

Capítulo 6: Discussão dos Resultados Experimentais

“Em ciência, não é tão importante descobrir novas coisas, mas sim descobrir novas maneiras de pensar sobre as coisas antigas.”

William Henry Bragg, (1862 - 1942)

6.1. Apresentação:

De posse dos resultados experimentais obtidos com os dois protótipos de laboratório, torna-se conveniente demonstrar as qualidades do circuito proposto, através de comparações com as outras alternativas apresentadas anteriormente no Capítulo 1. Tendo em vista que o presente trabalho trata de um novo retificador e que a implementação prática do mesmo revelou-se relativamente fácil, pode parecer à primeira vista que o circuito proposto se constituiria apenas em uma alternativa simplificada de se incrementar o Fator de Potência de retificadores trifásicos dotados de filtro indutivo na entrada. Ao contrário, tem-se a convicção de que o novo circuito reúne características de tal forma importantes que torna-se a alternativa mais viável para implementação prática em sistemas industriais, em comparação com as outras alternativas apresentadas.

6.2. Comparações com Soluções “Passivas”

Os retificadores trifásicos que dispõe unicamente de filtro indutivo, seja no lado AC ou no lado DC, tem características de Taxa de Distorção Harmônica muito maiores do que se obtém com o circuito proposto. De mesma forma, os valores de Fator de Potência alcançados em ambos os protótipos é muito superior ao que seria possível obter com tais alternativas.

Por outro lado a utilização de um transformador trifásico auxiliar, conforme os resultados apresentados em [8], aparece como uma alternativa interessante, já que se trata de uma solução puramente baseada em elementos passivos. Apesar dos autores não apresentarem em [8] os valores experimentais de Fator de Potência e de Taxa de Distorção Harmônica, mostram em uma tabela os valores medidos para algumas componentes harmônicas e obtidas em um protótipo com potência de saída de 6 kW. Na Tabela 6-1 reuniu-se tais dados a par com os valores medidos no primeiro protótipo apresentado no Capítulo 5, onde verifica-se nítida vantagem à favor do circuito proposto. Da mesma forma, deve-se levar em conta que no circuito apresentado em [8] tem-se, além dos três indutores ligados à entrada trifásica, o peso e volume

adicionais de mais um indutor saturável e do transformador trifásico, conforme já citado no Capítulo 1.

Tabela 6-1: Comparações de resultados experimentais apresentados em [8] para um protótipo de 6 kW com resultados obtidos à partir do primeiro protótipo construído com o circuito proposto.

Ordem da Componente Harmônica	Obtido no Protótipo de 6 kW apresentado em [8]	Obtido no Protótipo de 7,4 kW apresentado no Capítulo 5
5 ^a	7 %	5%
7 ^a	5,9 %	1,8 %
11 ^a	5,9 %	< 0,5 %
13 ^a	4 %	< 0,5 %

Outra alternativa baseada em elementos passivos, apresentada no Capítulo 1, faz uso dos transformadores de “interfase” ou LITs. Em comparação com os resultados apresentados em [11] de um protótipo de 6 kW, os resultados obtidos com o protótipo de 7,4 kW e apresentados no Capítulo 5 são melhores. Já os resultados mostrados em [12], para um protótipo de 4 kW, são de mesma ordem que os obtidos com o protótipo de 7,4 kW usando o novo retificador. Neste caso, aponta-se como vantagem a favor do novo circuito a ausência do peso e volume representado pelos LITs, além da não necessidade de se ter dois retificadores trifásicos isolados como há em [11] e [12].

6.3. Comparações com Soluções “Ativas”

6.3.1. Índice de Comutação

Para fins de quantificar uma das principais características do novo retificador trifásico, propõe-se a definição de um **Índice de Comutação Máxima**, representado por ψ_{\max} e definido conforme a Equação 6-1:

$$\psi_{\max} = \frac{\sum (V_{\max(S)} \cdot I_{\max(S)})}{P} \quad \text{Eq. 6-1}$$

onde: $V_{\max(S)}$ = tensão máxima presente nos terminais de cada interruptor no bloqueio;

$I_{\max(S)}$ = corrente máxima que flui em cada interruptor;

P = potência de saída do retificador.

Como no numerador tem-se um produto dado em *volt.ampères*, tal Índice de Comutação revela-se adimensional. Pretende-se com tal índice quantificar a complexidade prática representada pela presença de interruptores comandados em um retificador que, despreocupando-se da questão do Fator de Potência, desempenharia sua função apenas com as comutações naturais dos diodos.

Por outro lado, no Capítulo 4 obteve-se a Equação 4-11 para a corrente máxima que flui por cada um dos interruptores bidirecionais:

$$I_{\max(S)} = 1,7410 \times 10^{-2} \left(\frac{V_i}{f \cdot L} \right) \quad \text{Eq. 4-11}$$

De mesma forma, a tensão de bloqueio nos interruptores bidirecionais foi fornecida pela Equação 4-20:

$$V_{\max(S)} = 0,6683 \cdot V_i \quad \text{Eq. 4-20}$$

Usando-se as Equações 4-11 e 4-20 e lembrando que tem-se três interruptores bidirecionais, a expressão para o Índice de Comutação Máxima do novo circuito é dada pela Equação 6-2:

$$\psi_{\max} = \frac{3,4905 \times 10^{-2} \left(\frac{V_i^2}{f \cdot L} \right)}{P} \quad \text{Eq. 6-2}$$

Conforme mostrou-se no Capítulo 2, ao se adotar a “Indutância Crítica” há uma relação fixa entre o valor dos indutores de entrada e a potência nominal do retificador, representada pela Equação 4-4:

$$L = 3,8489 \times 10^{-2} \left(\frac{V_i^2}{f \cdot P} \right) \quad \text{Eq. 4-4}$$

Trocando-se L por P na Equação 4-4, tem-se:

$$P = 3,8489 \times 10^{-2} \left(\frac{V_i^2}{f \cdot L} \right) \quad \text{Eq. 6-3}$$

Colocando-se a Equação 6-3 na Equação 6-2, obtém-se então o valor do Índice de Comutação Máxima do novo circuito:

$$\psi_{\max} = 0,907$$

Por analogia, se na Equação 6-1 for utilizado o valor **eficaz** da corrente que flui nos

interruptores, tem-se um **Índice de Comutação Eficaz** (ψ_{rms}), conforme a Equação 6-4:

$$\psi_{\text{rms}} = \frac{\sum (V_{\text{max}(S)} \cdot I_{\text{rms}(S)})}{P} \quad \text{Eq. 6-4}$$

O **Índice de Comutação Eficaz** (ψ_{rms}) é de especial interesse nos casos em que os interruptores são implementados com dispositivos tais como MOSFETs, onde a natureza resistiva das perdas devem levar em conta o valor eficaz da corrente que flui no dispositivo. No caso particular do circuito proposto, usando-se idêntico raciocínio ao que foi feito anteriormente, obtém-se o valor particular para o **Índice de Comutação Eficaz**:

$$\psi_{\text{rms}} = 5,6 \times 10^{-2}$$

Já nos casos em que os interruptores bidirecionais são implementados com dispositivos de junção, como transistores bipolares ou IGBTs, é de interesse saber-se o valor médio da corrente que flui no dispositivo, razão pela qual propõe-se também um **Índice de Comutação Média** (ψ_{med}), conforme a Equação 6-5:

$$\psi_{\text{med}} = \frac{\sum (V_{\text{max}(S)} \cdot I_{\text{med}(S)})}{P} \quad \text{Eq. 6-5}$$

Também para o caso particular do circuito em estudo, tem-se:

$$\psi_{\text{med}} = 1,7 \times 10^{-2}$$

6.3.2. Comparação com o Retificador Trifásico associado a um Conversor DC-DC

Conforme apresentado no Capítulo 1, foi proposto originalmente em [9] a adição de um conversor DC-DC operando em modo descontínuo de corrente à saída de um retificador trifásico com indutores no lado AC, como maneira de se tornar praticamente unitário o Fator de Potência.

À primeira vista o circuito, mostrado novamente na Figura 6-1, é bastante simples, tendo-se no caso do uso de um conversor DC-DC tipo *boost* apenas um interruptor comandado, enquanto que no circuito proposto tem-se três interruptores bidirecionais.

Usando-se o roteiro de projeto apresentado em [9], tem-se através da Equação 6-6 o valor da corrente máxima que flui através do interruptor *boost*, onde V_{F-N} é a tensão fase—neutro de alimentação do retificador trifásico:

$$I_{\text{max}(S)} = 2,86 \left(\frac{P}{3 \cdot V_{F-N}} \right) \quad \text{Eq. 6-6}$$

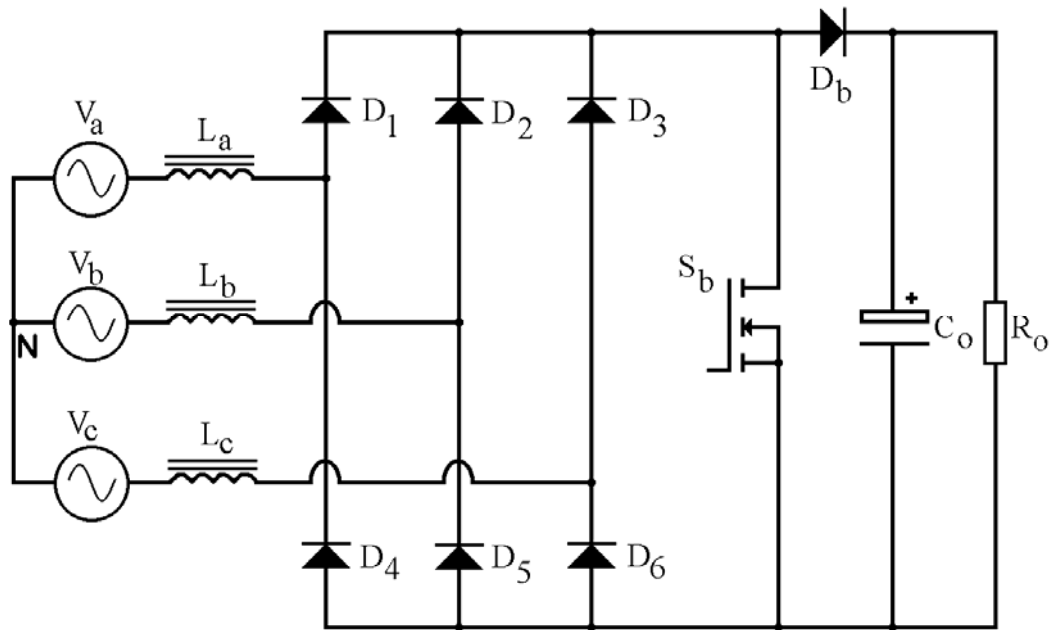


Figura 6-1: Retificador Trifásico com um Conversor DC-DC tipo boost.

Por outro lado, a Equação 6-7 fornece o valor eficaz da corrente que flui no interruptor *boost*, obtida também a partir do roteiro de projeto de [9]:

$$I_{\text{rms}(S)} = 0,713 \left(\frac{P}{3 \cdot V_{F-N}} \right) \quad \text{Eq. 6-7}$$

Também de [9], a tensão mínima na saída do conversor DC-DC tipo *boost* é calculada com a Equação 6-8, onde D representa a razão cíclica do interruptor *boost*.

$$V_{o(\text{min})} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \left(\frac{V_{F-N}}{1-D} \right) \quad \text{Eq. 6-8}$$

Supõe-se agora que, de posse dessas equações, pretende-se projetar retificadores trifásicos com potência de saída semelhantes aos protótipos apresentados no Capítulo 5 (7,4 kW e 12 kW), usando-se a topologia sugerida em [9], ou seja, usando-se um conversor DC-DC tipo *boost* para correção do Fator de Potência. Considerando que a rede trifásica de alimentação seja semelhante à que se usou para os protótipos apresentados e que utilize-se razão cíclica (D) igual a 0,5 para o interruptor *boost*, a tensão de saída do circuito, obtida com a Equação 6-7 é:

$$V_{o(\text{min})} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \left(\frac{127}{1-0,5} \right) = 622,2 \text{ V} \quad \text{Cf. Eq. 6-7}$$

Usando-se as Equações 6-6 e 6-7, na Tabela 6-2 relaciona-se os valores máximo e eficaz da corrente que fluiria no respectivo interruptor *boost* em retificadores com potência de

saída de 7,4 kW e 12 kW. Usando-se as definições lançadas no item 6.3.1, foram também calculados os valores respectivos do Índice de Comutação Máxima (ψ_{\max}) e Índice de Comutação Eficaz (ψ_{rms}) desses hipotéticos retificadores, mostrados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Esforços no interruptor boost de retificadores implementados conforme a Figura 6-1, juntamente com os Índices de Comutação Máxima e Eficaz.

Potência de Saída	Valor máximo da Corrente no interruptor <i>boost</i>	Valor eficaz da Corrente no interruptor <i>boost</i>	Tensão sobre o interruptor <i>boost</i> no bloqueio	Índice de Comutação Máxima	Índice de Comutação Eficaz
7,4 kW	55,55 A	13,85 A	622,2 V	4,67	1,16
12 kW	90,08 A	22,46 A	622,2 V	4,67	1,16

O exame da Tabela 6-2 permite verificar a nítida vantagem do novo circuito em relação à proposta de [9]. Observe-se, por exemplo, que o valor eficaz da corrente nos interruptores bidirecionais do protótipo de 7,4 kW é de apenas 2,93 A, e igual a 4,51 A no protótipo de 12 kW. Conforme mostrado no item 6.3.1, o Índice de Comutação Máxima (ψ_{\max}) é igual a 0,907 no novo circuito, sendo igual a 4,67 na proposta de [9]. No tocante ao Índice de Comutação Eficaz (ψ_{rms}) a vantagem do novo circuito também fica patente, uma vez que se tem tal valor igual a 0,056 no novo circuito e 1,16 no circuito proposto em [9]. Tais diferenças se traduzem, sob o ponto de vista de implementação prática de um retificador, em um custo muito mais elevado ao se optar pelo uso da alternativa mostrada em [9], em comparação com o novo circuito.

Além disso, há de se considerar que o valor calculado com a Equação 6-7 para a tensão de saída do circuito é bastante elevado e inconveniente, por exemplo, para um sistema de carregamento de baterias. Se for optado pelo uso de MOSFET como elemento interruptor *boost*, a tensão de bloqueio elevada se constituirá num grande problema de ordem prática. Para incrementar a tensão suportável por um MOSFET, os fabricantes são obrigados a manter baixo o nível de dopagem do canal, o que se traduz em uma elevada resistência de condução e conseqüente aumento das perdas por condução. Já no novo circuito o nível de tensão sobre os interruptores bidirecionais é muito baixo, permitindo que tais interruptores sejam implementados usando MOSFETs com pequena resistência de condução e possibilitando manter as perdas de condução em valores mínimos.

6.3.3. Comparação com o Retificador Trifásico com Três Interruptores e Modulação de Largura de Pulso

Também foi apresentado no Capítulo 1 a proposta de [15], cujo circuito tem topologia idêntica à do circuito proposto, sendo porém os interruptores bidirecionais comandados por pulso de alta frequência com modulação de largura de pulso (*PWM*). São apresentados em [15] alguns valores referentes ao projeto de um retificador trifásico com potência de saída de 12,6 kW, alimentado por um sistema trifásico com tensão de linha (tensão fase—fase) igual a 400 V. Os valores médio e eficaz da corrente em cada um dos interruptores bidirecionais são mostrados na Tabela 6-3, juntamente com a tensão sobre cada interruptor nos intervalos de bloqueio e os valores calculados dos Índices de Comutação Eficaz e Média.

Tabela 6-3: Esforços nos interruptores bidirecionais de um retificador implementado conforme [15], juntamente com os Índices de Comutação Eficaz e Média.

Potência de Saída	Valor eficaz da Corrente em cada interruptor	Valor médio da Corrente em cada interruptor	Tensão sobre cada interruptor no bloqueio	Índice de Comutação Eficaz	Índice de Comutação Média
12,6 kW	8,6 A	4,4 A	350 V	0,72	0,37

Os valores de Índice de Comutação mostrados na Tabela 6-3 permitem concluir que o circuito proposto em [15] apresenta-se vantajoso em relação à proposta de [9]. Mesmo assim, o novo circuito objeto do presente trabalho é ainda melhor. Conforme se apresentou no item 6.3.1, o **Índice de Comutação Eficaz** (ψ_{rms}) do novo circuito é igual a 0,056 e o **Índice de Comutação Média** (ψ_{med}) é somente 0,017. Apesar das topologias serem semelhantes, tal diferença é compreensível pois, ao contrário do circuito com modulação *PWM*, no novo circuito os interruptores bidirecionais são acionados somente durante $1/6$ de cada período da rede, o que conduz a valores eficaz e médio muito baixos para a corrente que flui nesses dispositivos. Isto posto, também neste caso a comparação se mostra favorável ao novo circuito.

Finalmente o circuito apresentado em [13] e [14], com três interruptores ligados ao ponto neutro do sistema trifásico, não será abordado nesta comparação visto que as sobretensões que aparecem sobre tais interruptores conduzem ao abandono de aplicações industriais dessa alternativa.

6.4. Conclusões

Comparando-se os resultados experimentais obtidos com o novo circuito com

resultados de outras propostas existentes na literatura, conclui-se que há nítidas vantagens deste em relação àqueles.

Fazendo-se inicialmente comparações com soluções baseadas em elementos passivos, verificou-se que tais circuitos apresentam Taxa de Distorção Harmônica elevada, juntamente com problemas de pesos e volumes elevados devido aos elementos magnéticos utilizados.

Para a comparação com propostas onde se tem interruptores comandados, foi proposto o cálculo de Índices de Comutação, numa tentativa de quantificar o grau de dificuldade enfrentado na implementação prática do respectivo circuito. Com isso, demonstrou-se que também nesses casos o novo circuito apresenta-se sempre vantajoso, uma vez que os interruptores bidirecionais processam uma potência muito baixa frente à potência de saída do retificador.