

Filtro Activo Paralelo com Interface entre Fontes de Energia Renovável e a Rede Eléctrica

Ricardo Pregitzer, José C. Costa, Júlio S. Martins, João L. Afonso

rpregitzer@dei.uminho.pt; jcarlos@dei.uminho.pt; jmartins@dei.uminho.pt; jla@dei.uminho.pt

Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho

Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Resumo

Este artigo apresenta alguns resultados de testes de um protótipo de bancada de um Filtro Activo Paralelo, que tem a capacidade de compensar harmónicos de corrente, desequilíbrios de corrente entre fases e factor de potência e, simultaneamente, consegue injectar energia proveniente de fontes de energia renovável na rede eléctrica.

Utilizando um Filtro Activo Paralelo, composto por um andar inversor de 2 níveis e 3 braços, e por um sistema de controlo baseado na Teoria p-q implementado num microcontrolador, demonstra-se a capacidade do filtro activo como interface para fontes de energia renovável com injeção de correntes com conteúdo harmónico reduzido.

Palavras-chave: Filtro Activo Paralelo, Energias Renováveis, Teoria p-q, Qualidade de Energia Eléctrica, Interface com a Rede Eléctrica.

1. Introdução

No seguimento de [1], onde o conceito da utilização do Filtro Activo Paralelo como interface para fontes de energia renovável foi introduzido, implementou-se um protótipo laboratorial de um filtro activo cuja função é injectar a energia disponível em Fontes de Energia Renovável na rede eléctrica, sem aumentar a poluição harmónica e, simultaneamente, compensar os harmónicos de corrente, factor de potência e desequilíbrio de corrente entre fases provocados por cargas não-lineares. A Fig. 1 introduz o diagrama de blocos de um Filtro Activo Paralelo que tem a capacidade de injectar energia proveniente de fontes de energia renovável na rede eléctrica.

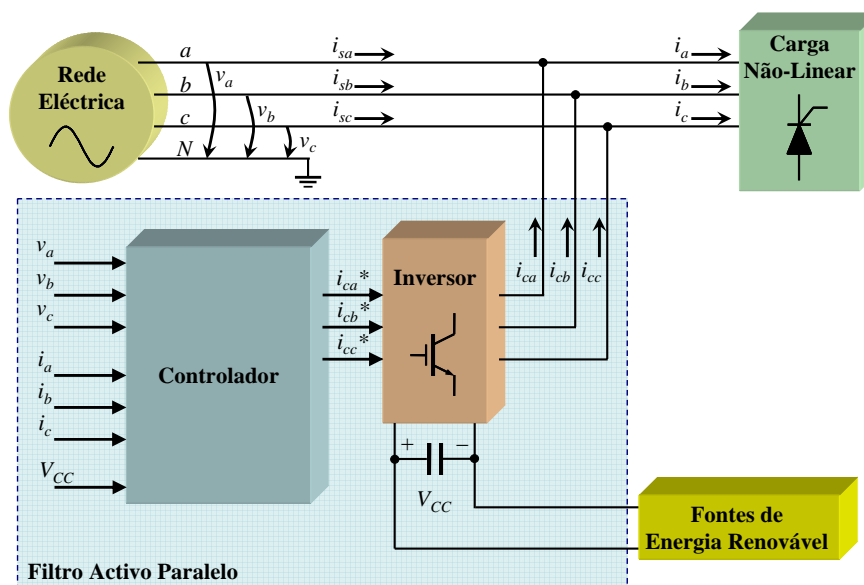


Fig.1 – Diagrama simplificado do Filtro Activo Paralelo a funcionar como interface entre fontes de energia renovável e a rede eléctrica.

O controlador do Filtro Activo Paralelo, tem como sinais de entrada as três tensões v_a , v_b e v_c , as 3 correntes de carga i_a , i_b e i_c e também a tensão no lado CC do inversor, V_{CC} . O objectivo é que as correntes do lado da fonte i_{sa} , i_{sb} e i_{sc} se tornem sinusoidais, com factor de potência unitário e equilibradas [2]. Para isso o controlador do Filtro Activo Paralelo determina as correntes de compensação, i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^* que serão depois geradas pelo inversor. Caso exista energia disponível nas fontes de energia renovável, o Filtro Activo Paralelo irá injectar essa energia na rede eléctrica de forma sinusoidal e equilibrada nas 3 fases. Utilizando o filtro activo como interface, mesmo que num determinado momento não exista energia disponível nas fontes de energia renovável, este continua a operar, compensando os harmónicos de corrente e factor de potência da carga.

Relativamente à injeção de energia, o Filtro Activo Paralelo deve ter capacidade de injectar tanto energia activa como “energia” reactiva. De acordo com a alínea d) do artigo 22º do decreto-lei n.º 313/95 de 24 de Novembro, os produtores de energia eléctrica devem fornecer uma quantidade de “energia” reactiva que corresponde a pelo menos 40 % da energia activa fornecida. Realça-se também que de acordo com a alínea e) desse mesmo artigo não deve ser fornecida à rede “energia” reactiva durante as horas de vazio. A “energia” reactiva fornecida em défice fora das horas de vazio e em excesso durante as horas de vazio será paga pelo produtor, de acordo com as tarifas fixadas pela Entidade Reguladora do Sector Energético (ERSE).

2. Filtro Activo Paralelo

O Filtro Activo Paralelo implementado é constituído por um processador digital de sinal (DSP - *Digital Signal Processor*) TMS320LF2407A da *Texas Instruments*, que contém a teoria de controlo que é baseada na Teoria p-q desenvolvida por *Akagi et al.* [3]. A leitura das correntes de carga, das correntes do inversor, das tensões da rede e da tensão do lado CC são efectuadas por sensores de efeito *Hall*. A Fig. 2 apresenta o diagrama de blocos simplificado do sistema de controlo.

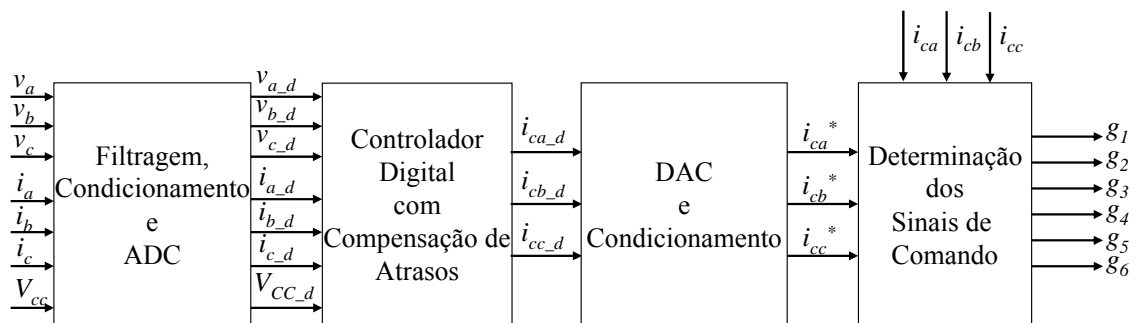


Fig.2 – Diagrama de blocos do sistema de controlo.

Uma vez determinados os sinais de referência do controlador, é utilizada a técnica de amostragem periódica (*PS – Periodic Sampling*) [4] para determinar os sinais de comando a serem aplicados no inversor apresentado na Figura 3. A nível do inversor é utilizado um módulo trifásico da Mitsubishi com 7 IGBTs de 1200 V / 25 A e 3 braços. Para além dos módulos, foram utilizadas indutâncias de 5 mH à saída dos 3 braços, e também filtros RC com uma frequência de corte de 7,2 kHz, que são utilizados para filtrar o ruído produzido pelas comutações dos IGBTs do inversor. No lado CC foi utilizado um banco de condensadores com capacidade total de 630 µF.

A Fig. 4 mostra a bancada de ensaios do protótipo laboratorial do Filtro Activo Paralelo.

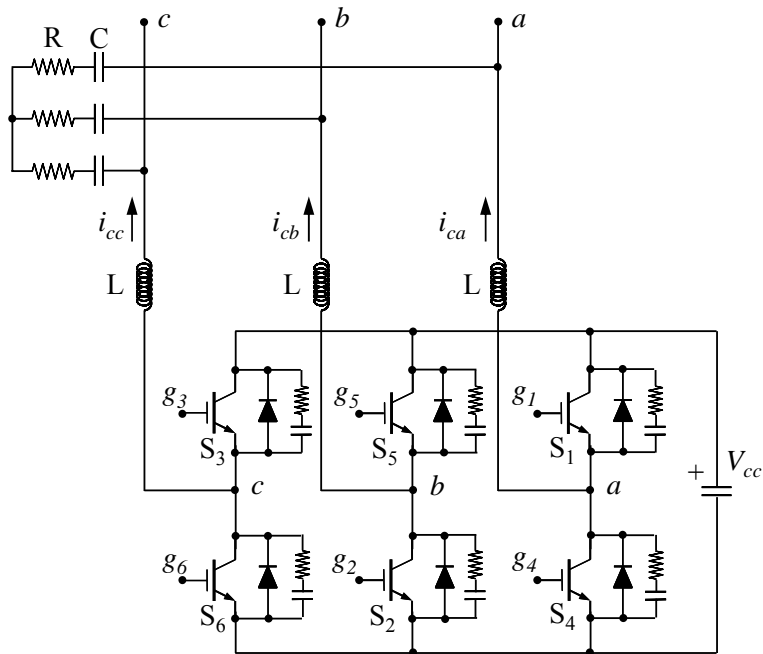


Fig.3 – Esquema do inversor do Filtro Activo Paralelo.

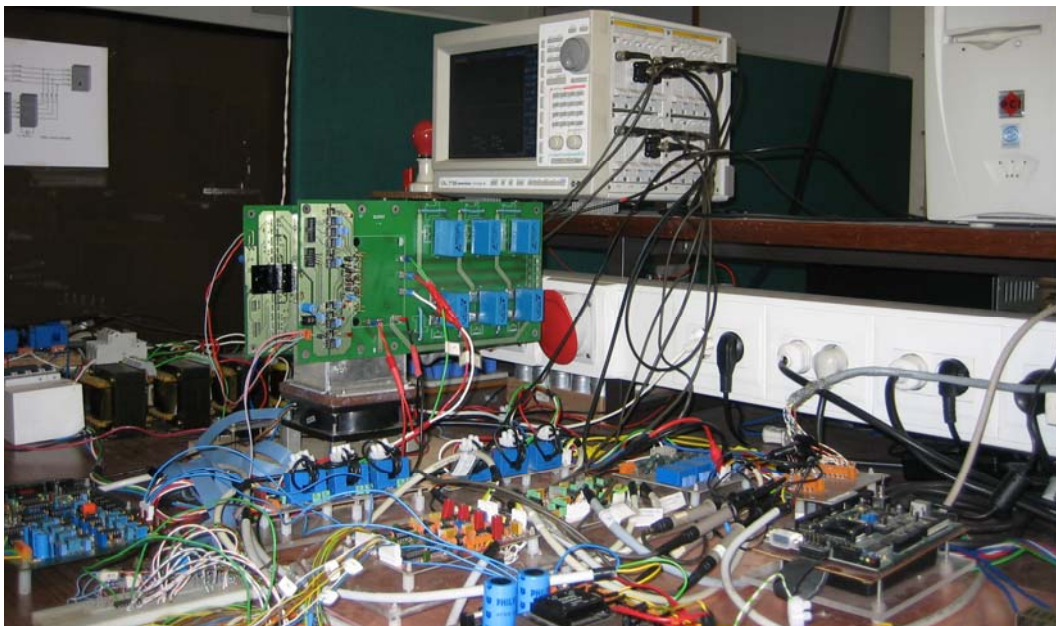


Fig.4 – Bancada de ensaios do Filtro Activo Paralelo.

3. Resultados Experimentais

O Filtro Activo Paralelo foi testado em ambiente laboratorial, com um valor eficaz de tensão de rede entre fase e neutro de 75 V. O objectivo dos ensaios realizados visou demonstrar as capacidades do Filtro Activo Paralelo em termos de compensação das correntes da carga, e simultaneamente, de injeccção de energia na rede com e sem “energia” reactiva capacitiva.

Para emular as fontes de energia renovável utilizou-se uma fonte de tensão CC de 240 V, que é o nível de tensão necessário para que o Filtro Activo Paralelo gere as correntes de forma satisfatória.

Os primeiros ensaios consistiram em testar as capacidades de injeção de energia do filtro activo sem que a compensação seja efectuada simultaneamente. A Fig. 4 mostra as correntes da fonte quando o filtro activo injecta apenas energia activa, e a Fig. 5 mostra o filtro a injectar energia activa e 40 % de energia reactiva. No primeiro caso o filtro activo injectou 6,9 A por fase, correspondentes a uma potência de 1,55 kW. A distorção harmónica por fase foi de 8,5% neste caso. Quando o filtro activo passou a injectar “energia reactiva”, a corrente passou para uma amplitude de 8,7 A, com uma distorção harmónica de 8,2%.

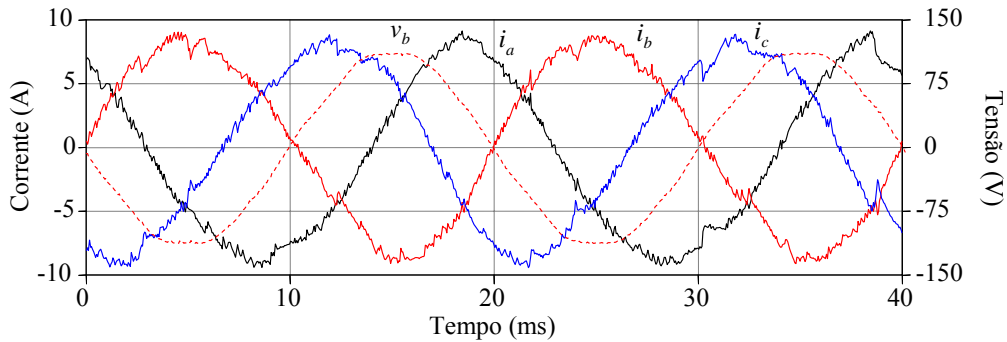


Fig.4 – Correntes nas fontes com injeção de energia activa sem compensação.

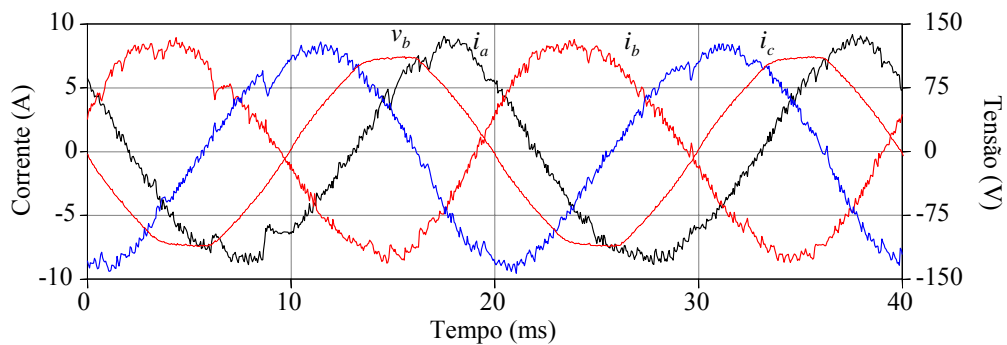


Fig.5 – Correntes nas fontes com injeção de energia activa e “energia” reactiva sem compensação.

A fase seguinte de ensaios consistiu em fazer com que o filtro activo compensasse desequilíbrios entre fases, harmónicos e factor de potência. As cargas utilizadas foram 3 indutâncias de 50 mH (uma indutância por fase ligadas em estrela), e um rectificador monofásico a diodos ligado entre as fases *a* e *b*, com uma resistência de 33 Ω e uma indutância de 58,8 mH ligadas em série no seu lado CC. A Fig. 6 mostra as formas de onda das correntes nas cargas e a Tab. I enumera as características deste conjunto.

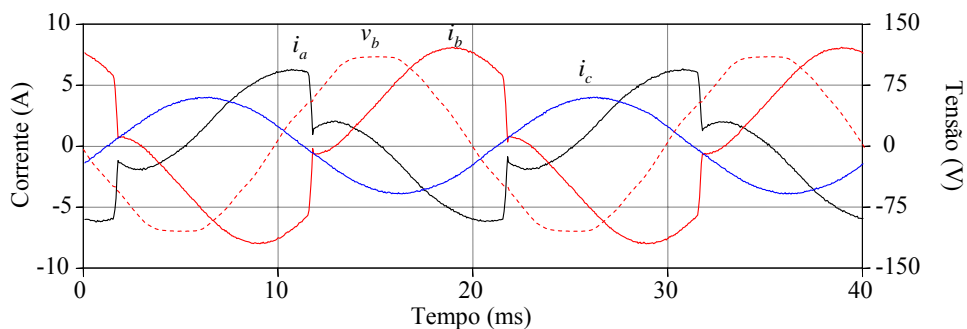


Fig.6 – Correntes na carga.

TABELA I – CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES NAS CARGAS.

	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
Corrente (A)	5,1	7,3	3,8
Factor de Potência	0,86 ind	0,5 ind	0,15 ind
THD (%)	24,4	17,5	1,8

Quando o Filtro Activo Paralelo é ligado apenas no modo de compensação, as correntes na fonte passam a ter um desequilíbrio menor, um factor de potência unitário, e um baixo nível de distorção harmónica. A Fig. 7 mostra as correntes na fonte, após compensação pelo filtro activo, e a Tab. II indica as características das correntes na fonte.

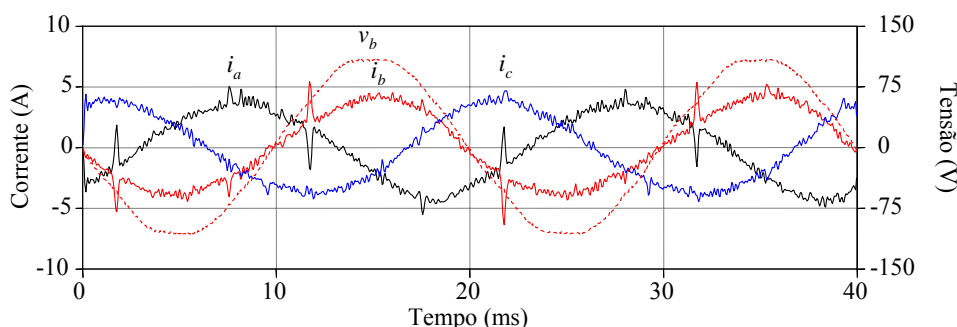


Fig.7 – Correntes na fonte sem injeção de energia e compensação.

TABELA II – CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES NA FONTE APÓS COMPENSAÇÃO.

	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
Corrente (A)	3,7	4,1	3,7
Factor de potência	0,99 ind	1,00	1,00
THD (%)	14,2	15,0	8,2

Os ensaios finais consistiram em observar o comportamento do Filtro Activo Paralelo, quando este compensa as correntes na fonte, e simultaneamente injecta energia na rede eléctrica. A Fig. 8 mostra as correntes na fonte quando o filtro activo injecta apenas energia activa, e a Fig. 9 ilustra essas mesmas correntes quando o filtro injecta também “energia” reactiva. Constata-se que as correntes na fonte têm uma amplitude bastante baixa, pois o filtro activo encarrega-se de injectar a maior parte da energia necessária para as cargas. O conteúdo harmónico relativamente elevado que é apresentado deve-se precisamente à baixa componente fundamental. Este conteúdo harmónico de alta frequência mantém-se aproximadamente constante, quando as cargas têm uma maior potência. As Tabs. III e IV enumeram as características das correntes na fonte em ambas as situações. Deve-se destacar que o factor de potência negativo indica que o conjunto constituído pelas cargas e pelo filtro activo funciona como fonte

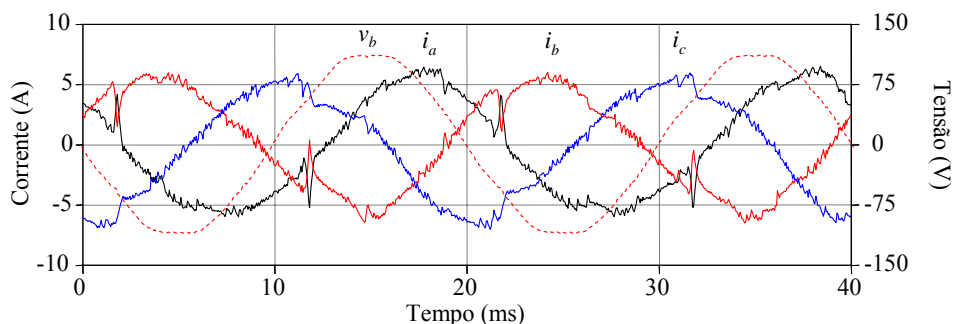


Fig.8 – Correntes nas fontes com injeção de energia activa e com compensação.

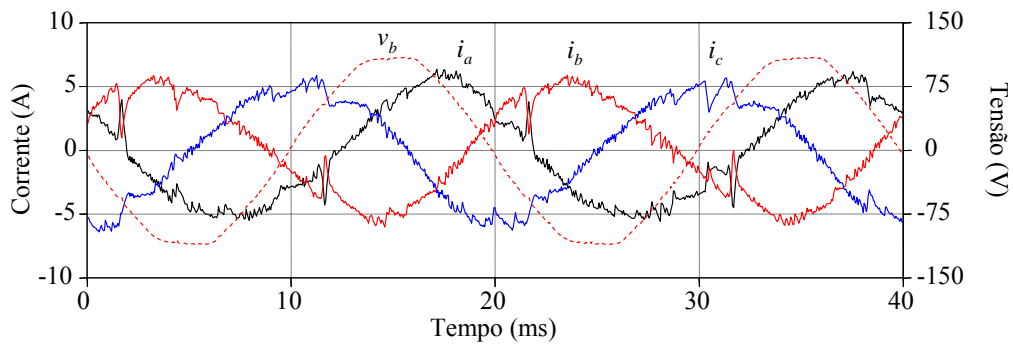


Fig.9 – Correntes nas fontes com injeção de energia activa, “energia” reactiva e com compensação.

TABELA III – CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES NA FONTE APÓS COMPENSAÇÃO E COM INJEÇÃO DE ENERGIA ACTIVA.

	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
Corrente (A)	5,2	4,6	4,8
Factor de potência	-1,0	-1,0	-1,0
THD (%)	17,3	20,8	17,4

TABELA IV – CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES NA FONTE APÓS COMPENSAÇÃO COM INJEÇÃO DE ENERGIA ACTIVA E “ENERGIA” REACTIVA.

	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
Corrente (A)	5,7	5,4	5,5
Factor de potência	-0,80 cap	-0,80 cap	-0,80 cap
THD (%)	15,1	17,3	13,4

4. Conclusões

Este artigo mostra resultados obtidos com um protótipo laboratorial de um Filtro Activo Paralelo que tem a capacidade de funcionar como interface entre fontes de energia renovável e a rede eléctrica. Demonstra-se a sua capacidade em injectar correntes na rede eléctrica, e simultaneamente compensar problemas de qualidade de energia das cargas, nomeadamente harmónicos de corrente, factor de potência e desequilíbrios de corrente entre fases.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), financiadora do Projecto POCTI/ESE/41170/2001 e do Projecto POCTI/ESE/48242/2002.

Referências

- [1] Ricardo L. Pregitzer, Tiago N. Sousa, Júlio S. Martins, João L. Afonso, *Interface entre Fontes de Energia Renovável e a Rede Eléctrica*, ENER05 - Conferência sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal, pp. , 2005, Figueira da Foz, Portugal.
- [2] João Luiz Afonso, *Filtro Activo Paralelo com Controlo Digital para melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho - Braga, Novembro de 2000.
- [3] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*, IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf., pp. 1375-1386, 1983, Tokyo, Japão.
- [4] J. Dixon, S. Tepper, L. Morán, *Analysis and Evaluation of Different Modulation Techniques for Active Power Filters*, 1994