



PIBIC/CNPq/UFPG-2010

## *Estudo sobre conversores CA-CC PWM monofásicos em paralelo*

Rodolpho M. B. Cavalcanti<sup>1</sup>, Cursino Brandão Jacobina<sup>2</sup>

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre conversores CA-CC-CA com foco na primeira etapa da conversão (CA-CC), utilizando retificadores PWM, tendo em vista reduzir as perdas na rede e também no barramento CC, aumentando assim a eficiência do modelo. Aprofundou-se o estudo com a utilização de retificadores PWM conectados em paralelo para garantir uma melhora ainda mais significativa nos resultados. Foram realizadas simulações, utilizando os programas PSIM e MATLAB. Estratégias de controle para cada um dos casos também foram estudadas e a distorção harmônica das tensões e correntes dos sistemas foi avaliada. Os resultados sugerem que a melhor topologia a ser utilizada é a dos retificadores PWM conectados em paralelo, pois esta garante também redução na frequência de chaveamento, reduzindo as perdas de potência e melhorando a eficiência total do sistema.

**Palavras-chave:** Conversão , PWM, Retificadores em paralelo

### Study on single-phase parallel AC-DC PWM converters

### ABSTRACT

This paper has as objective to develop a study on AC-DC-AC converters with focus on the first stage of the conversion (AC-DC), using PWM rectifiers, so that the grid and DC link losses can be reduced, increasing the system's efficiency. Parallel rectifiers' topology was deeply analyzed to ensure that the results would be improved. Simulation programs were made using PSIM and MATLAB softwares. Control strategies for each case were studied and the harmonic distortion of voltages and current of the systems was evaluated. Results suggest that the best topology to be adopted is the parallel PWM rectifier since this one also guarantees a reduction on the switching frequencies, decreasing the power losses and improving the system's total efficiency

**Keywords:** Conversion, PWM, Parallel rectifiers

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [rodolpho.cavalcanti@ee.ufcg.edu.br](mailto:rodolpho.cavalcanti@ee.ufcg.edu.br)

<sup>2</sup> Engenheiro Eletricista, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [jacobina@dee.ufcg.edu.br](mailto:jacobina@dee.ufcg.edu.br)

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas ocorreu de forma acelerada a disseminação de equipamentos eletrônicos ao redor do mundo. Estes equipamentos podem ser de dois tipos: lineares e não-lineares. O primeiro tipo é muito utilizado e drena da rede uma corrente de componente unicamente senoidal e na mesma frequência da tensão fornecida. Já o segundo tipo, frequentemente, necessita que a energia fornecida a ele seja do tipo tensão/corrente contínua.

Assim sendo, faz-se necessária a conversão da energia alternada disponível, seja ela monofásica ou trifásica, em contínua. Com esta finalidade surgem os conversores CA-CC, chamados de retificadores. Existem dois tipos mais usuais de retificadores: Retificadores a ponte de diodos e Retificadores PWM. Retificadores a ponte de diodos são geralmente utilizados para obter uma fonte CC a partir de uma fonte CA e necessitam de bancos de capacitores na sua saída de modo a filtrar a tensão. Os mesmos retiram da fonte, correntes que apresentam frequências diferentes daquela da rede, porém múltiplas da mesma. Essas frequências são denominadas componentes harmônicas e causam problemas como:

- Baixo fator de potência;
- Distorções;
- Aumento nas perdas.

O retificador PWM surge como uma solução para estes problemas. Este tipo de retificador tem como entrada uma corrente senoidal e como saída uma tensão constante no barramento CC. Na maioria das aplicações, prima-se por um fator de potência unitário, devido às duras regulamentações quando se trata dos níveis das harmônicas lançadas na rede. Atualmente, os retificadores PWM têm sido utilizados como conversores CA-CC para acionamentos de máquinas, devido à capacidade regenerativa.

O sistema de controle do retificador PWM consiste numa malha de corrente interna e uma malha de tensão externa. O controle de corrente deve ter uma alta precisão de modo a controlar a corrente instantânea, garantindo assim uma ótima dinâmica.

De modo a reduzir ainda mais as perdas de energia nos retificadores, primou-se pelo uso da topologia de retificadores em paralelo. Esse tipo de conexão ocupa cada vez mais espaço em aplicações tais como: filtros ativos de potência, fontes de energia renováveis e conversores CA-CC-CA. Por outro lado, ao ser utilizada esta conexão, ocorre o surgimento de correntes de circulação entre os retificadores. Neste trabalho é exposta uma estratégia de controle, a qual juntamente com um controle PWM, reduz os efeitos dessa corrente de circulação.

Outra vantagem dos conversores em paralelo é a possibilidade da utilização de duas ou mais portadoras PWM, de mesma amplitude e mesma frequência, mas defasadas. Essa técnica é utilizada para melhorar a distorção harmônica das correntes e tensões de entrada. Reduzindo assim o tamanho dos indutores de filtro, bem como a frequência de chaveamento e melhorando distorção harmônica em relação aos conversores que não são ligados em paralelos.

Para o cálculo dos valores relativos a cada controlador, foram desenvolvidos programas em MATLAB. Os resultados das respectivas simulações são expostos e devidamente comparados.

A duas topologias PWM, convencional e paralelo, podem ser vistas nas figuras 1 e 2 a seguir.

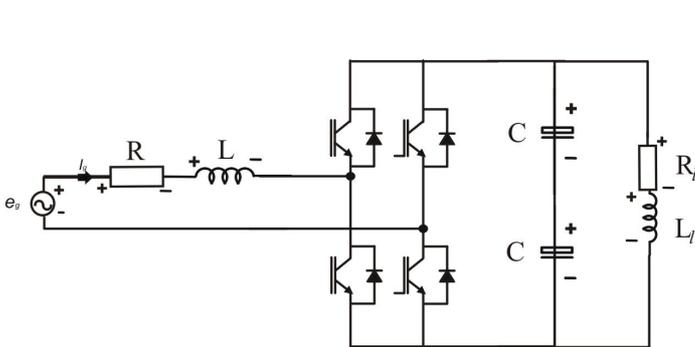


Figura 1: Retificador PWM

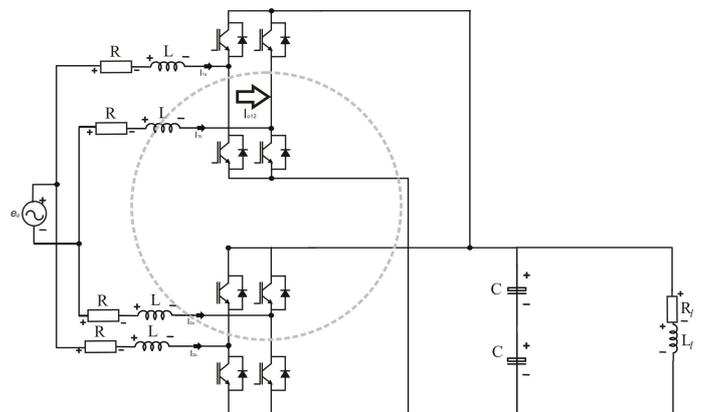


Figura 2: Retificadores PWM em paralelo com destaque para corrente de circulação

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas do Departamento de Engenharia Elétrica no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

### Material

Computador com os softwares PSIM 6.0, MATLAB 7.6 e Dev Cpp

### Modelagem do sistema

A configuração aqui apresentada é formada por dois retificadores PWM, com quatro filtros indutivos, dois para cada um dos retificadores e um barramento CC com dois capacitores em série. Os braços dos conversores possuem duas chaves cada, sendo o estado das mesmas representado por variáveis binárias. Estado 1(“um”) indica chave fechada, enquanto seu complementar, o estado 0(“zero”) indica chave aberta.

As equações a seguir representam o modelo do sistema da figura 2.

$$e_g = Z_{1a} i_{1a} + Z_{1b} i_{1b} + v_1 \quad (1)$$

$$e_g = Z_{2a} i_{2a} + Z_{2b} i_{2b} + v_2 \quad (2)$$

$$i_g = i_{1a} + i_{2a} \quad (3)$$

$$Z_{1a} i_{1a} - Z_{2a} i_{2a} + v_{1ao} - v_{2ao} = 0 \quad (4)$$

$$-Z_{1b} i_{1b} + Z_{2b} i_{2b} + v_{1bo} - v_{2bo} = 0 \quad (5)$$

$$v_{o12} = -Z_{1a} i_{1a} + Z_{2a} i_{2a} + Z_{1b} i_{1b} - Z_{2b} i_{2b} \quad (6)$$

Onde  $v_1$  e  $v_2$  são as tensões de pólo dos retificadores,  $Z$  é a impedância dos filtros indutivos de entrada, a equação (6) é obtida através das somas das suas anteriores, (4) e (5).

As correntes de circulação do sistema são descritas em função de  $i_{1a}, i_{1b}, i_{2a}, i_{2b}$ :

$$i_{1o} = i_{1a} - i_{1b} \quad (7)$$

$$i_{2o} = i_{2a} - i_{2b} \quad (8)$$

No modelo proposto, onde foram utilizados dois retificadores, ocorre apenas uma corrente de circulação definida por:

$$i_{1o} = i_{o12} \quad (9)$$

$$i_{2o} = -i_{o12} \quad (10)$$

Utilizando as equações acima se pode escrever

$$e_g = Z_{1a} i_{1a} + Z_{1b} i_{1b} - Z_{1b} i_{o12} + v_1 \quad (11)$$

$$e_g = Z_{2a} i_{2a} + Z_{2b} i_{2b} + Z_{2b} i_{o12} + v_2 \quad (12)$$

$$v_{o12} = -Z_{1a} i_{1a} + Z_{1b} i_{1b} + Z_{2a} i_{2a} + Z_{2b} i_{2b} - Z_{2b} i_{o12} \quad (13)$$

Que por sua vez, juntamente com a equação da corrente  $i_g$ , descrevem o modelo dinâmico do sistema. Assim sendo, utiliza-se  $v_1 = v_{1a0} - v_{1b0}$  e  $v_2 = v_{2a0} - v_{2b0}$  para regular as correntes  $i_{1a}$  e  $i_{2a}$ . Já  $v_{o12} = v_{1a0} + v_{1b0} - v_{2a0} - v_{2b0}$  para regular a corrente de circulação  $i_{o12}$ , cuja referência é zero. No caso de um sistema balanceado ( $Z_{1a} = Z_{1b} = Z_g$ ):

$$e_g = 2Z_g i_{1a} - Z_g i_{o12} + v_1 \quad (14)$$

$$e_g = 2Z_g i_{2a} + Z_g i_{o12} + v_2 \quad (15)$$

$$v_{o12} = -2Z_g i_{o12} \quad (16)$$

### Estratégia PWM

As tensões de pólo dos retificadores dependem dos estados das chaves, ou seja,

$$v_{1a0} = (2q_{1a} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (17)$$

$$v_{1b0} = (2q_{1b} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (18)$$

$$v_{2a0} = (2q_{2a} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (19)$$

$$v_{2b0} = (2q_{2b} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (20)$$

Onde  $v_c$  representa a tensão no barramento CC. Sabendo que  $v_n^*$  e  $v_{o12}^*$  representam as tensões de saída dos controladores, tem-se também

$$v_1^* = v_{1a0}^* - v_{1b0}^* \quad (21)$$

$$v_2^* = v_{2a0}^* - v_{2b0}^* \quad (22)$$

$$v_{o12}^* = v_{1a0}^* + v_{1b0}^* - v_{2a0}^* - v_{2b0}^* \quad (23)$$

Apenas as equações acima não são suficientes para determinar todas as tensões de pólo do sistema. Assim sendo, inseriu-se uma variável auxiliar  $v_x$ , a qual tem valor determinado por

$v_x^* = \frac{(v_{1a0}^* + v_{1b0}^*)}{2}$ . Pode-se agora escrever as tensões de referência da seguinte forma:

$$v_{1a0}^* = \frac{1}{2} v_1^* + v_x^* \quad (24)$$

$$v_{1b0}^* = -\frac{1}{2} v_1^* + v_x^* \quad (25)$$

$$v_{2a0}^* = \frac{1}{2} v_2^* + \frac{1}{2} v_{o12}^* + v_x^* \quad (26)$$

$$v_{2b0}^* = -\frac{1}{2}v_2^* + \frac{1}{2}v_{o12}^* + v_x^* \quad (27)$$

A tensão  $v_x^*$  pode ser escolhida entres os seus valores máximos e mínimos.

$$v_{xmax}^* = \frac{v_c^*}{2} - v_{rmax}^* \quad (28)$$

$$v_{xmin}^* = -\frac{v_c^*}{2} - v_{rmin}^* \quad (29)$$

Onde  $v_c^*$  é a tensão de referência para o controle do barramento e  $v_{rmax}^*$  e  $v_{rmin}^*$  são os valores máximos e mínimos do vetor  $V_r$

$$V_r = \left\{ \frac{1}{2}v_1^*, -\frac{1}{2}v_1^*, \frac{1}{2}v_2^* + v_{o12}^*, -\frac{1}{2}v_2^* + v_{o12}^* \right\}$$

A tensão  $v_x^*$  é determinada fazendo-se

$$v_x^* = \mu v_{xmax}^* + (1 - \mu) v_{xmin}^* \quad (30)$$

Onde  $0 \leq \mu \leq 1$  é o fator de roda livre. Vale ressaltar que se os valores extremos (0 e 1) forem utilizados, um dos braços dos conversores funcionará com freqüência de chaveamento igual a zero. Por outro lado, a utilização de valores médios, fornece sinais de tensão com THD melhorado.

Os sinais de abertura e fechamento das chaves em cada braço são obtidos comparando os sinais de referência com ondas triangulares. Neste trabalho foram realizados estudos para três casos: apenas uma onda, duas ondas e quatro ondas triangulares, ou portadoras PWM. Quando utilizadas duas ou quatro portadoras, há a defasagem de fase entre elas igual a  $360^\circ/N$ , onde N é o numero de retificadores utilizados, no sistema proposto a defasagem foi de  $180^\circ$ .

## Sistema de controle

A figura 3 apresenta o diagrama de blocos para o sistema de controle dos retificadores. O objetivo do mesmo é controlar a tensão na carga e garantir um fator de potência unitário. Faz-se necessário também controlar a corrente de circulação  $i_{o12}$  de modo a reduzir os danos por ela causados.

Assim sendo, a tensão do barramento é ajustada com a sua referência pelo bloco Rc, um controlador Proporcional-Integral convencional. Este controlador fornece a amplitude das correntes de referência  $i_{1a}$  e  $i_{2a}$  que devem ser igual a  $I_g/2$ . De modo a controlar o fator de potência, os sinais de referência das correntes são sincronizados com a tensão de entrada através de um esquema PLL(Phase Locked Loop).

O controle das correntes se dá através dos blocos R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub>, controladores do tipo Proporcional – Integral modificados. Este modelo de controlados nos garante, para variáveis senoidais, erro zero, uma vez que apresenta ganho infinito na freqüência de corte  $\omega$ . A função que descreve o controlador PI modificado é:

$$G_{PI} = \frac{K_p s^2 + 2K_i s + K_p \omega^2}{s^2 + \omega^2}$$

A corrente de circulação é controlada através de um controlador Proporcional-Integral, indicado pelo bloco R<sub>o12</sub> e tem sua referência igual a zero.

O cálculo de  $v_x$  é realizado pelo bloco  $v_x$  e segue as equações PWM previamente mostradas (Ver seção anterior).

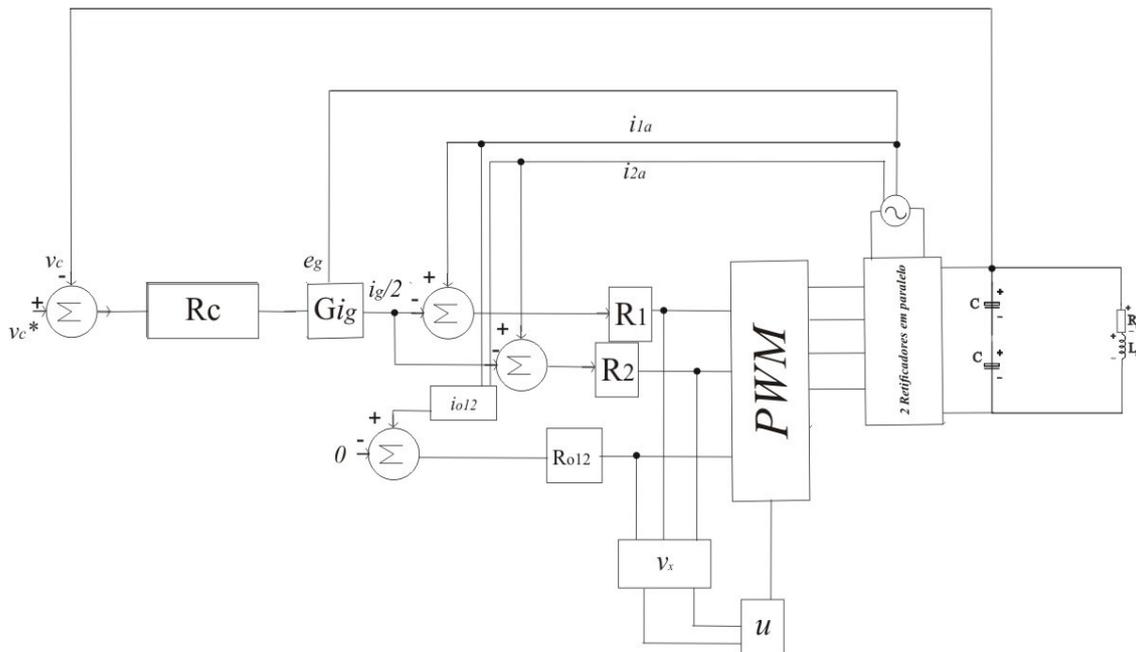


Figura 3: Esquema de controle para dois retificadores em paralelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos a partir dos dados mostrados na tabela 1.

Dados	Valor
Tensão da rede $E_g$	10 V
Impedância de filtro $z_1 = z_3$	$0.01 + j\omega 0.00005$
Impedância de filtro $z_2 = z_4$	$0.01 + j\omega 0.00005$
Carga	$10.00 + j\omega 0.0001$
Tensão barramento CC $v_c$	12 V
Freqüência de chaveamento $f_{ch}$	10kHz

Tabela 1: Dados dos retificadores

Comparou-se o modelo proposto com o convencional em três situações diferentes: utilizando-se uma portadora PWM, duas e quatro portadoras, sendo usado como fator de desempenho a taxa de distorção harmônica ponderada WTHD (do inglês *Weighted Total Harmonic Distortion*). A WTHD é um fator bastante relevante para a análise da poluição harmônica de uma tensão que usa cada componente harmônica como seu valor ponderado, sendo definido por:

$$WTHD(h) = \frac{100}{a_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{N_h} \left(\frac{a_h}{h}\right)^2}$$

Onde  $a_1$  é a amplitude da tensão fundamental,  $a_h$  é a amplitude da  $h^{th}$  componente harmônica e  $N_h$  é o número de harmônicas a ser considerado.

É mostrado na figura 4 a WTHD da tensão gerada pelos retificadores 1 e 2 ( $v_g = (v_1 + v_2)/2$ ) e para o modelo convencional ( $v_g = v_{10} - v_{20}$ ) em função do fator de distribuição de roda livre  $\mu$ .

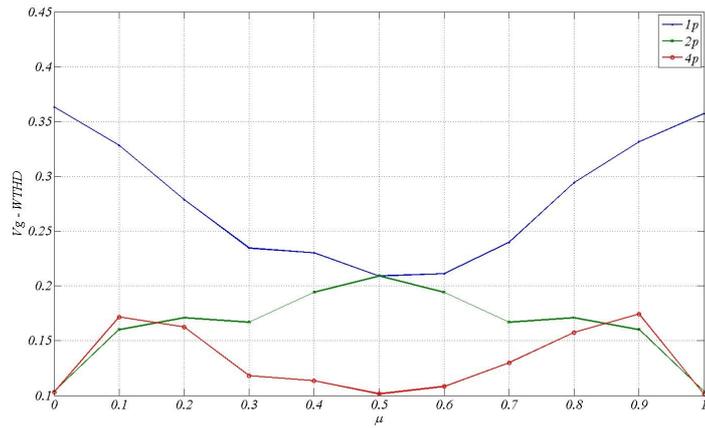


Figura 4: WTHD da tensão  $v_g(v_g = (v_1+v_2)/2)$  para o caso de dois retificadores e  $v_g = v_{10} - v_{20}$  para a configuração convencional

A partir da figura 4 é perceptível que o WTHD da configuração aqui proposta, quando utilizada apenas uma portadora PWM, é igual ao WTHD da configuração convencional para qualquer valor de  $\mu$ . Ao serem utilizadas duas portadoras, têm-se valores menores de WTHD, exceto para o caso de  $\mu = 0.5$  onde os valores são os mesmos para uma portadora (topologia convencional) e duas portadoras. Reduzem-se ainda mais os valores de WTHD quando quatro portadoras PWM são utilizadas.

Sabendo que WTHD está diretamente relacionado com a qualidade do sinal analisado, visualizou-se também as formas de onda da tensão de saída dos retificadores (tensão  $v_g$ ). A figura 5 a seguir apresenta as formas de onda para determinados valores de  $\mu$  em cada um dos casos trabalhados, excluindo-se a configuração convencional, tendo em vista que esta e a configuração proposta apresentam mesma forma de onda para o caso de uma portadora.

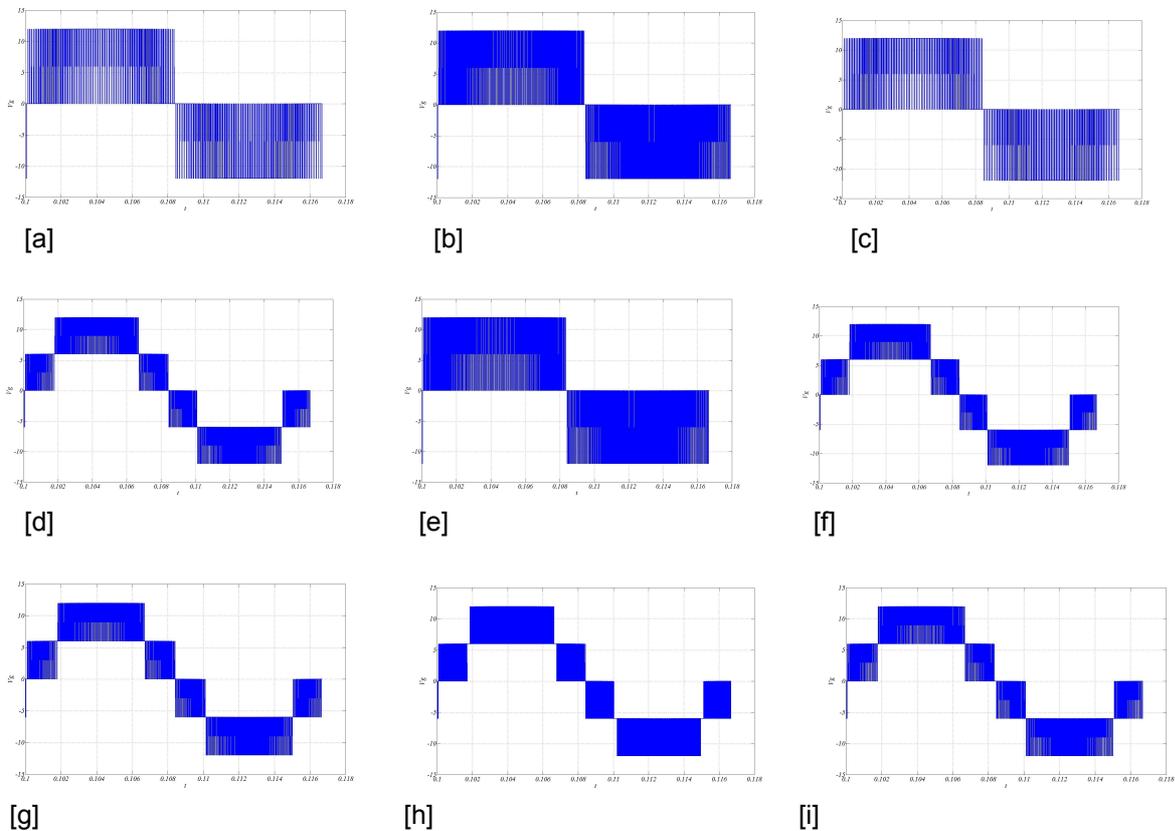


Figura 5: Tensão  $V_g$  (a) 1 Portadora,  $\mu = 0$  (b) 1 Portadora,  $\mu = 0.5$  (c) 1 Portadora,  $\mu = 1$ . (d) 2 Portadoras,  $\mu = 0$  . (e) 2 Portadoras,  $\mu = 0.5$  . (f) 2 Portadoras,  $\mu = 1$  . (g) 4 Portadoras,  $\mu = 0$  .(h) 4 Portadoras,  $\mu = 0.5$  . (i) 4 Portadoras,  $\mu = 1$  .

No tocante ao fator de potência, obtivemos nesta simulação, um fator de potência unitário. Garantindo que a tensão da rede  $e_g$  e a corrente  $i_g$  estão sincronizadas. Isto é possível ser observado na figura 6 a seguir, a qual apresenta as formas de onda da tensão  $e_g$  e da corrente  $i_g$ .

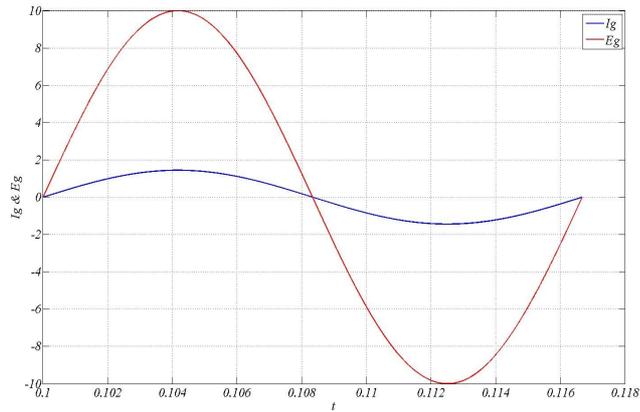
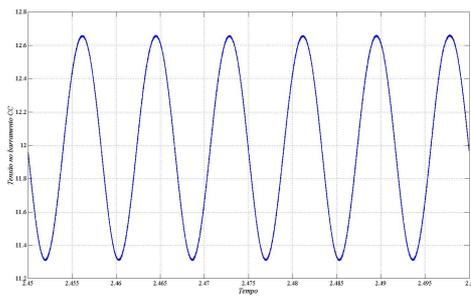
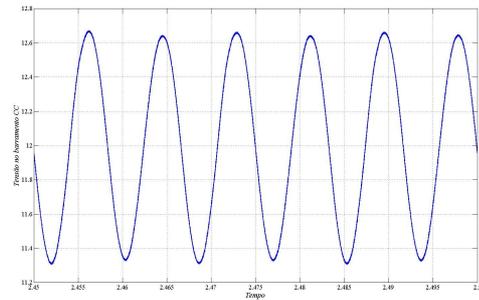


Figura 6: Tensão  $e_g$  e corrente  $i_g$  em fase apresentando fator de potência unitário.

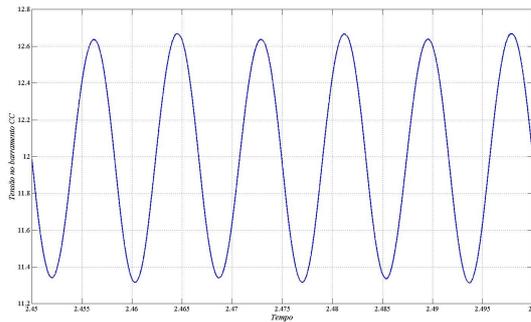
A figura 7 a seguir expõe a tensão no barramento CC para os casos de uma, duas ou quatro portadoras PWM. É possível perceber que a tensão está com um valor médio de 12V (tensão CC de referência) e com amplitude de 0.75V. Destaca-se também que, ao serem utilizadas quatro portadoras reduz-se o ripple presente na saída.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.: Tensão no barramento CC. (a) Uma portadora; (b) Duas portadoras; (c) Quatro portadoras

## CONCLUSÃO

Através do que foi aqui exposto conclui-se que ao fazer-se uso de topologias em paralelo, o sistema apresenta consideráveis melhorias em desempenho e eficiência, no que diz respeito ao número de harmônicos jogados na rede e potência perdida. Estas melhorias podem ainda ser amplificadas caso utilize-se um maior número de portadoras PWM para geração dos sinais de chaveamento.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CnPq pela bolsa de Iniciação Científica, ao Prof. Dr. Cursino Brandão Jacobina pela orientação e aos colegas de laboratório pelo auxílio.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BAUER, J.; **Single-Phase Pulse Width Modulated Rectifier**. Acta Polytechnica Vol. 48 No.3/2008.

TIWARI, A.N.; AGARWAL, P; SRIVASTAVA, S.P.; **Modified hysteresis controlled PWM rectifier**. IEEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 150, No. 4, Julho, 2003.

JACOBINA, C.B.; SANTOS, E.C.; ROCHA, N.; **Generalized AC-DC Single-Phase Boost Rectifier**. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE, Fevereiro, 2010.