

Aplicação de uma topologia de conversor monofásico-trifásico de baixo custo como filtro ativo paralelo em sistemas monofásicos

José Artur Alves Dias

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba

Email: arturad@cefetpb.edu.br

Euseli Cipriano dos Santos Jr

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba

Email: euzeli@cefetpb.edu.br

Nady Rocha

LEIAM – Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento de Máquinas (UFCG)

Email: nady@dee.ufcg.edu.br

Resumo: O objetivo deste artigo é apresentar uma nova abordagem de filtro paralelo para uma topologia de conversor monofásico trifásico de baixo custo. Tal topologia foi proposta a princípio para acionamento de motores trifásicos. O conversor é controlado para corrigir o fator de potência da carga e reduzir os harmônicos, melhorando assim a qualidade de energia no sistema monofásico. Entre os benefícios pode-se destacar aumento indireto da capacidade do sistema, liberando a capacidade dos condutores e transformadores; menores níveis de harmônicos de tensão no PCC (ponto de conexão comum), diminuindo os harmônicos de tensão para os consumidores. Apresentação, análise, simulação e resultados experimentais são mostrados no presente artigo.

Palavras chaves: Filtro Shunt (paralelo), Conversores Monofásicos-trifásicos, Conversores com estágio CC.

Abstract: The aim of this paper is to present a new approach of shunt-filter, for a low cost topology of single-phase to three-phase converter. Such converter was proposed at first for three-phase drivers. This converter is controlled to **correct the load** power factor and to reduce the harmonic currents, thus, improving the **energy** quality in the single-phase system. Among the benefits, it can be pointed out the indirect increase of the system capacity, releasing the conductors and transformers capacity; lower levels of tension harmonics in PCC (point of common connection) decreasing the tension harmonics for the consumers. Presentation, analysis, simulation and experimental results are showed in the present paper.

Key-words: Shunt-filters, single-phase to three-phase converters, CC Link converters

1- Introdução

Os sistemas de produção rural vêm ganhando cada vez mais atenção pelos resultados econômicos no Brasil. Um dos entraves destes bons resultados é a eletrificação rural. É conhecido que investimentos iniciais em eletrificação rural são até 400% maiores que em sistemas urbanos. O elemento que leva a este alto investimento inicial é uma baixa densidade populacional, por volta de 2,5 consumidores por quilômetros, apresentando retornos de capital menor (CAMPANA, 2000). Este cenário faz nascer uma série de alternativas econômicas de distribuição de energia elétrica no meio rural, como é o caso das distribuições bifásicas e monofásicas. Dentre as distribuições monofásicas, destacam-se a fase-neutro (utilizada muito nos Estados Unidos e em algumas concessionárias do Brasil), e a MRT – Monofásico com retorno pelo solo, desenvolvido na Nova Zelândia por volta de 1940 pelo engenheiro Zelayo Mandeno e praticado pela Austrália, Rússia, e por algumas concessionárias no Brasil (CEPEL RER 05). Toda via existe uma necessidade de utilização de cargas trifásicas já que em médias e altas potências estas são mais viáveis que as cargas monofásicas. O preço do motor de indução trifásico chega a ser 70% menor que o monofásico, por volta de 5 kW, além de menores custos de manutenção, trepidações e ruídos. Um exemplo clássico deste problema é que sistemas de irrigação por pivô central tornam-se mais atrativos economicamente para potências maiores de 9kW, o que aponta para utilização de motores trifásicos. Alimentar cargas trifásicas a partir de fonte monofásicas é um problema antigo. Muitas propostas de solução deste problema foram publicadas ao longo dos anos. Propostas baseadas em associação de capacitores, caso da ligação Steimetz (CHAN, 2000), propostas baseadas em associações de aparatos ferromagnéticos e propostas baseadas em conversores estáticos. As propostas baseadas em conversores estáticos e especificamente com estágio CC apresentam as seguintes vantagens:

* O controle de harmônico e fator de potência na entrada monofásico. (OLSEN, 1991), (ENJETI, 1993).

* Menores perdas, pois não possuem estruturas ferromagnéticas. Apresentam um rendimento típico por volta de 95%, utilizando chaves IGBTs modernas.

* Otimizações utilizando técnicas de distribuição da roda livre. (VALLE, 1991), (BLASKO, 1997), (ZHOU, 2002), (JACOBINA, 2005).

* Fluxo de potência bidirecional permitindo o aproveitamento reversivo de paradas de motores bem como a integração da geração trifásica aos sistemas monofásicos.

* Controle do fluxo conjugado de motores de indução. (BLASCHKE, 1972), (LEONHARD, 1997), (JACOBINA, 2005).

Muitas destas propostas de configurações desenvolvidas para acionamento de motores, ao longo dos anos,

podem ser utilizadas como filtro ativo, universal ou híbrido, melhorando a qualidade de energia nos sistemas monofásicos a um custo baixo. Este artigo traz um estudo de uma configuração de conversor monofásico trifásico de baixo custo que pode ser utilizada com filtro ativo paralelo puro ou híbrido. Apresentação, análise, simulação e resultados experimentais são mostrados neste trabalho.

Nomenclatura

E	= Tensão do barramento CC (Volts)
e_g	= Tensão RMS da fonte monofásica (Volts)
v_{ij}	= Tensão RMS fundamental de pólo do braço j (Volts)
i_{kj}	= Corrente RMS fundamental do braço j (Amperes)
i_g	= Corrente RMS da fonte monofásica (Amperes)
r_f	= Resistência elétrica do indutor (Ohms)
x_f	= Reatância indutiva do indutor (Ohms)
kp	= Ganho proporcional dos controladores PI
ki	= Ganho integral dos controladores PI

2 – Configuração monofásica-trifásica de baixo custo para filtro ativo

A configuração abordada neste artigo, vista na Fig. 1, foi originalmente proposta em ENJETI, 1993. Possui três braços de IGBT, um capacitor no barramento CC, apesar da figura mostrar dois para fins didáticos. Dois indutores boosters ligam os braços 1 e 2 à linha monofásica e o braço 3 liga a fase 1 da carga trifásica. Esta configuração de conversor monofásico-trifásico possui características técnicas muito boas, por ligar uma tensão de linha da carga diretamente na fonte monofásica e possuir um retificador em ponte completa na entrada. Possui somente três braços de IGBTs, sendo possível empregar módulos integrados de três braços que possuem preços menores que componentes separados, além da utilização de somente um capacitor. Tudo isso a faz muito atrativa técnica e economicamente. No entanto, a Fig. 1 mostra que esta configuração é destinada a casos em que a carga funciona na mesma frequência da rede monofásica, além de possuir a tensão de linha igual a da tensão monofásica da rede. No caso do Nordeste do Brasil, onde a tensão monofásica é de 220V, a tensão de linha nominal da carga deve ser 220V. Isso restringe sua aplicação a casos em que não é necessário o controle da tensão e frequência na carga.

A configuração, quando explorada como filtro ativo paralelo, pode melhorar a qualidade da corrente da fonte monofásica, corrigindo o fator de potência e compensando os harmônicos provenientes da carga trifásica, além de criação de um sistema trifásico a três fios. Filtros paralelos trifásicos ou monofásicos são muito abundantes na literatura técnica (AKAGI, 2005), (AL-ZAMIL, 2000), (HABROUK, 2000). No entanto, não há evidências de configurações monofásico-trifásico de baixo custo sendo

abordadas como filtro. O objetivo deste trabalho é mostrar a análise, simulação e resultados experimentais que validam a proposta de se utilizar a configuração da Fig. 1 como filtro ativo puro ou híbrido.

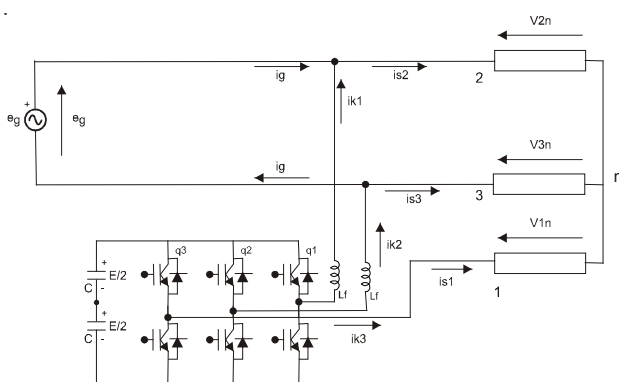


Figura 1 – Configuração proposta de filtro paralelo para acionamento de motores trifásicos a partir de fontes monofásicas.

3- Análise em Regime Permanente

Os níveis mínimos de tensão normalizados que relacionam E (tensão do barramento CC) e e_g (tensão RMS do grid) são vistos em (1).

$$\frac{E}{e_g} \geq \sqrt{2} = 1,4142 \quad (1)$$

Por não necessitar da utilização do ponto central dos capacitores, esta configuração necessita de tensão de barramento CC baixa comparando com outras configurações de conversores monofásicos-trifásicos. Isso contribui para diminuir o investimento inicial em chaves também como nas perdas por chaveamento.

O modelo do sistema em regime permanente pode ser visto na Fig. 2. Os braços são aproximados por fontes de tensão em corrente alternada. O fluxo de potência ativa líquida pelos braços do conversor é nulo, quando o barramento alcançou a referência de tensão.

Para todos os valores em pu neste trabalho são utilizadas as seguintes bases:

$$P_{base} = \text{Potência monofásica da carga}$$

$$V_{base} = \text{Tensão monofásica da carga}$$

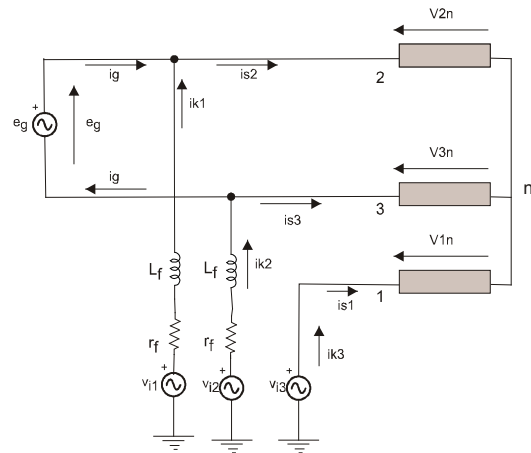


Figura 2 – Modelagem do sistema em regime permanente. O modelo em regime permanente visto na Fig. 2 gera o sistema de equações de (2) a (6), se o controle impor o fator de potência unitário na fonte monofásica. As correntes e tensões dos braços são as incógnitas que podem ser obtidas de forma iterativa. As correntes e tensões de pólo em função do fator de potência da carga podem ser vistas nas Fig. 3 e 4.

$$v_{i1} - v_{v2} - (r_f + x_f j)(i_k - i_R) - e_g = 0 \quad (2)$$

$$v_{v2} - v_B - (r_f + x_f j)i_R - v_{s31} = 0 \quad (3)$$

$$i_B = i_d \quad (4)$$

$$i_k + i_R + i_B = 0 \quad (5)$$

$$P_{carga} + Q_{carga} = e_g i_g^* + v_B i_B^* + v_{v2} i_{v2}^* + v_{v1} i_{v1}^* \quad (6)$$

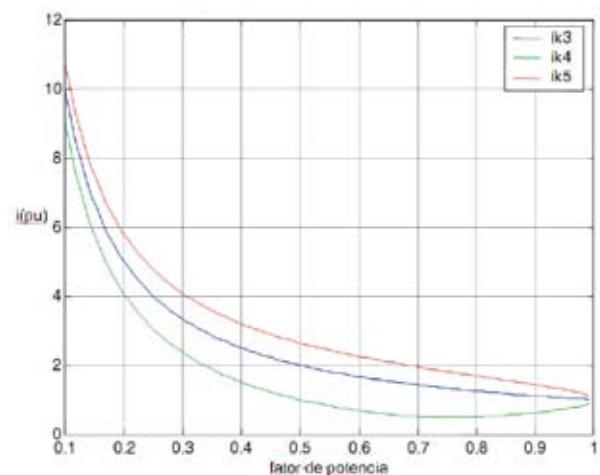


Figura 3 – Corrente dos braços(em pu) em função do fator de potência da carga.

Os gráficos contidos nas Figs. 3 e 4 podem ser utilizados para dimensionamento das chaves e capacitor do barramento CC. Em casos de cargas com baixo fator de potência, bancos de capacitores podem ser empregados em conjunto com a carga no intuito de diminuir

as correntes dos braços, diminuindo, assim, o investimento em chaves. Neste caso o filtro funcionaria como um ajuste fino dos reativos da carga, um filtro híbrido.

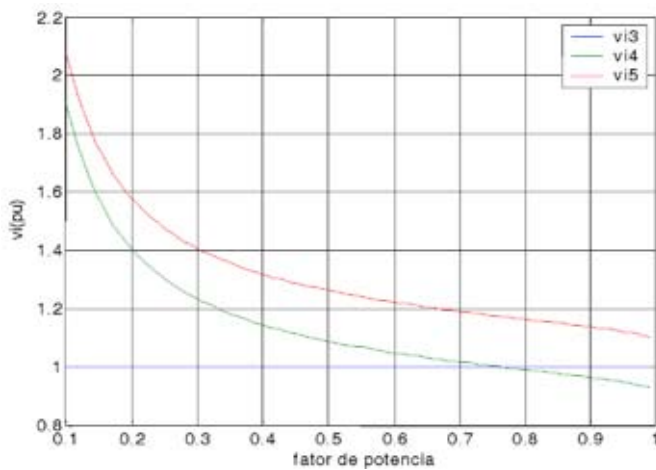
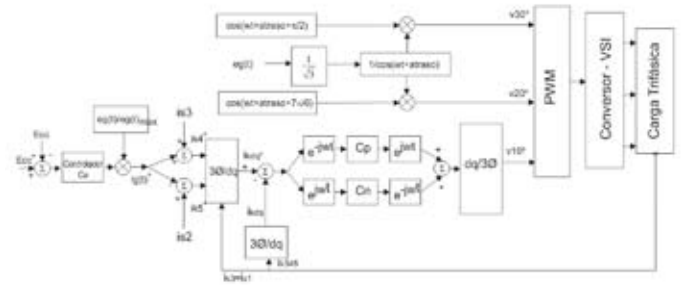


Figura 4 – Tensões de pólo dos braços (em pu) em função do fator de potência da carga

4- Controle do conversor

O controle do conversor, visto na Fig. 5, se baseia num controle de corrente trifásico desbalanceado (JACOBINA, 2001). A tensão de referência do barramento CC é imposta e comparada com a leitura da mesma vinda do conversor. O erro é utilizado para calcular o módulo da corrente monofásica através de um controlador PI. Tal módulo é sincronizado com a tensão monofásica, resultando a corrente monofásica de referência. Com a corrente monofásica de referência são calculadas as correntes desequilibradas de referências dos braços. Tais correntes de referências são transformadas para vetores dq no referencial estático e calculados os erros dq. Duas transformações lineares de referencial levam os erros para o referencial síncrono de seqüência positiva e para o referencial síncrono de seqüência negativa. Os controladores PI são aplicados e os resultados são somados e transformados de volta para a referência dq estática. Por fim, as tensões dq de referência de pólo são transformadas para trifásico e aplicadas no PWM somente a componente v₁₀. Observa-se que o controle utilizou informações trifásicas, emulando um sistema trifásico, para um controle monofásico. Um controle mais simplificado, derivado deste, para controle monofásico, que dispensa as informações trifásicas, é encontrado em JACOBINA, 2001. A tensão de referência dos braços v₂₀ e v₃₀ é imposta em malha aberta no sentido de sintetizar a tensão trifásica. As três tensões de referências são aplicadas num gerador de tempos de disparos dos IGBTs, e aplicados nos braços de IGTBS.

A saída do conversor é aplicada na carga trifásica. O PLL que gera a tensão da fonte é sintetizado por detecção de cruzamento de zero.



5- Simulação no domínio do tempo

O controle foi simulado no software *MATLAB* em linguagem script com os seguintes dados:

Modelo de Chave: ideal

Carga:

P(trifásico)= 300 W, Fator de potência = 0,60

Indutores :

$L_f=8,8$ mH, $r_f=0,1$ Ohm

$E(\text{ref})=200\text{V}$

$e_g(\text{rms}) = 100\text{V}$

Frequência do PWM = 3,2 KHz

Ganhos do controle de tensão do barramento

$k_p=0,1$, $k_i=10$

Ganhos do controle de corrente

$k_p=30$, $k_i=30$

Os resultados da simulação podem ser vistos nas Figs. 6 e 7. A Fig. 6(a) contém as tensões trifásicas v₂₃ e v₃₁ mostrando o equilíbrio das tensões na carga. A tensão e corrente da fonte monofásica são mostrados na Fig. 6(b), a tensão do barramento CC e o espectro de frequência da corrente da fonte monofásica, nas Figs. 7(a) e 7(b) respectivamente.

Na simulação, o controle equilibrou as tensões trifásicas, controlou a tensão do barramento CC e impôs uma corrente com fator de potência unitário. Observa-se a presença insignificante de harmônicos na corrente da fonte monofásica, com w_{dth} de 0,0079.

6- Resultados Experimentais

Prática Experimental 1 – Carga Linear

Os experimentos foram realizados numa plataforma com três braços de IGBT controladas via computador por linguagem C. Os mesmos dados da simulação foram implementados a menos a frequência do PWM que passou a ser 10 KHz e os seguintes ganhos:

P(trifásico)= 180 W, Fator de potência = 0,70

Ganhos do controle de tensão do barramento

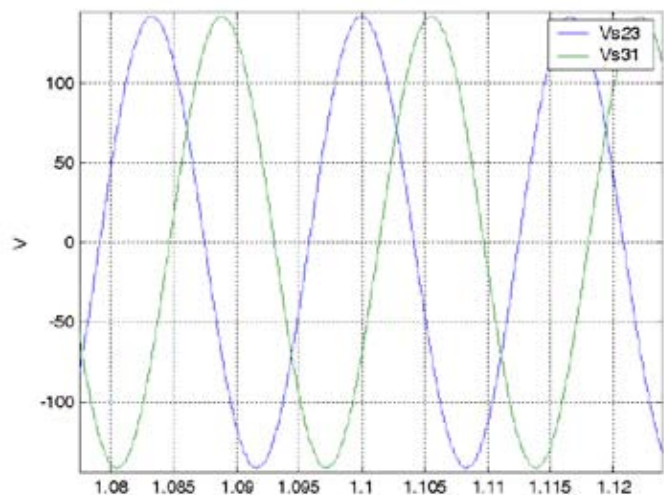
$k_p=0,001$, $k_i=1$

Ganhos do controle de corrente

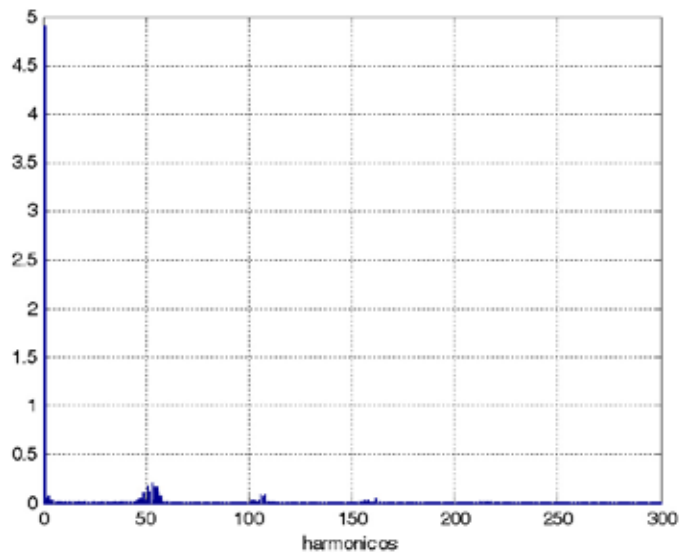
$k_p=20$, $k_i=20$

Os resultados da prática experimental 1 podem ser

vistos na Fig. 8. Foi observado que o controle compensou os reativos da carga, como é visto na Fig. 8(a), controlou bem a tensão do barramento CC, visto na Fig. 8(b) e impôs tensões com equilíbrio aceitável e de seqüência positiva na carga, vistas na Fig.8(c), mesmo com controle em malha aberta de tensão na carga.

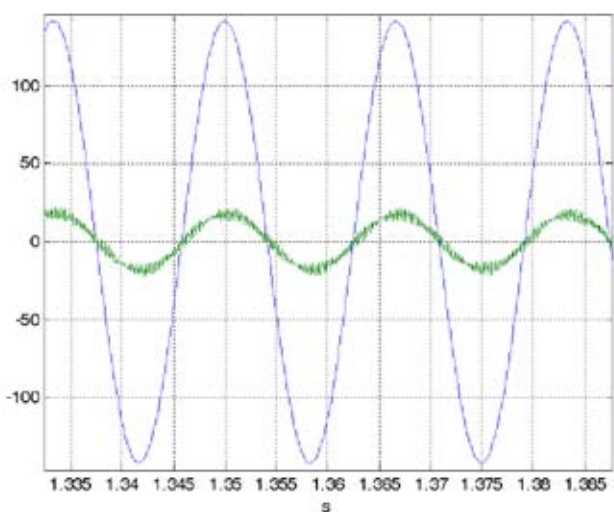


(a)

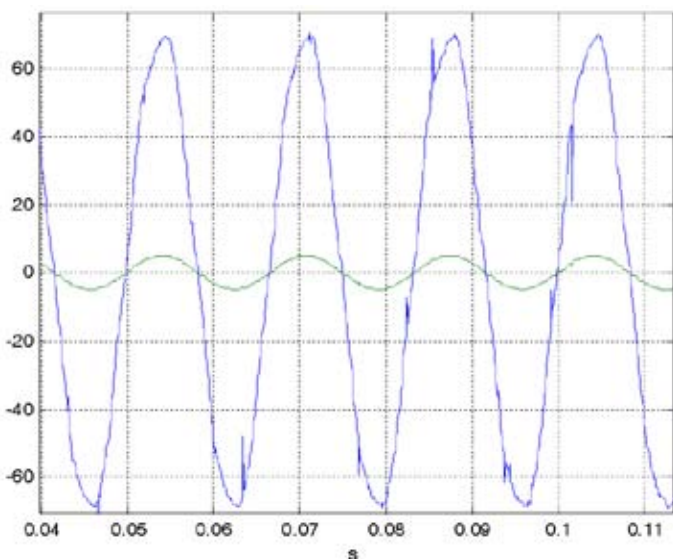


(b)

Figura 7 –(a)- Tensão do barramento CC e (b)- Espectro de freqüência (múltiplas de 60Hz) da amplitude da corrente monofásica.

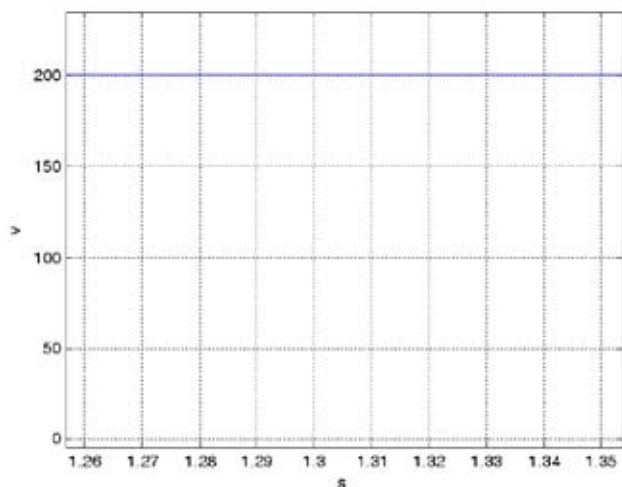


(b)

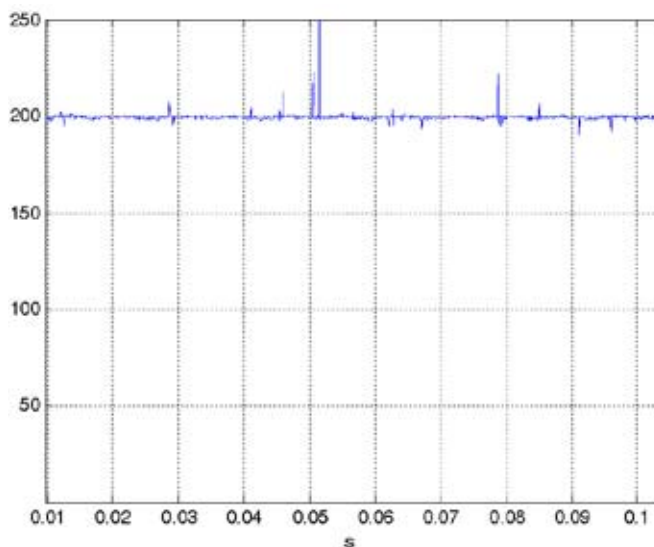


(a)

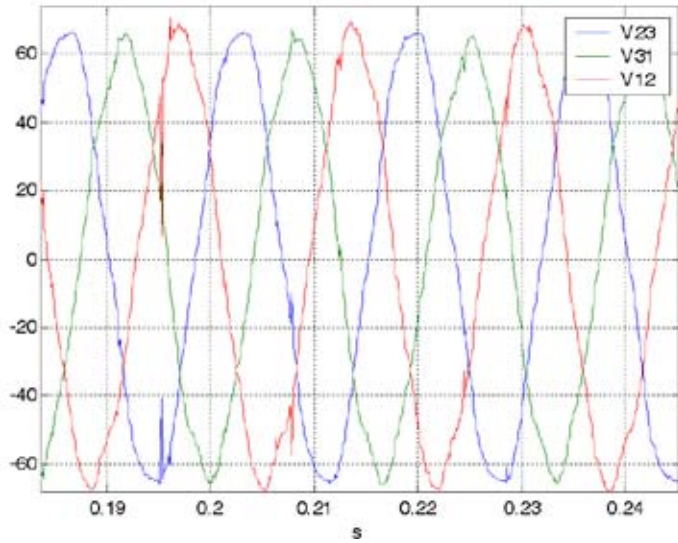
Figura 6 –(a)- Tensões de linha vs23 e vs31, (b)- Tensão e corrente monofásica multiplicada pelo



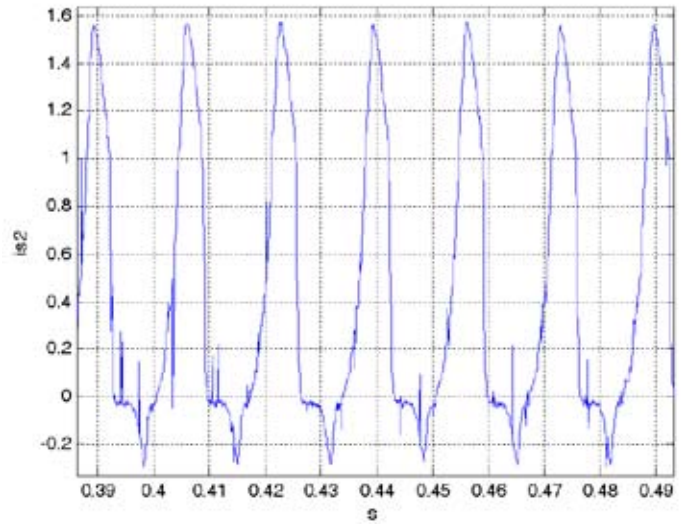
(a)



(b)



(c)



(b)

Figura 8 – (a)- Tensão e corrente da fonte monofásica, (b) – Tensão do barramento CC e (c)- Tensões de linha na carga.

Prática Experimental 2 – Carga Não Linear

Uma carga não linear trifásica foi alimentada pela configuração. A carga constou de um retificador em ponte completa de diodos alimentando uma carga resistiva de 180 W na saída CC. Frequência do PWM de 10Khz.

$E_{ref} = 100V$

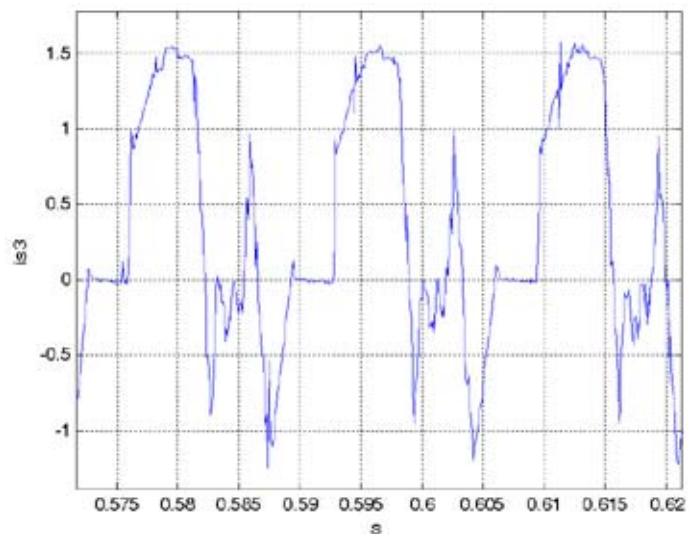
$e_g(rms) = 50V$ Ganhos do controle de tensão do barramento

$k_p = 0,001, k_i = 1$

Ganhos do controle de corrente

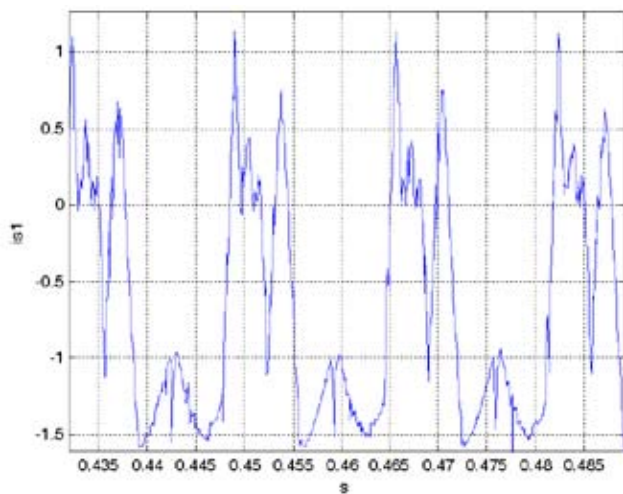
$k_p = 30, k_i = 30$

Os resultados da prática experimental 2 podem ser vistos nas Fig. 9, 10 e 11. Observa-se que o sistema conseguiu compensar os harmônicos contidos nas correntes trifásicas mostradas na Fig. 9. Na Fig. 10(a) a corrente monofásica, além de fator de potência unitário, possui um nível insignificante de harmônicos. O sistema controlou satisfatoriamente a tensão do barramento, vista na Fig. 10(b).

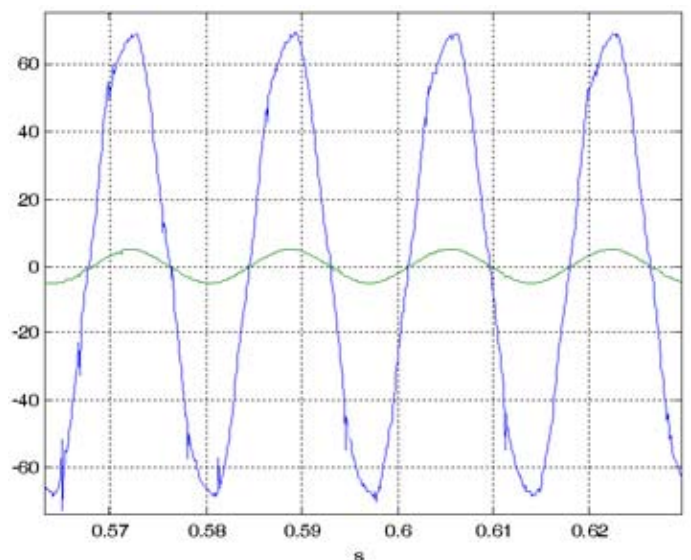


(c)

Figura 9 – (a)- Corrente da fase 1, (b)- Corrente da fase 2 e (c)- Corrente da fase 3.



(a)



(a)

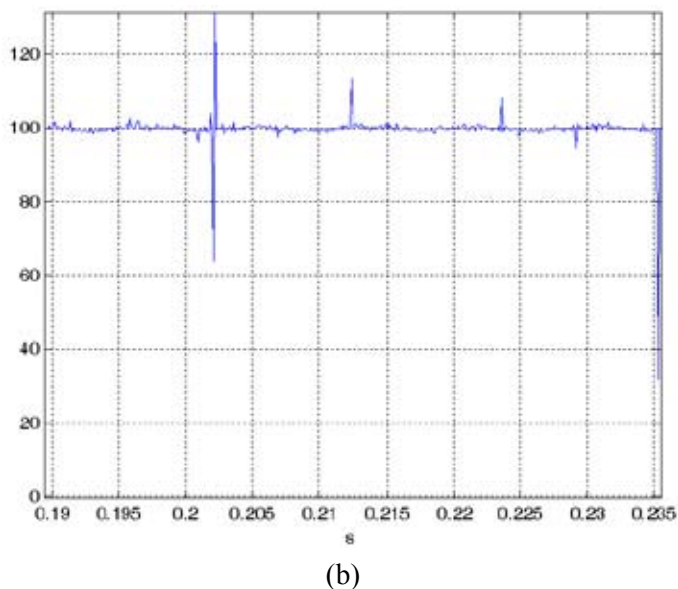
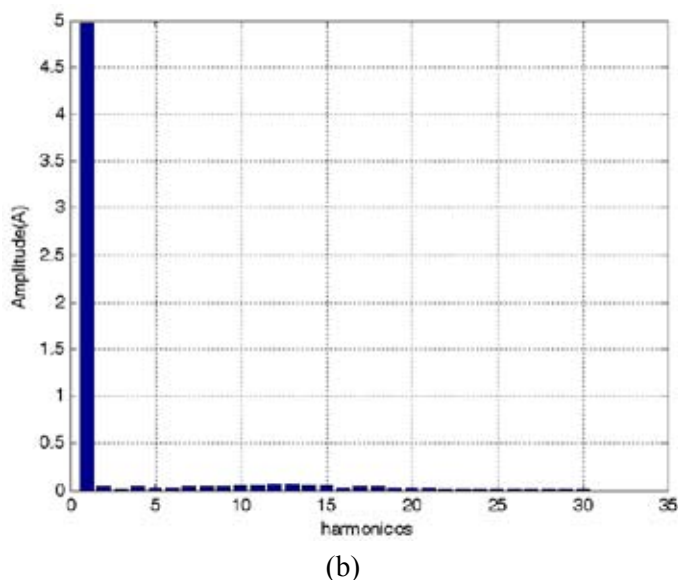
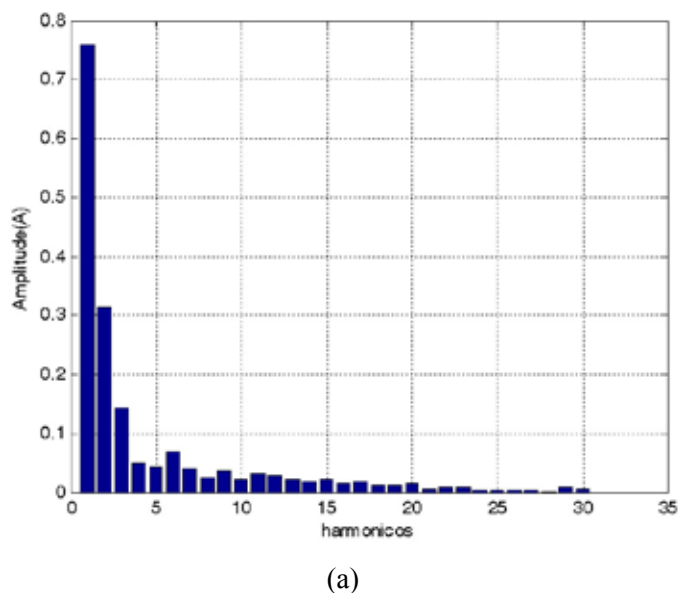


Figura 10 – (a) corrente e tensão da fonte monofásica e (b) Tensão do barramento CC



Na Fig. 11 observa-se o espectro de frequência das corrente da fase 2 da carga e da fonte monofásica. A redução de THD mostra a qualidade alta da corrente da fonte monofásica apesar do alto grau de distorção na carga.

7- Conclusão

O trabalho mostrou que a configuração de conversor monofásico trifásico proposta em 1993 pode ser utilizada como filtro ativo puro ou híbrido com bancos de capacitores, para alimentação de cargas trifásicas a partir de fonte monofásicas. A qualidade da corrente da fonte monofásica foi atestada por simulação e por prática experimental tanto para uma carga linear quanto para uma carga não linear, mesmo utilizando um PLL grosseiro por detecção de cruzamento de zero. Outro aspecto importante a ressaltar é que a configuração possui três braços de IGBTs. Módulos integrados de três braços são vendidos a um preço bem menor que três módulos de um braço. Além do mais a configuração necessita de somente um capacitor no barramento CC. Assim, tal configuração, abordada neste artigo, além de possuir características técnicas atrativas contribuindo para melhoria da qualidade de energia no sistema monofásico, apresenta investimento inicial também atrativo, em relação às demais configurações.

8- Referências

- AKAGI, HIROFUMI. Active Harmonics filters. **Proceeding of the IEEE**, V. 93, n. 12, p. 2128-2141, 2005.
- AL-ZAMIL, ADIL M., DAVID A. T. Harmonics compensation for three phase adjustable speed drives using power line conditioner. **IEEE – Power Engineering Society Summer Meeting 2000**, , V. 2, p867-872, jul. 2000.
- CAMPANA, S. OLIVEIRA FILHO D., SOARES A. A. Inversores de frequência – Uma alternativa racional ao uso de energia elétrica em sistemas de irrigação de pivô central. **Energia Meio Rural**, n. 3, 2000.
- BLASCHKE, F. The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed loop control system for rotating field machines. **SIEMENS Review**, p. 217, 1972.
- BLASKO, VLADIMIR. Analysis of a hibrid PWM based on modified space-vector and triangle- comparison methods. **IEEE-Transactions on industry application**, v. 33, n. 3, p. 756-764, mai/jun. 1997
- ENJETI, PRASAD N., ASHEK RAHMAN AND RANJIT JAKKLI. Economic single-phase to three-phase converter topology for fixed and variable frequency output. **IEEE-Transactions on power electronics**, v. 8, n.3, p. 329-335, jul. 1993.
- HABROUK, M. EI. M. K. DARWISH, P. METHA. Active Power Filters : A review. **IEE – Proceedings of Electric power Application**, V. 147, N. 5, p. 403-413, 2000.
- JACOBINA, C., MAURICIO B. R. C., TALVANES M., ANTONIO

M. N. L., EDISON R. C. S. Current control of unbalanced electrical systems. **IEEE- Transaction on Industrial Electronics**, V. 48, n. 03, p. 517-525, 2001.

JACOBINA, CURSINO B. **Sistema de acionamento estático de máquinas elétricas**. Apostila, UFCG, 2005.

LEONHARD, WERNER. **Control of electrical drives**, 2 ed., Spring-Verlag, New York, 1996. 420 p.

OLSEN, STUART. Solid state single-phase to three-phase converter. **IEEE- Western Canada conference on Computer, Power and Communication Systems-91**, v.-, p. 29-30, mai 1991.

VALLE, DEL J. AND J. RODRIGUES E G. CONTRERAS T. Técnicas de modulación vectorial em inversores trifásicos. **Brasilian power electronics conference**, SOBRAEP/UFSC, 1991.

ZHOU, KELIANG AND DANWEI WANG. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM : A comprehensive analysis. **IEEE- Transactions on Industry electronics**, v. 49, p. 186-196, fev. 2002.

Norma para seleção de sistemas MRT (RER – 05) CEPEL – Centro brasileiro de pesquisa em energia elétrica , ELETROBRAS- Centrais brasileiras SA.

Responsabilidade de autoria

As informações contidas neste artigo são de inteira responsabilidade de seus autores. As opiniões nele emitidas não representam, necessariamente, pontos de vista da instituição e/ou do Conselho Editorial.