	P_{Ret-2}/P_0 (%)	DHT_I (%)		
					$i_{a(in)}$	$i_{b(in)}$	$i_{c(in)}$
0,4	6810,10	5883,40	926,70	13,60	11,16	11,15	11,69

Conforme ilustrado na Tab.6.4, o desempenho do RHM proposto, drenando correntes

trapezoidais da rede CA de alimentação, é muito semelhante àquele do RHM operando com correntes de 12 pulsos impostas.

Entretanto, para impor uma forma de onda de 12 pulsos na corrente CA de alimentação, a estratégia de controle a ser implementada é mais simples quando comparado com a estratégia de controle utilizada para impor uma forma de onda trapezoidal na corrente CA de alimentação.

Por outro lado, em aplicações onde se torna necessário o atendimento incondicional às restrições impostas pela norma IEC 61000-3-4, a imposição de uma forma de onda senoidal nas correntes CA de alimentação é a solução mais adequada. Neste caso, destaca-se que a parcela de contribuição dos conversores chaveados será em torno de 40% à 45% da potência ativa total fornecida à carga.

6.7 Imposição de uma Corrente CA de Alimentação de 20 Pulsos

A obtenção de uma corrente CA de alimentação com forma de onda de 20 pulsos, consiste na imposição de uma corrente no indutor de entrada dos conversores chaveados (corrente i_{a2}) conforme apresentado na Fig.6.44.

Os princípios para composição da forma de onda da corrente CA de alimentação são os mesmos apresentados até agora. Neste modo de operação, os ganhos referentes à DHT_I alcançada são mínimos e, além disso, a parcela de potência ativa processada pelos conversores chaveados é maior quando comparado com os casos em que se impõe correntes

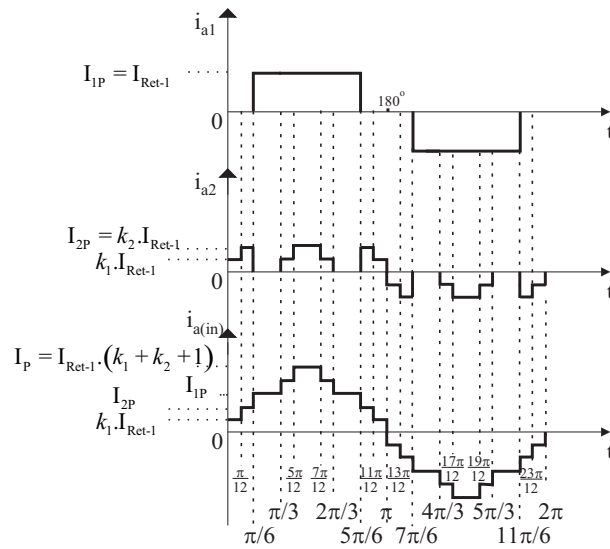


Figura 6.44: Formas de onda teórica das corrente no RHM e da rede CA de alimentação, com forma de onda de 20 pulsos.

CA de alimentação com formas de onda de 12 pulsos e trapezoidais.

6.7.1 Resultados de Simulação

A Fig.6.45 ilustra a corrente imposta no conversor *SEPIC* (i_{a2}), a corrente de entrada do retificador de seis pulsos não-controlado (i_{a1}) e a corrente de linha ($i_{a(in)}$).

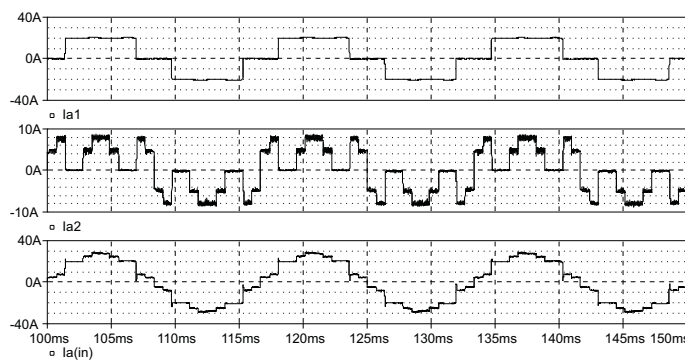


Figura 6.45: Correntes de linha: do Ret-1 (i_{a1}), do Ret-2 (i_{a2}) e do RHM ($i_{a(in)}$) - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 20 pulsos Imposta.

A Fig.6.46 ilustra a corrente de linha $i_{a(in)}$ e a tensão de fase-neutro v_{an} .

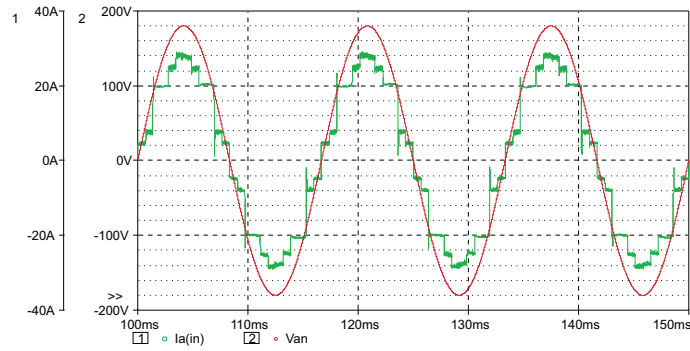


Figura 6.46: Tensão fase-neutro V_{an} e corrente CA de alimentação $i_{a(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 20 pulsos Imposta.

A Fig.6.47 ilustra as correntes de linha $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$.

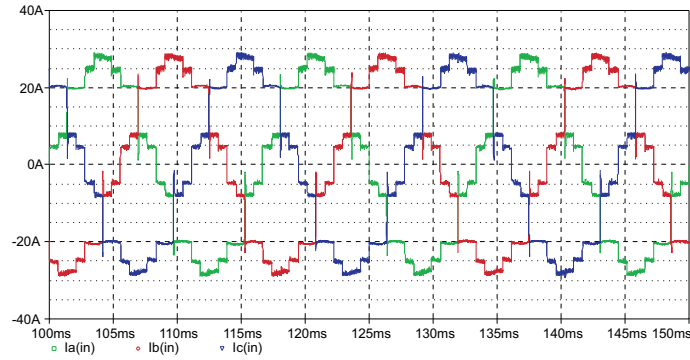


Figura 6.47: Correntes CA de alimentação do RHM: $i_{a(in)}$, $i_{b(in)}$ e $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 20 pulsos Imposta.

A Fig.6.48 ilustra o espectro harmônico das correntes de linha.

Tabela 6.5: Resumo - Resultados de Simulação - RHM Utilizando Conversores *SEPIC* - Corrente de 20 Pulsos Imposta.

k_1	k_2	P_0 (W)	P_{Ret-1} (W)	P_{Ret-2} (W)	P_{Ret-2}/P_0 (%)	DHT_I (%)		
						$i_{a(in)}$	$i_{b(in)}$	$i_{c(in)}$
0,21	0,4	6814,30	5846,80	967,50	14,19	11,23	11,27	11,21

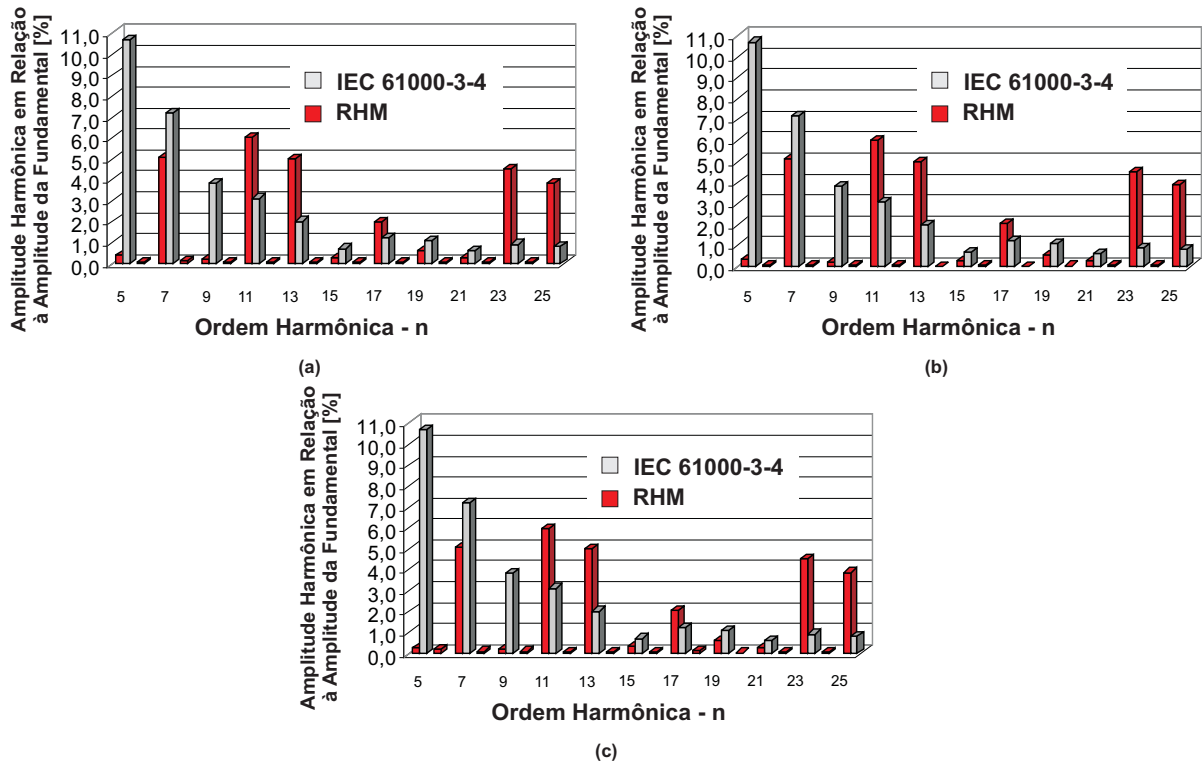


Figura 6.48: Espectros harmônicos das corrente do RHM proposto - (a) corrente $i_{a(in)}$ (b) corrente $i_{b(in)}$ e (c) corrente $i_{c(in)}$ - RHM utilizando conversores *SEPIC* modificados - Corrente de 20 pulsos Imposta.

6.8 Conclusão

Para ilustrar o desempenho do retificador híbrido multipulsos (RHM) proposto, neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos por simulação referentes a quatro diferentes modos de operação, impondo-se correntes CA de alimentação de 12 pulsos, trapezoidal, 20 pulsos e senoidal. Uma ênfase maior foi dada aos modos de operação com corrente CA de alimentação de 12 pulsos e senoidal.

Nesse sentido, avaliou-se o desempenho do RHM proposto operando como um retificador de 12 pulsos convencional ficando comprovado que, diante dos bons resultados de DHT_I obtidos, o conversor proposto supera diversas topologias de retificadores de 12 pulsos encontradas na literatura, [19], [20], [25], [31], principalmente, devido a sua sim-

plicidade de projeto e robustez, o que torna a estrutura proposta atrativa para aplicações de dezenas de kW (até cerca de 50kW).

Em aplicações onde se torna necessário o atendimento incondicional a todas as restrições impostas pela norma *IEC 61000-3-4/Estágio 1*, o RHM proposto se mostrou capaz de operar drenando correntes senoidais da rede CA de alimentação.

Comprovou-se que o conversor proposto, além de ser adequado para operar como um retificador de 12 pulsos convencional, apresenta um desempenho bastante atrativo quando opera como um retificador PFC-PWM unidirecional trifásico convencional. Neste caso, demonstrou-se que a utilização do RHM proposto é mais vantajosa devido ao fato de que os conversores chaveados processam, no máximo, 45% da potência total que é fornecida à carga, empregando-se técnicas de controle bastante simples. Assim, consegue-se reduzir os custos, e aumentar a confiabilidade do grupo retificador.

Desta maneira, conclui-se que é possível construir um equipamento de elevado rendimento, baixo custo e com tamanho e pesos reduzidos. Esta estrutura é adequado para aplicação em potências elevadas (até 50 kW), o que não é possível utilizando-se retificadores PFC-PWM unidirecionais trifásicos convencionais.
