

# Aplicação de Tecnologias de Filtragem Ativa para Melhoria da Qualidade de Energia Elétrica em Baixa Tensão

A.H.Oliveira, LACTEC, V. Mognon, LACTEC, C.G.Bianchin, LACTEC, I.J.Chueiri, LACTEC, J.R.Pasqualin, LACTEC, B.R.Moeller, LACTEC

## RESUMO

Este artigo apresenta os resultados parciais, primeira etapa, de implementação de um filtro ativo paralelo monofásico para correção de harmônicas de corrente geradas por cargas não lineares e correção do fator de potência de cargas lineares. São comentadas as estratégias de controle adotadas para geração das correntes de referência, apresentados os resultados do modelamento dos inversores de tensão, necessários ao projeto dos controladores de corrente e tensão, resultados de simulação e resultados iniciais dos sinais gerados por uma plataforma de desenvolvimento baseado em processadores digitais de sinais DSP56F80x.

## PALAVRAS-CHAVE

Filtro Ativo Paralelo, Fator de Potência, Taxa de Distorção Harmônica de Corrente, Inversores de Tensão.

## I. INTRODUÇÃO

A necessidade de um controle efetivo do fluxo de potência entre sistemas elétricos fez surgir um ramo da eletrônica específico para tal finalidade onde, inicialmente, acionamentos de máquinas elétricas e controles industriais apareceram como os principais setores que exigiam esforços no desenvolvimento da eletrônica de potência. Surgiram então diversas topologias de conversores e, paralelo a este desenvolvimento de estruturas, seguiram-se as pesquisas na busca de dispositivos semicondutores que se aproximassem ao máximo do comportamento de uma chave estática ideal. A conservação energética tornou-se uma das principais preocupações do mundo moderno e, portanto, estruturas que operem com um mínimo de desperdício de energia são extremamente desejáveis. Isto significa projetar estruturas com elevadíssimo rendimento, alto fator de potência, baixas taxas de distorção harmônica de corrente e tensão, entre outras características. Entretanto, os sistemas de distribuição estão, atualmente, cada vez mais sujeitos a cargas não-lineares, representados principalmente por retificadores, tanto monofásicos quanto trifásicos, seguidos por filtros capacitivos. Isto faz com que a corrente de carga drenada da rede apresente um elevado conteúdo harmônico, acarretan-

do diversos problemas para a rede comercial de distribuição, podendo-se destacar [1]:<sup>1</sup>

- A interferência eletromagnética provocada pode influir no correto funcionamento de cargas sensíveis conectadas ao sistema;
- Distorção harmônica da tensão fornecida, devido à característica não linear da corrente;
- Funcionamento inadequado de estruturas que utilizam a forma de onda de tensão de rede para referências e sincronismo;
- O baixo fator de potência e, conseqüentemente, a elevada energia reativa circulante exige um sobredimensionamento dos condutores da rede de distribuição;
- Harmônicas de corrente de neutro provocam níveis de tensão neste condutor, muitas vezes provocando desbalanceamento de tensões entre pontos de aterramento distintos;
- Bancos capacitivos conectados em paralelo à rede para diminuição do fator de deslocamento apresentam características de impedância decrescente com o aumento da frequência. Conseqüentemente, tensões com alta taxa de distorção harmônica provocam elevados valores de harmônicas de corrente circulante por estes capacitores
- Problemas de ressonância entre bancos capacitivos e indutâncias conectadas à linha que podem provocar um aumento das correntes harmônicas circulantes;
- Aumento das perdas nos transformadores, seja por efeito Joule nos enrolamentos, agravado pelo efeito pelicular (Skin Effect), como por efeito da histerese e correntes de Foucault no núcleo magnético.

O filtro ativo paralelo (FAP) constitui uma solução interessante para a compensação de harmônicos de corrente, no caso de cargas não lineares, e correção do fator de potência de cargas lineares e não lineares.

## II. DESCRITIVO DO PROJETO

O conceito do filtro ativo paralelo pode ser apresentado através da analogia com as técnicas de cancelamento ativo de ruído ANR (Active Noise Reduction), ou seja, interferir no sinal indesejado de modo a atenuá-lo. Isto é possível se for gerado uma interferência destrutiva,

<sup>1</sup> Este projeto foi contratado pela concessionária COPEL, Companhia Paranaense de Energia e desenvolvido no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC – Curitiba/PR.

ou seja, um sinal de mesma amplitude e fase oposta. A extensão deste princípio aos sistemas de distribuição de energia elétrica gera o diagrama simplificado da figura 1. A rede de distribuição, representada pela fonte de tensão  $V_s$ , está sujeita a uma carga não linear (ou linear com baixo fator de potência). As grandezas elétricas, que podem ser as tensões e correntes de carga e de rede, dependendo da estratégia adotada, são as variáveis monitoradas pelo FAP que, após processamento, geram os harmônicos de corrente para redução dos harmônicos indesejáveis que circulem pela rede. A principal diferença em relação ao controle ativo de ruído é que, no FAP, deseja-se manter a componente fundamental de corrente (60 Hz) e esta, em fase com a fundamental de tensão. Com isso, garante-se um alto fator de potência e baixa distorção harmônica da corrente drenada da rede elétrica.

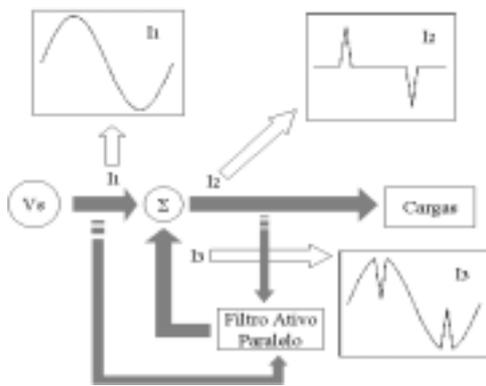


FIGURA 1 – Diagrama simplificado da atuação de um filtro ativo paralelo

Apesar do filtro ativo paralelo ser mais indicado para compensação de reativos, redução da taxa de distorção harmônica de corrente e correção do fator de potência, ele contribui também para a melhoria das taxas de distorção harmônica de tensão provocadas por correntes com características altamente não-lineares. Esta situação é comum em retificadores monofásicos e trifásicos com filtro capacitivo. A figura 2 mostra uma representação simplificada de uma instalação elétrica onde vários consumidores estão conectados ao mesmo transformador e mesma fase. A tensão entregue aos consumidores é denominada  $V_{cons}$ .

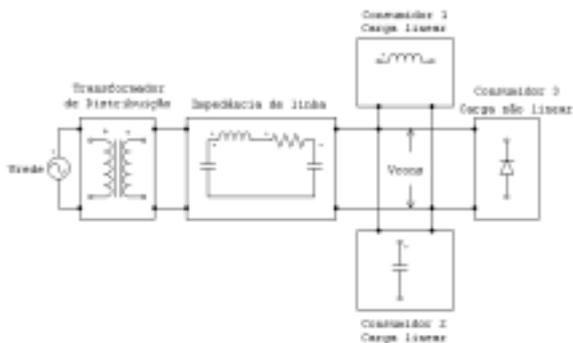


FIGURA 2. Diagrama simplificado de uma instalação elétrica onde vários consumidores estão conectados ao mesmo ponto de distribuição.

Devido à presença de uma carga altamente não linear, a corrente drenada pela mesma provoca uma queda de tensão na impedância equivalente de linha. Com isso, ocorre um achatamento da forma de onda de tensão, próximos ao valor de pico, fornecida aos consumidores conectados em paralelo a esta carga não linear, conforme demonstra a figura 3.

Para um entendimento da operação do filtro ativo paralelo como gerador de harmônicos de corrente pode-se implementar uma fonte de tensão equivalente  $V_{eq}$  de tal forma que o controle da amplitude e forma de onda desta tensão, conectado através de uma impedância à rede, consiga impor a forma de corrente desejada, de tal forma que a rede forneça apenas a componente fundamental de corrente e em fase com a tensão gerada. Isto é possível utilizando-se uma estrutura bidirecional em corrente e tensão, conforme figura 4. O inversor de tensão monofásico em ponte completa VSI (do inglês, Voltage Source Inverter), conforme figura 5, apresenta as características necessárias para funcionamento do filtro ativo.

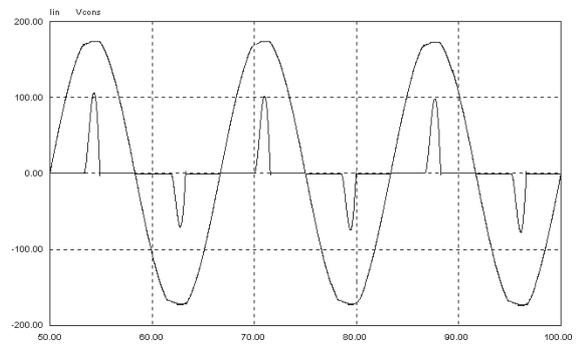


FIGURA 3 – Tensão entregue às cargas e corrente drenada pela carga não linear

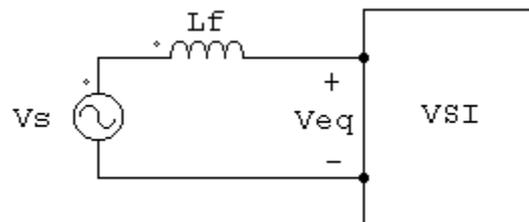


FIGURA 4 – Estrutura bidirecional em corrente e tensão para operação como filtro ativo.

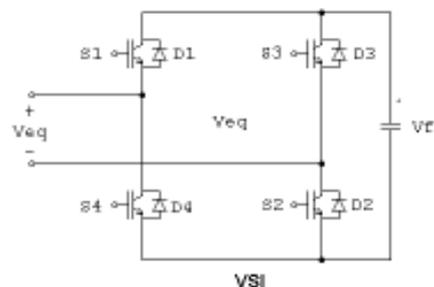


FIGURA 5 – Inversor de tensão monofásico.

A fim de projetar as malhas de controle de corrente e tensão para geração das correntes de referência, ou seja, as formas de corrente necessárias para que o inversor de tensão monofásico possa injetar/absorver as harmônicas geradas por cargas não lineares, foram modelados os in-

versores de tensão modulados a dois e três níveis, conforme mostram as tabelas 1 e 2.

**TABELA 1**  
tabela com as equações que descrevem os inversores de tensão monofásicos.

INVERSOR A DOIS NÍVEIS	INVERSOR A TRÊS NÍVEIS
$V_{eq}(t)$	$D(q_{eq})$

As equações mostradas na tabela 1 representam a dependência da tensão equivalente em função da razão cíclica D. As variações de corrente circulante pelo indutor de acoplamento Lf em função da razão cíclica e em função da tensão de controle na modulação, para o inversores de tensão monofásicos são apresentados na tabela 2, onde Vf é a tensão no barramento CC do inversor.

**TABELA 2**  
funções de transferência para o compensador de corrente do inversor de tensão.

F.T. INVERSOR A DOIS NÍVEIS	INVERSOR A TRÊS NÍVEIS
-----------------------------	------------------------

O procedimento para a determinação da malha de tensão, responsável principalmente pelo controle da potência ativa circulante pelo sistema será feito, inicialmente, a partir da configuração de potências geradas conforme figura 6. Através desta figura pode-se concluir que a componente de  $i_L(t)$  em quadratura com a tensão de rede não varia se aumentarmos a amplitude de  $V_{eq}(t)$  (mantendo esta tensão em quadratura com a rede). Portanto, o produto entre a tensão equivalente e a componente em quadratura da corrente circulante no indutor de acoplamento deve ser proporcional à potência útil circulante no sistema filtro ativo. Portanto:

$$V_r \cdot \cos(\omega t) \cdot i_L(t) = -C_f \frac{d}{dt} V_f(t) \quad (1)$$

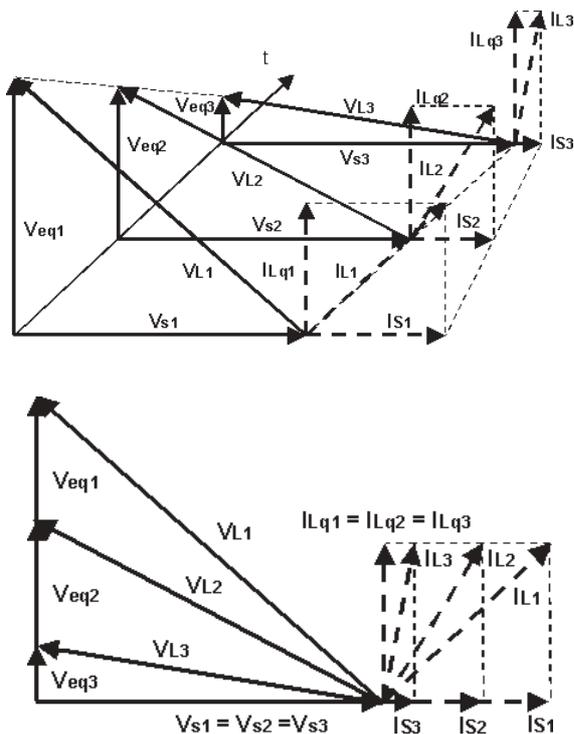


FIGURA 6 - Diagrama de correntes geradas pela variação da tensão equivalente  $V_{eq}$ .

Considerando a componente em quadratura da corrente do indutor:

$$V_r \cdot \cos(\omega t) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{Lq} \cdot \cos(\omega t) = -C_f \frac{d}{dt} V_f(t) \quad (2)$$

Assim, a envoltória de tensão  $V_f(t)$  quando o capacitor absorve ou fornece potência ativa é dada por:

$$|V_f(t)| = \frac{V_r \cdot \sqrt{2} \cdot I_{Lq}}{2 \cdot C_f} \cdot t = \frac{\sqrt{2} \cdot V_r \cdot V_s}{2 \cdot \omega \cdot L_f \cdot C_f} \cdot t \quad (3)$$

Através das técnicas de modelamento baseado nos valores médios instantâneos, obteve-se os seguintes modelos canônicos [2] dos inversores de tensão, apresentados nas figuras 7 e 8 a seguir:

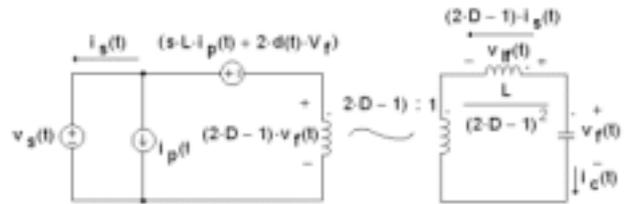


FIGURA 7 - Modelo canônico do inversor à dois níveis.

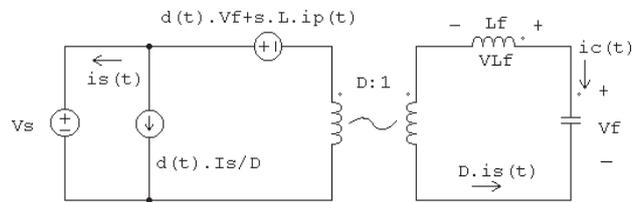


FIGURA 8 - Modelo canônico do inversor à três níveis.

A ondulação em alta frequência da corrente no indutor de acoplamento nos inversores à dois níveis e três níveis, são mostradas nas figuras 10 e 11 :

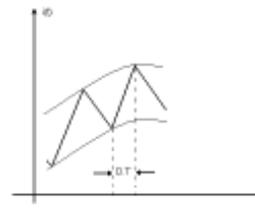


FIGURA 9 - Ondulação de corrente em alta frequência.

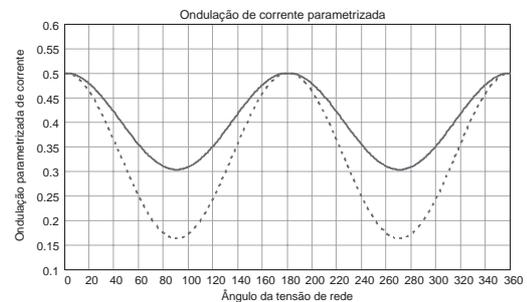


FIGURA 10 - Ondulação de corrente no indutor parametrizada no inversor à dois níveis.

Observa-se que a ondulação máxima ocorre para um ângulo de tensão de rede igual a  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ . Portanto, basta projetarmos o indutor de acoplamento levando-se em consideração o valor de pico desta ondulação média parametrizada.

No caso do inversor à três níveis, as ondulações máximas não ocorrem em um único ponto, e dependem de várias variáveis de projeto.

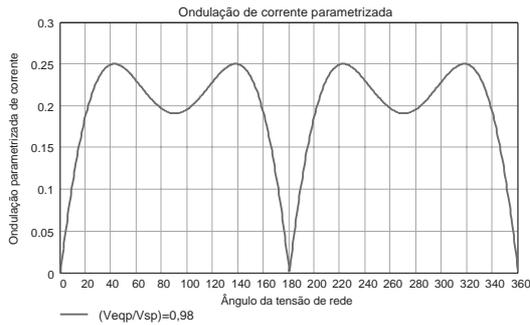


FIGURA 11 – Ondulação de corrente no indutor parametrizada no inversor à três níveis.

A malha de controle de corrente implementada é mostrada na figuras 12.

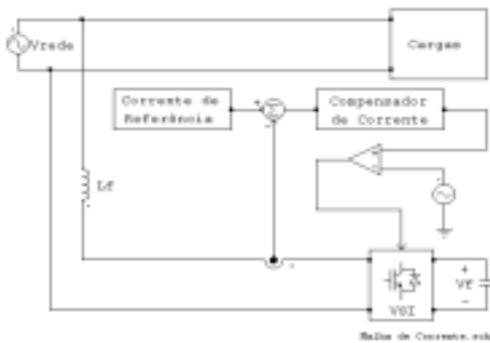


FIGURA 12 – Malha de controle de corrente.

A malha de controle de tensão implementada é mostrada na figuras 13.

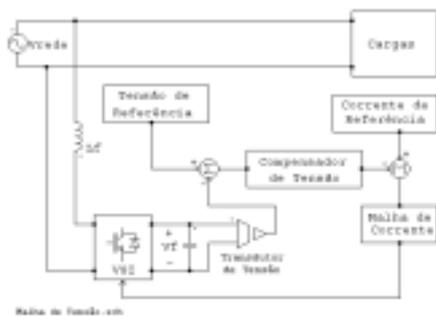


FIGURA 13 – Malha de controle de tensão.

A figura 14 apresenta os resultados de simulação obtidos para o filtro ativo proposto.

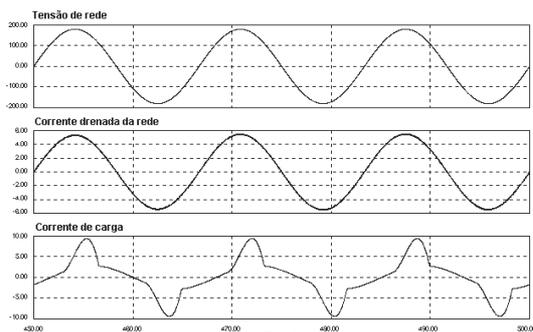


FIGURA 14 – Resultados de simulação.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CIRCUITO DE CONTROLE

A fim de demonstrar a validade dos modelos e equacionamentos empregados para determinação das malhas de controle, empregou-se um kit de desenvolvimento baseado no DSP Motorola, família DSP56F80x, para determinação da corrente de referência a ser seguida pelo inversor de tensão. A taxa de amostragem dos conversores AD (dos transdutores de corrente de carga e tensão de rede) foi de 15,36 kHz, resultando em 256 pontos em um ciclo de rede (60 Hz). O transdutor de corrente empregado foi um sensor Hall, modelo LA-50P. A tensão de rede foi amostrada através de um transformador de baixa frequência.

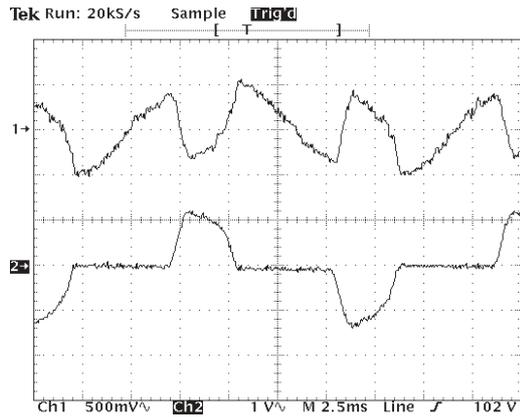


FIGURA 15 – Resultados experimentais.

### IV. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos até o momento comprovam a validade dos equacionamentos apresentados. A implementação do controle, a partir da monitoração da corrente de carga e tensão de rede permitem, além da determinação das correntes de referência, um monitoramento das grandezas elétricas para determinação dos parâmetros de qualidade de energia fornecidas. O circuito de controle, baseado numa plataforma de processamento digital Motorola DSP56F80x, demonstram a flexibilidade dos DSPs para controle de estruturas de filtragem ativa.

### V. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à equipe de coordenação COPEL, Eng. Maurício Robles Ortega e Eng. Maurício Valença, responsáveis pelas medições de qualidade de energia efetuadas em campo.

### VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E.Bettega, J.N.Fiorina, "Active Harmonic Conditioners and Unity Power Factor Rectifiers", Cahier Technique no.183, Schneider Electric, June 1999.
- [2] B.Singh, K.Al-Haddad, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.46, no.5, October 1999, pp.960-971.
- [3] H.Akagi, Y.Kanazawa, A.Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", IPEC'83 – International Power Electronics Conference, Tokyo, Japan, 1983, pp.1375-1386.
- [4] R.W.Erickson – "Fundamentals of Power Electronics", Kluwer Academic Publishers, 1999, 5th Printing, USA.