



PIBIT/CNPq/UFCCG-2013



## SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA USANDO CONVERSORES ESTÁTICOS INTERCONECTADOS EM SÉRIE

Phelipe Leal Serafim Rodrigues<sup>1</sup>, Cursino Brandão Jacobina<sup>2</sup>

### RESUMO

Para que tenhamos uma energia elétrica de qualidade nos sistemas elétricos de potência é necessária a filtragem da potência reativa e dos harmônicos presentes no sistema. Comumente são utilizados os chamados filtros passivos, compostos de indutores e capacitores, para se realizar esta filtragem. Porém esta prática pode fazer surgir uma ressonância entre os elementos passivos do filtro e as impedâncias próprias do sistema. Isso acaba fazendo com que os filtros ativos sejam uma melhor escolha. Este filtro compensa a parcela reativa além dos harmônicos de corrente devido a cargas com características não-lineares, diminuindo o fornecimento pela fonte de alimentação. O filtro ativo de potência (FAP) é composto por conversores estáticos de potência que são utilizados na conversão de energia elétrica em diversas aplicações. Ao utilizarmos conversores estáticos baseado na interconexão em série de conversores fonte de tensão monofásicos e trifásicos em sistemas de compensação, obtemos sistemas com um melhor desempenho dinâmico e de regime, ou seja, com baixa distorção harmônica (THD) além de frequência de chaveamento e perdas reduzidas. Os filtros ativos de potência podem ser paralelo, série ou universal. O filtro ativo série compensa os harmônicos de tensão que surgem na fonte de alimentação, o filtro ativo paralelo compensa a parcela reativa além dos harmônicos da corrente devido a cargas não-lineares, e o filtro universal (filtros ativos série e paralelo) compensa a tensão gerada pela fonte de alimentação e a que é solicitada pela carga. Neste projeto foi desenvolvido e analisado um sistema de compensação ativa de potência fazendo uso de conversores estáticos interconectados em série e o filtro ativo conectado em paralelo com o sistema para compensação de reativos e de harmônicos de corrente.

**Palavras-chave:** Filtros Ativos de Potência; Conversores Estáticos; PWM; Controle; Distorção Harmônica, Potência Reativa

### ABSTRACT

In order to have power quality in electric power systems, it is necessary to filter the harmonics and reactive power in the system. Commonly used are the so-called passive filters, made of inductors and capacitors, to perform this filtering. But this practice may give rise to a resonance between the passive elements of the filter and the impedances own system. This ends up making the active filters are a better choice. This filter compensates the reactive portion beyond the harmonic current loads due to the nonlinear characteristics by decreasing the supply from the power supply. The active power filter (FAP) is composed of static power converters that are used in the conversion of electrical energy in various applications. By using static converters based on interconnection of series voltage source converters for single phase and three phase systems, we obtain systems with improved performance and dynamic regime, in other words, with low harmonic distortion (THD) plus switching frequency and loss reduced. The active power filters can be parallel, serial or universal. The series active filter compensates voltage harmonics appearing in the power supply, the shunt active filter compensates the reactive portion beyond the current harmonics due to nonlinear loads and the universal filter (series active filters and parallel active filters) compensates the voltage generated by the power supply and that is required by the load. This paper presents and analyze a parallel active power compensator for reactive and harmonic compensation by making use of series interconnected static converters.

**Keywords:** Active Power Filters, Static Converters, PWM, Control, Harmonic Distortion, Reactive Power

### INTRODUÇÃO

Hoje cada vez mais se busca uma energia de qualidade. Devido ao aumento de cargas não-lineares no sistema elétrico tais como lâmpadas fluorescentes, fontes chaveadas entre outros, os harmônicos na rede aumentaram nos

<sup>1</sup>Estudante do Curso de Engenharia Elétrica, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFCCG, Campina Grande, PB, e-mail: phelipe.rodrigues@ee.ufccg.edu.br

<sup>2</sup>Engenharia Elétrica, Professor. Doutor, Departamento de Engenharia Elétrica, UFCCG, Campina Grande, PB, e-mail: jacobina@dee.ufccg.edu.br

últimos anos. Para termos uma energia elétrica de qualidade nos sistemas elétricos de potência necessitamos filtrar a potência reativa além de reduzir os harmônicos presentes no sistema elétrico. Para isso são utilizados filtros passivos, porém, por serem compostos por indutores e capacitores, para se realizar a filtragem, surgiu uma ressonância entre os elementos passivos do filtro e as impedâncias próprias do sistema [1]. Devido a isto, os filtros ativos ou híbridos estão sendo escolhidos para desempenhar este papel. O filtro ativo de potência compensa a parcela reativa além dos harmônicos de corrente devido a cargas com características não-lineares, isto acarreta em uma diminuição do fornecimento pela fonte de alimentação.

O filtro ativo de potência (FAP) é composto por conversores estáticos de potência que são utilizados na conversão de energia elétrica em diversas aplicações. Devido à simplicidade de controle proporcionada pelo desacoplamento introduzido pelo barramento, os conversores com barramento CC são os mais utilizados. Para melhorarmos o desempenho dos sistemas de filtragem de potência devemos escolher uma topologia adequada destes conversores. Ao utilizarmos conversores estáticos baseado na interconexão em série de conversores fonte de tensão monofásica e trifásica em sistemas de compensação, obtemos sistemas com um melhor desempenho dinâmico e de regime, ou seja, com baixa distorção harmônica (THD) além de frequência de chaveamento e perdas reduzidas.

Podemos conectar os conversores para obtermos um maior número de componentes. Temos as conexões em série, paralela e de múltiplos níveis. A conexão em série leva a uma redução da tensão processada por cada interruptor, com ela obtemos uma melhoria das tensões geradas pelos conversores.

Os filtros ativos de potência podem ser paralelos, série ou universal. O filtro ativo conectado em série [2] compensa os harmônicos de tensão que surgem na fonte de alimentação, o filtro ativo conectado em paralelo [3] compensa a parcela reativa além dos harmônicos da corrente devido a cargas não-lineares e o filtro universal compensa a tensão gerada pela fonte de alimentação e a que é solicitada pela carga.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de compensação ativa de potência fazendo uso de conversores estáticos interconectados em série e o filtro ativo conectado em paralelo com o sistema para compensação de reativos e de harmônicos de corrente. Este circuito pode ser visto na Figura 1.

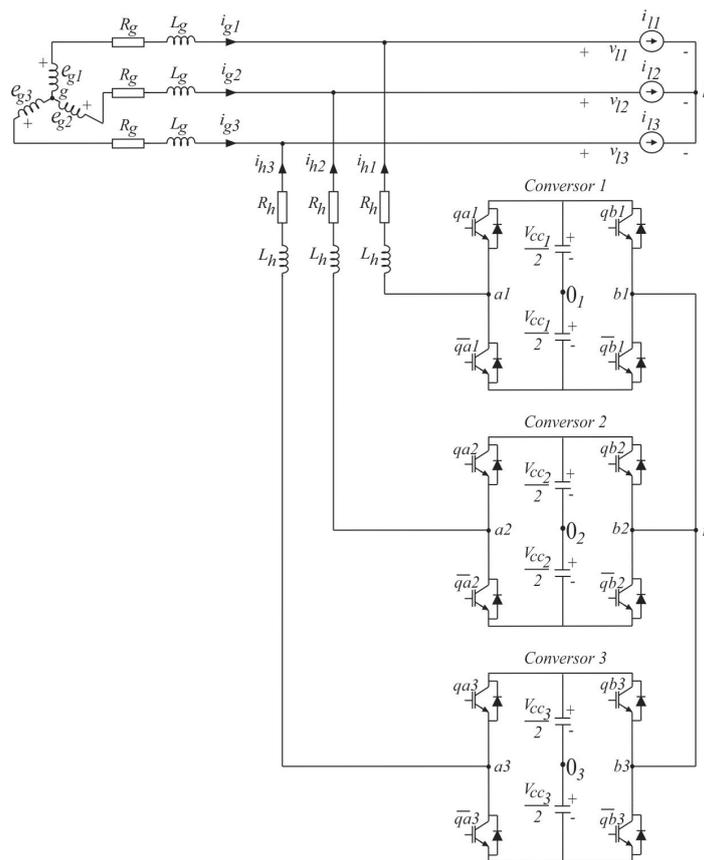


Figura 1: Filtro Ativo de Potência conectado em paralelo com o sistema

## MATERIAL E MÉTODOS

### Material e métodos

Para a simulação do sistema abordado neste trabalho foi utilizado o ambiente MatLab@. Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), do Departamento de



$$v_{g2} - R_g i_{g2} - L_g \frac{di_{g2}}{dt} + R_h i_{h2} + L_h \frac{di_{h2}}{dt} - v_{h2} + v_{no} = 0 \quad (7)$$

$$v_{g3} - R_g i_{g3} - L_g \frac{di_{g3}}{dt} + R_h i_{h3} + L_h \frac{di_{h3}}{dt} - v_{h3} + v_{no} = 0 \quad (8)$$

$$v_{g1} - R_g i_{g1} - L_g \frac{di_{g1}}{dt} - R_l i_{l1} - L_l \frac{di_{l1}}{dt} + R_l i_{l2} + L_l \frac{di_{l2}}{dt} + R_g i_{g2} + L_g \frac{di_{g2}}{dt} - v_{g2} = 0 \quad (9)$$

$$v_{g1} - R_g i_{g1} - L_g \frac{di_{g1}}{dt} - R_l i_{l1} - L_l \frac{di_{l1}}{dt} + R_l i_{l3} + L_l \frac{di_{l3}}{dt} + R_g i_{g3} + L_g \frac{di_{g3}}{dt} - v_{g3} = 0 \quad (10)$$

$$v_{g2} - R_g i_{g2} - L_g \frac{di_{g2}}{dt} - R_l i_{l2} - L_l \frac{di_{l2}}{dt} + R_l i_{l3} + L_l \frac{di_{l3}}{dt} + R_g i_{g3} + L_g \frac{di_{g3}}{dt} - v_{g3} = 0 \quad (11)$$

Da equação (6) a equação (11) e um pouco de manipulação algébrica obtemos o modelo do sistema que pode ser visto na equação (12):

$$\bar{L} \frac{d\bar{I}}{dt} = \bar{R}\bar{I} + \bar{K}\bar{V} \quad (12)$$

onde

$$\bar{L} = \begin{bmatrix} -L_g & 0 & 0 & L_h & 0 \\ 0 & -L_g & 0 & 0 & L_h \\ -L_h & -L_h & -L_g - L_h & -L_h & -L_h \\ -L_g - L_l & L_g + L_l & 0 & -L_l & L_l \\ -L_g - 2L_l & -L_l & L_g & -2L_l & -L_l \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} R_g & 0 & 0 & -R_h & 0 \\ 0 & R_g & 0 & 0 & -R_h \\ R_h & R_h & R_g + R_h & R_h & R_h \\ R_g + R_l & -R_g - R_l & 0 & R_l & -R_l \\ R_g + 2R_l & R_l & -R_g & 2R_l & R_l \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\bar{I} = \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \\ i_{h1} \\ i_{h2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} v_{g1} \\ v_{g2} \\ v_{g3} \\ v_{h1} \\ v_{h2} \\ v_{h3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

### Estratégia PWM

Precisamos calcular seis tensões de pólo. Para isso devemos definir quatro variáveis auxiliares  $v_{gn0}^*$ ,  $v_{x1}^*$ ,  $v_{x2}^*$  e  $v_{x3}^*$ . As tensões de pólo do conversor são definidas pelos estados de condução das chaves, então temos

$$v_{aj0j} = (2q_j - 1) \frac{V_{ccj}}{2} \quad (18)$$

$$v_{bj0j} = (2q_j - 1) \frac{V_{ccj}}{2} \quad (19)$$

para  $j = 1, 2, 3$ .

Temos que  $V_{ccj}$  é a tensão no barramento CC do conversor  $j$ ,  $q_j$  é o estado de condução das chaves de cada braço em cada um dos conversores. Os valores de  $q_j$  são binários, então quando  $q_j = 1$  a chave conduz e quando  $q_j = 0$  a chave abre. Para definirmos os estados das chaves, comparamos as tensões de pólo de referência  $v_{aj0j}$  e  $v_{bj0j}$  com uma onda portadora triangular de alta frequência. As tensões de pólo de referência são obtidas através da tensão de referência  $v_{hj}^*$  da seguinte forma:

$$v_{aj}^* = \frac{v_{hj}^*}{2} + v_{xj}^* \quad (20)$$

$$v_{bj}^* = -\frac{v_{hj}^*}{2} + v_{xj}^* \quad (21)$$

A tensão auxiliar  $v_{xj}^*$  é escolhida de forma independente, para isso ela deve respeitar os valores máximos e mínimos das tensões de pólo, ou seja

$$v_{x_{maxj}}^* = \frac{V_{ccj}^*}{2} - v_{maxj}^* \quad (22)$$

$$v_{x_{minj}}^* = -\frac{V_{ccj}^*}{2} - v_{minj}^* \quad (23)$$

onde

$$v_{maxj}^* = \max\left[\frac{v_{hj}^*}{2}, -\frac{v_{hj}^*}{2}\right] \quad (24)$$

$$v_{minj}^* = \min\left[\frac{v_{hj}^*}{2}, -\frac{v_{hj}^*}{2}\right] \quad (25)$$

$V_{ccj}^*$  é a tensão de referência do barramento CC do conversor  $j$ .

A tensão auxiliar  $v_{xj}^*$  pode ser escrita em função do fator de roda livre  $\mu_j$ , definido em [4] e [5] como:

$$v_{xj}^* = \mu_j v_{x_{maxj}}^* + (1 - \mu_j) v_{x_{minj}}^* \quad (26)$$

onde  $0 \leq \mu_j \leq 1$ . Quando  $\mu_j = 1$  então  $v_{xj}^* = v_{x_{maxj}}^*$  e quando  $\mu_j = 0$  então  $v_{xj}^* = v_{x_{minj}}^*$ . Para estes casos um dos braços do conversor  $j$  opera com frequência de chaveamento nula. Para  $\mu_j = 0.5$  temos a média de  $v_{xj}^*$ .

Aa tensões  $v_{hj}^*$  são obtidas através da tensão de referência  $v_{gj}^*$  da seguinte forma:

$$v_{hj}^* = v_{gj}^* + v_x^* \quad (27)$$

A tensão auxiliar  $v_x^*$  é escolhida de forma independente, para isso ela deve respeitar os valores máximos e mínimos das tensões  $v_{gj}^*$  da seguinte forma

$$v_{x_{max}}^* = V_{cc} - v_{max}^* \quad (28)$$

$$v_{x_{min}}^* = -V_{cc} - v_{min}^* \quad (29)$$

onde

$$v_{max}^* = \max[v_{g1}^*, v_{g2}^*, v_{g3}^*] \quad (30)$$

$$v_{min}^* = \min[v_{g1}^*, v_{g2}^*, v_{g3}^*] \quad (31)$$

Para este trabalho foi utilizado uma mesma tensão de referência para os três barramentos, ou seja,  $V_{cc} = V_{cc1} = V_{cc2} = V_{cc3}$ .

A tensão auxiliar  $v_x^*$  pode ser escrita em função do fator de roda livre  $\mu$ :

$$v_x^* = \mu v_{x_{max}}^* + (1 - \mu) v_{x_{min}}^* \quad (32)$$

onde  $0 \leq \mu \leq 1$ . Quando  $\mu = 1$  então  $v_x^* = v_{x_{max}}^*$ , quando  $\mu = 0$  então  $v_x^* = v_{x_{min}}^*$  e para  $\mu = 0.5$  temos a média de  $v_x^*$ .

## Controle

Na Figura 3 temos apresentado o diagrama de bloco de controle do sistema. A soma das tensões dos barramentos CC ( $v_{C1} + v_{C2} + v_{C3}$ ) é controlada por meio do controlador representado pelo bloco  $R_C$  cuja saída é a amplitude da corrente de referência  $I_g$  do sistema trifásico. O bloco  $S_{in}$  realiza a sincronização entre as correntes instantâneas de referência  $i_{gj}^*$  com  $e_{gj}$ . Através disso, compensamos o reativo e os harmônicos demandados pela carga. O controlador  $R_j$  é responsável por definir as tensões de referência  $v_{gj}^*$ . Podemos observar que como  $i_{g1} + i_{g2} + i_{g3} = 0$  então só é preciso realizar o controle de duas das correntes simultaneamente. O bloco  $S_{el}$  é responsável por verificar qual conversor está com o maior erro de controle de tensão de barramento, após isso, a tensão do conversor com maior erro passará pelo bloco  $W_C$  que é responsável por verificar se a tensão do barramento do conversor está acima ou baixo do valor de referência, caso esteja acima deve-se diminuir a potência do respectivo barramento para isso é escolhido o valor adequado de  $\mu$ , para isso devemos analisar a corrente  $i_{hj}$ , quando ela estiver no semi-ciclo positivo o valor de  $\mu$  deverá ser igual a 1 para que o conversor tenha sua potência reduzida, caso a corrente  $i_{hj}$  esteja no semi-ciclo negativo o valor de  $\mu$  deverá ser igual a 0. Já quando temos a situação em que a tensão do barramento do conversor está abaixo do valor de referência deve-se aumentar a potência do respectivo barramento, então, caso  $i_{hj}$  esteja no semi-ciclo positivo o valor de  $\mu$  deverá ser 0 para que o conversor tenha sua potência elevada, caso a corrente  $i_{hj}$  esteja no semi-ciclo negativo o valor de  $\mu$  deverá ser igual a 1. A partir das tensões de referência  $v_{gj}^*$  e do valor de  $\mu$ , o algoritmo PWM define as tensões de pólo de referência  $v_{aj0j}^*$  e  $v_{bj0j}$ . Com essas tensões determinamos os estados dos interruptores  $q_{aj}$  e  $q_{bj}$ .

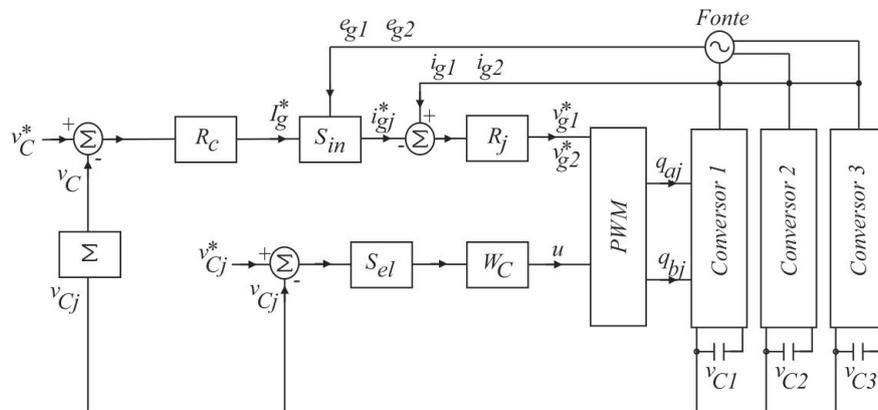


Figura 3: Diagrama de blocos para o controle do sistema

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise do sistema foram realizadas duas simulações uma com o sistema sem harmônicos e outra com harmônicos.

### Sistema sem harmônicos

O sistema com a carga de características linear foi implementada usando o software MatLab@. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

Na Figura 4 podemos observar que as tensões da fonte primária de alimentação estão em fase com as respectivas correntes, em outras palavras, a fonte primária está fornecendo uma potência com fator de potência unitário. Na Figura 5 temos a corrente  $i_{g1}$  e sua corrente de referência, podemos concluir que o controlador de corrente desempenhou sua função já que  $i_{g1}$  acompanha a corrente de referência  $i_{g1}^*$ . Na Figura 6 temos as correntes  $i_{g1}$  e  $i_{l1}$ , podemos ver que a corrente  $i_{l1}$  está atrasada com relação a corrente  $i_{g1}$ , em outras palavras, o FAP adiantou a corrente original que antes deveria ser igual a  $i_{l1}$ , realizando o fornecimento de potência reativa necessária. Na Figura 7 temos o gráfico da soma das tensões dos três capacitores nos barramentos CC e sua referência. Analisando o gráfico vemos que o controle foi realizado adequadamente. Na Figura 8 temos o gráfico das tensões de cada um dos capacitores dos três barramentos CC sem a inserção dos blocos  $S_{el}$  e  $W_C$  para a definição do valor de  $\mu$ . Podemos verificar que mesmo que a soma das tensões dos três capacitores estejam sendo controladas, a tensão em cada um não está seguindo o valor de referência, para isso foram inseridos os blocos  $S_{el}$  e  $W_C$  para definir o valor de  $\mu$  adequado obtendo assim o êxito no controle individual de cada barramento CC como pode ser visto na Figura 9.

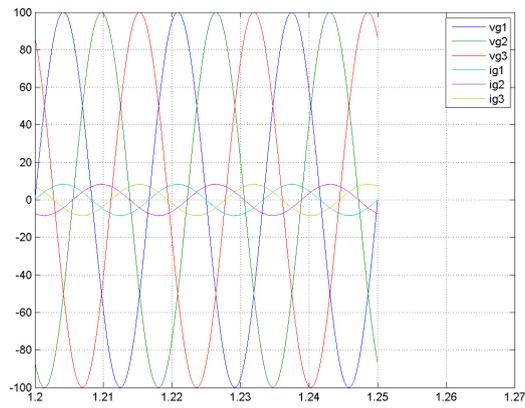


Figura 4: Tensões e correntes na fonte primária de alimentação para o sistema sem harmônicos

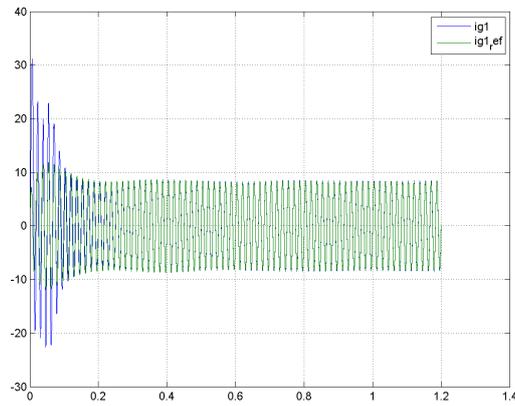


Figura 5: Corrente  $i_{g1}$  e sua corrente de referência para o sistema sem harmônicos

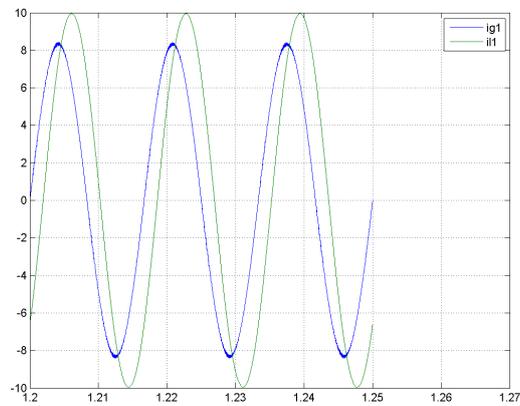


Figura 6: Corrente  $i_{g1}$  e corrente na carga  $i_{l1}$  para o sistema sem harmônicos

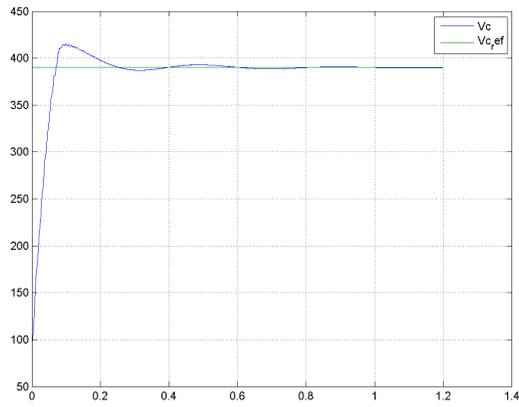


Figura 7: Soma da tensão dos capacitores e tensão de referência no barramento CC para o sistema sem harmônicos

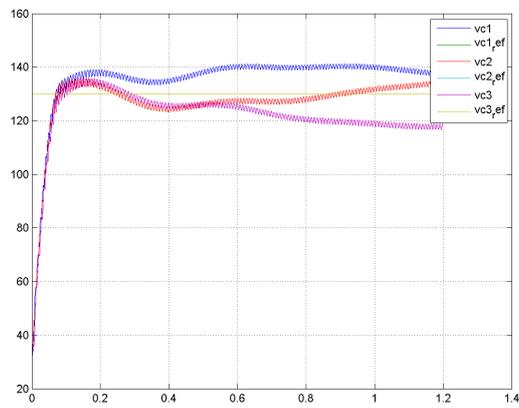


Figura 8: Tensões dos capacitores e tensão de referência no barramento CC sem os blocos  $S_{el}$  e  $W_C$  definirem o  $\mu$

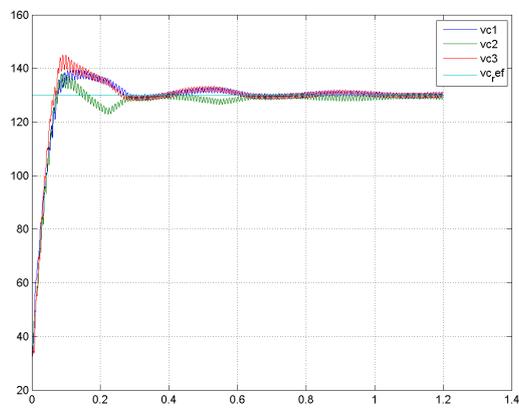


Figura 9: Tensões dos capacitores e tensão de referência no barramento CC com os blocos  $S_{el}$  e  $W_C$  definindo o valor de  $\mu$

## Sistema com harmônicos

Para este sistema temos que o FAP irá desempenhar agora o papel de compensador de harmônicos e de fator de potência.

O modelo do sistema pode ser visto na Figura 10, ele continua o mesmo que o modelo sem harmônicos, o que muda é que deve ser feita a substituição da corrente  $i_{ij}$  por  $i_{ijharm} - i_{harm}$ . Com isso obtemos a equação (33):

$$\overline{L} \frac{d\overline{I}}{dt} = \overline{R}\overline{I} + \overline{K}\overline{V} + \overline{K}_h\overline{I}_h \quad (33)$$

onde

$$\overline{K}_h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_l & L_l & -R_l & -L_l & 0 & 0 \\ R_l & L_l & 0 & 0 & -R_l & -L_l \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\overline{I}_h = \begin{bmatrix} i_{l1harm} \\ \frac{di_{l1harm}}{dt} \\ i_{l2harm} \\ \frac{di_{l2harm}}{dt} \\ i_{l3harm} \\ \frac{di_{l3harm}}{dt} \end{bmatrix} \quad (35)$$

A estratégia PWM é a mesma do sistema sem harmônicos.

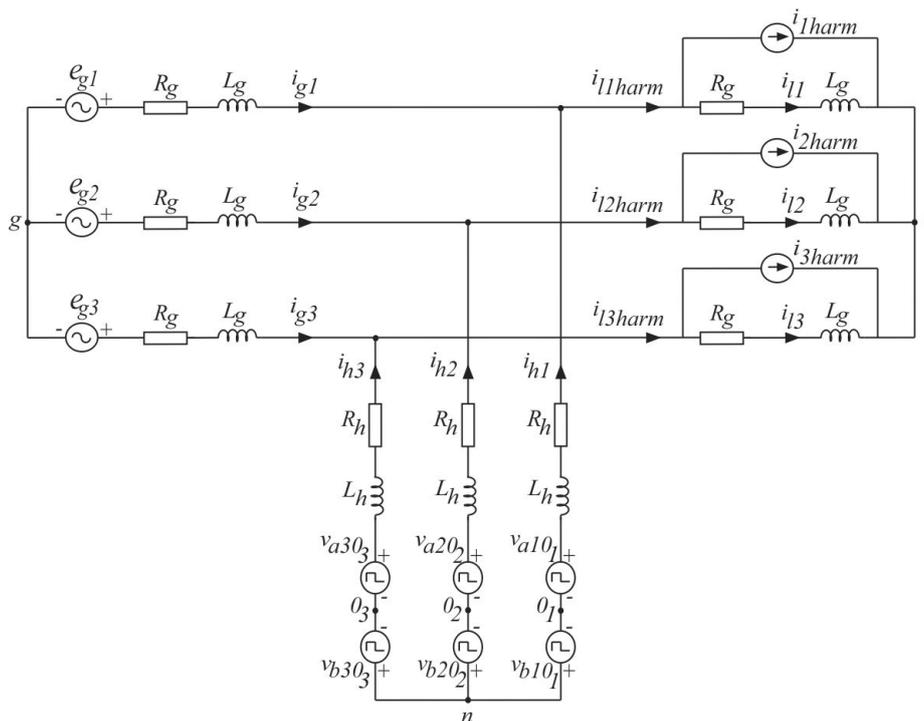


Figura 10: Sistema com harmônicos

O sistema com a carga de características não lineares foi implementado usando o software MatLab@. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Na Figura 11 podemos observar que as tensões da fonte primária de alimentação estão em fase com as respectivas correntes e estas apresentam formas senoidais, portanto, o filtro fez a compensação tanto de fator de potência quanto de harmônicos. Na Figura 13 temos as correntes  $i_{g1}$  e  $i_{l1}$ , podemos ver que o filtro muda a corrente que deveria ser  $i_{l1}$  passando a ser a corrente  $i_{g1}$ . Nas Figuras 12, 13 e 14 vemos que os valores das corrente e das tensões no barramento estão seguindo suas referências.

## Análise da Distorção Harmônica Total

Na tabela abaixo temos os valores do THD das correntes  $i_{gj}$  onde vemos que estão dentro dos limites permitido.

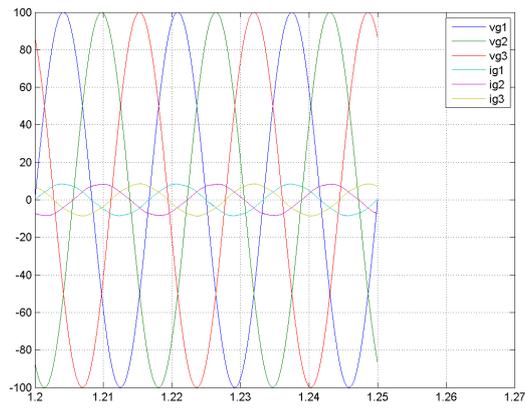


Figura 11: Tensões e correntes na fonte primária de alimentação para o sistema com harmônicos

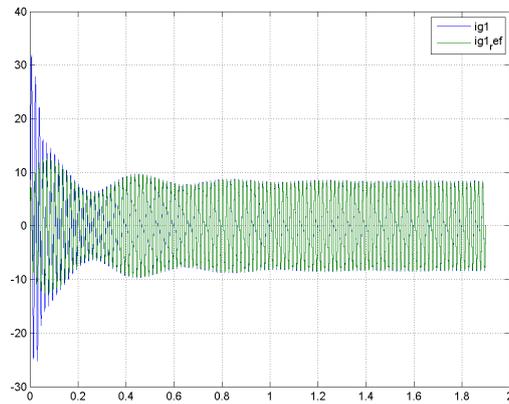


Figura 12: Corrente  $i_{g1}$  e sua corrente de referência para o sistema com harmônicos

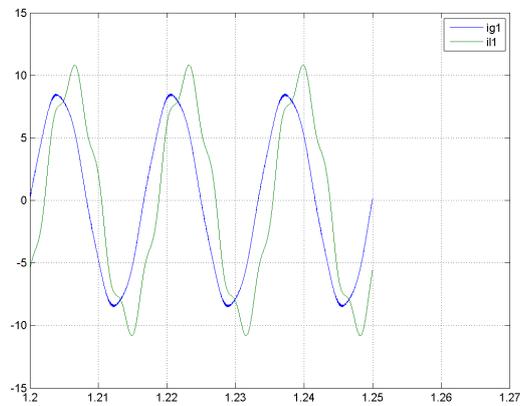


Figura 13: Corrente  $i_{g1}$  e corrente na carga  $i_{L1}$  para o sistema com harmônicos

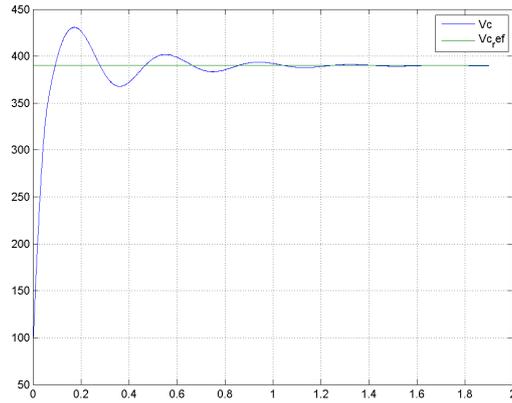


Figura 14: Soma da tensão dos capacitores e tensão de referência no barramento CC para o sistema com harmônicos

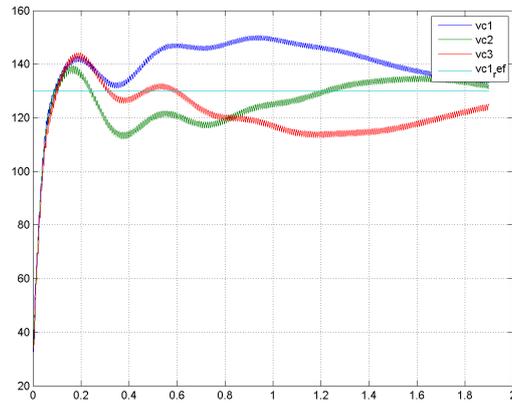


Figura 15: Tensões dos capacitores e tensão de referência no barramento CC sem os blocos  $S_{el}$  e  $W_C$  definirem o  $\mu$

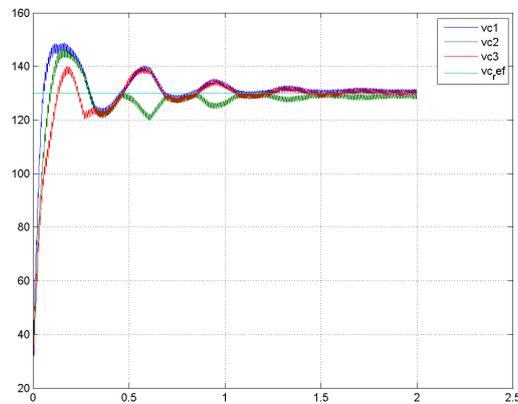


Figura 16: Tensões dos capacitores e tensão de referência no barramento CC com os blocos  $S_{el}$  e  $W_C$  definindo o valor de  $\mu$

	THD - sistema sem harmônico	THD - sistema com harmônico
$i_{g1}$	0.6480%	2.2478%
$i_{g2}$	0.6443%	2.2677%
$i_{g3}$	0.6412%	2.2255%

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido o estudo de um sistema de compensação de potência fazendo uso de conversores estáticos interconectados em série e estes conectados em paralelo ao sistema. Foram apresentados os resultados para dois tipos de simulações, com cargas lineares e não lineares, para a verificação tanto da compensação da potência reativa quanto de harmônicos por parte do filtro ativo de potência. Foi discutida a estratégia de PWM assim como o sistema de controle no qual controlamos as correntes do circuito além das tensões nos barramentos dos conversores através de uma escolha adequada do fator de roda livre. As simulações foram realizadas na plataforma MatLab® e os resultados obtidos apresentados e analisados.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento do projeto e pela concessão da bolsa PIBIT; Aos colegas do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos de Máquinas (LEIAM) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), onde este projeto foi desenvolvido e realizado, por todo apoio e contribuição; Ao professor Cursino Brandão Jacobina pela orientação, pelo conhecimento transmitido e pela oportunidade oferecida de trabalhar neste projeto.

## Referências

- [1] DAS, J. Passive filters - potentialities and limitations. *Industry Applications, IEEE Transactions*, p. 232 – 241, 2004.
- [2] JACOBINA, C. et al. Three-phase series active power filter without dc voltage source. *Power Electronics Specialists Conference, IEEE*, p. 880 – 884, 2008.
- [3] LAMICH, M. et al. Control of a three phase four wires shunt hybrid filter. *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, p. 2247 – 2252, 2008.
- [4] JACOBINA, C. et al. Digital scalar pulse-width modulation: A simple approach to introduce non-sinusoidal modulating waveforms. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, p. 351 – 359, 2001.
- [5] BLASKO, V. Analysis of a hybrid pwm based on modified space-vector and triangle-comparison methods. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, p. 756 – 764, 1997.