

# ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS ATIVOS E AMPLIFICADORES PWM PARA CORREÇÃO DE DISTORÇÕES DE CORRENTE EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO.

Octávio Ferreira Affonso

Roberto Marconato

Adnei Melges de Andrade

Mauro Yogui

Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP - IEE

Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289 - 05508-900 - Cidade Universitária - São Paulo - SP

e-mail: octavio@usp.br

**Resumo** - O presente artigo tem como objetivo comunicar resultados obtidos no desenvolvimento da tecnologia de projeto e operação de filtros ativos para a compensação de distorções de corrente devidas a cargas não-lineares. A escolha do amplificador PWM como elemento de potência é devida a suas características de baixas perdas e baixo custo, mesmo sendo previstos problemas com a filtragem.

**Palavras-chave** - filtros ativos, amplificadores PWM, qualidade de energia, cargas não-lineares, distorção harmônica, correção de distorção harmônica.

**Abstract** - This article presents the results obtained in the development of knowledge on the design and operation of active filters for the compensation of harmonic distortion of line current due to nonlinear loads. The reasons for choosing a PWM as the final power element are its low cost and low losses, even if filtering problems could be anticipated.

**Keywords** - active filters, PWM amplifiers, power quality, nonlinear loads, harmonic compensation.

## 1. INTRODUÇÃO

A proliferação de cargas elétricas não lineares disseminadas pela rede de distribuição das concessionárias de energia elétrica tem sido causa, na última década, de crescentes problemas de qualidade que têm influenciado negativamente nas relações entre consumidores e fornecedores de energia elétrica. Estes problemas, de que são vítimas os sensíveis equipamentos eletrônicos, são novos, mal estudados, em franco crescimento e tendendo a se agravar no futuro próximo devido ao aumento do número e da potência destas cargas não lineares.

A indústria não tem alternativa quanto ao uso de cargas ou equipamentos não lineares, devido aos avanços tecnológicos e à necessidade de economizar energia. A revista Business Week de 8 de abril de 1991 informava que a "poluição" elétrica estava custando cerca de 26 bilhões de dólares por ano em danos e atitudes preventivas, só nos Estados Unidos. E a "poluição" está aumentando, calculando-se que, para o fim do milênio, 60% da energia elétrica esteja circulando por cargas não lineares.

Uma grande ironia consiste em que a maior parte destas cargas não lineares são cargas eletrônicas, muitas delas altamente sensíveis à qualidade do suprimento elétrico que está sendo perturbada pela sua própria presença.

Um agravante adicional é o fato de que a maior parte destas cargas decorre de soluções em desenvolvimento, sem características muito definidas e sujeitas a modificações.

Esta situação levou o IEE a desenvolver um projeto de correção das distorções da corrente elétrica nas linhas de distribuição, com relação ao padrão senoidal desejável do ponto de vista de qualidade, por meio da injeção de correntes de compensação em contrafase às perturbações provocadas pelas cargas não lineares.

Esta solução tem o mérito de ser geral, independente das características das cargas não lineares individuais, e de poder ser aplicada a pontos convenientes da rede elétrica, quer do lado do consumidor, quer do lado da concessionária. São mais convenientes pontos em que ocorre a compensação de parte dos efeitos perturbadores entre as próprias cargas não-lineares, devido às diferenças das suas características.

Além disto, com certa semelhança funcional às vacinas orgânicas, esta é também uma solução eletrônica não-linear que vai se beneficiar do desenvolvimento das técnicas eletrônicas para se tornar mais fácil e mais barata, simultaneamente ao desenvolvimento do número e potência das cargas perturbadoras.

O acerto da aprovação deste projeto é verificado tanto pelos bons resultados alcançados no IEE, como pelo fato de, já hoje, os filtros ativos terem deixado de ser possibilidade teórica para serem solução economicamente recomendável para a compensação da parte variável das perturbações, especialmente quando usados em combinação com filtros passivos para a compensação de uma parte fixa das perturbações.

## 2) ESTUDO EXPERIMENTAL DOS AMPLIFICADORES PWM

Para facilitar o trabalho inicial com os amplificadores de potência foram adquiridos dois amplificadores PWM disponíveis no comércio, com saída através de transistores MOSFET. Os amplificadores PWM (amplificadores por modulação de largura de pulso, ou Pulse Width Modulation Amplifiers) são elementos de amplificação de potência que fornecem uma saída em onda quadrada, com amplitude constante e largura proporcional à amplitude do sinal de entrada. Por meio de filtragem do sinal de saída pode ser obtido um sinal de baixa frequência com amplitude proporcional à do sinal de entrada.

O uso de MOSFETs no estágio de saída de potência permite levar a frequência de chaveamento até 80 kHz (22 kHz no modelo usado na montagem). Isto é muito mais alto que os 2 a 5 kHz de frequência de chaveamento máxima que caracteriza os IGBTs, e permite, no modelo usado na montagem do filtro ativo, uma resposta plana até 3 kHz, que corresponde a uma harmônica de ordem  $h=50$  para frequência fundamental de 60 Hz.

Outra vantagem importante dos amplificadores PWM consiste nas suas baixas perdas internas, tipicamente uma ordem de grandeza abaixo das perdas internas dos amplificadores lineares. Isto permite rendimentos de cerca de 95% para os amplificadores PWM, além de corresponder a uma importante diminuição do tamanho e peso do amplificador, devido à diminuição da potência dissipada. Outro fator importante é o baixo custo do amplificador PWM com relação ao custo dos amplificadores lineares.

O estudo do comportamento dos amplificadores PWM adquiridos foi feito, inicialmente, utilizando uma fonte CC (corrente contínua) ajustável Tektronix PS 280. Esta foi substituída mais tarde por uma fonte CC projetada para permitir tensões ajustáveis dentro da faixa de interesse (20 a 80 VCC) com correntes de até 5 A, sem quedas de tensão apreciáveis.

Como o amplificador utilizado na montagem do filtro ativo tem saída em ponte H, a carga não pode ser aterrada, o que obriga ao uso de um transformador de isolamento. Esta é uma restrição importante, que torna os resultados do sistema muito dependentes das características do transformador. Um projeto modificado do amplificador poderia eliminar esta restrição, às custas de um aumento da complexidade e do custo do amplificador.

Os resultados obtidos estão disponíveis mas, como são extensos e não apresentam novidade técnica, não são apresentados neste trabalho.

### **3) CONSTRUÇÃO DE UM FILTRO ATIVO**

O passo mais relevante do projeto foi a construção de um protótipo de filtro ativo utilizando o PWM ensaiado (item 2) como amplificador de potência.

O conceito básico de operação foi objeto de longa consideração, especialmente sobre as vantagens e desvantagens das soluções digitais ou analógicas. A proposta implementada é pouco usual e utiliza, como elemento chave, um filtro analógico do tipo “elimina faixa” (notch-filter). As vantagens principais almejadas com este tipo de solução eram o baixo custo e a simplicidade da execução e da modificação das características do filtro.

A detecção de erro da malha de controle fica reduzida, neste caso, ao filtro elimina-faixa. Este filtro, executado com índice de mérito elevado e centrado na frequência da rede (60 Hz), elimina a componente fundamental e conserva, sem alteração, as componentes harmônicas da corrente de carga. Uma simplificação adicional, que tem como objetivo especialmente a possibilidade de trabalhar com cargas de potência bastante variável a tensões praticamente constantes, foi a eliminação do transformador de corrente como elemento sensor da corrente de carga e o uso da tensão de um “shunt” resistivo como fonte do sinal de corrente.

Para simplificar o acoplamento da saída do PWM ao sistema foram utilizados transformadores disponíveis no comércio para uso em iluminação. Como estes transformadores deixam bastante a desejar no seu comportamento em altas frequências, é de se esperar uma apreciável melhora de desempenho do filtro ativo quando for possível o uso de transformadores adequadamente projetados.

Com os vários componentes projetados, construídos e verificados quanto ao desempenho foi possível a montagem do sistema de compensação das correntes harmônicas na rede, de acordo com o diagrama de blocos da figura 1.

A carga utilizada consiste em uma lâmpada incandescente alimentada pela rede de 60 Hz através de um controlador de tensão (“dimmer”) realizado com um Triac com ângulo de disparo ajustável.

Para exagerar as harmônicas de tensão resultantes das harmônicas de corrente foi montada uma impedância série para aumentar as deformações na forma de onda de tensão observável no nó A, quando a corrente  $I_1$  é distorcida.

### **4) RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

O sistema de compensação de correntes harmônicas, em malha fechada, montado no item 3, foi submetido a verificação de desempenho, com resultados bastante satisfatórios se for considerada a precariedade de alguns dos componentes usados na montagem, tais como transformadores, reatores, capacitores de filtragem, etc.

Na figura 2 são apresentados os resultados obtidos para um ângulo de disparo do Triac igual a

90°, que corresponde aproximadamente às piores condições de uso (máximo sinal e potência da compensação).

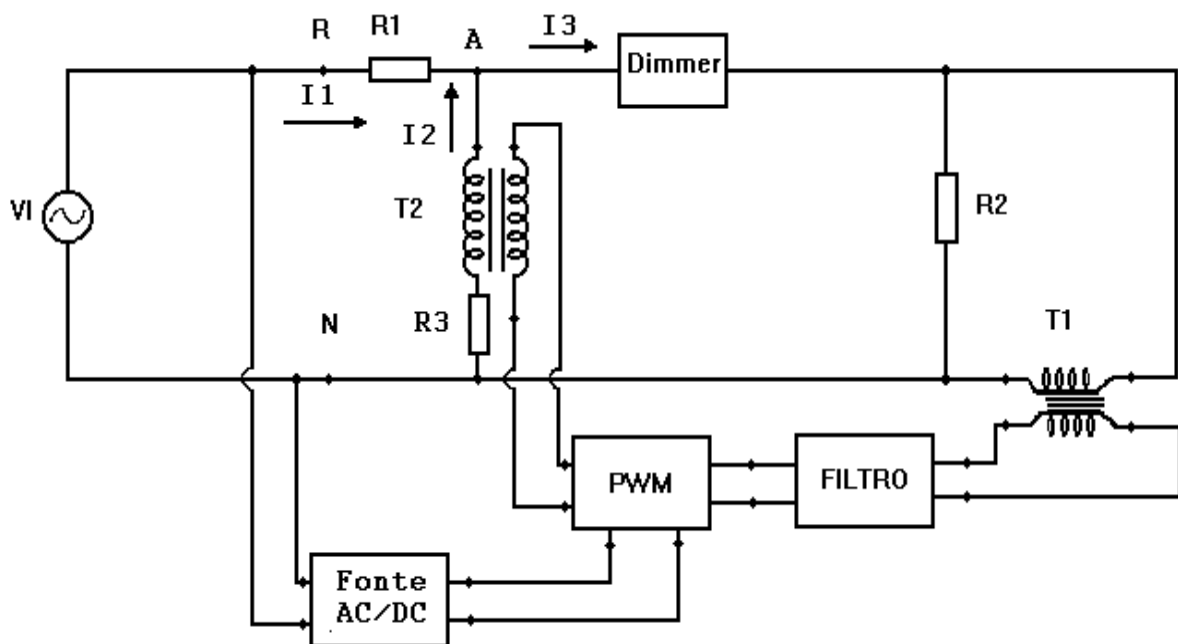
As formas de onda foram medidas com um osciloscópio digital Tektronix TDS 350, sendo medidas as tensões sobre R1, R2 e R3; os valores das correntes I1, I2 e I3 decorrem de imediato. Observe-se que as formas de onda não foram tomadas simultaneamente, mas uma de cada vez, pois o osciloscópio usado tem apenas 2 canais.

O pico que aparece em I1 pode ser explicado como sendo devido ao tempo de atraso na

propagação do sinal ao longo da malha principal e da malha de compensação. Como consequência, as frequências mais elevadas correspondentes ao tempo de chaveamento não foram devidamente compensadas. O uso de melhores componentes e maior elaboração dos filtros deve permitir a eliminação do problema.

A análise das formas de onda e do conteúdo harmônico permite concluir que a compensação é bastante satisfatória, especialmente quando considerado que se trata de uma condição de máxima solicitação.

**FIGURA 1**  
**DIAGRAMA DE BLOCOS DO FILTRO ATIVO EXPERIMENTAL**



**VI** - Fonte de tensão ( 127 V, 60 Hz ) da concessionária

**R1** - Resistência para aumentar a impedância da fonte V1

**R2** - Resistência de carga

**R3** - Resistência para permitir a medição de I3

**Dimmer** - Controle não linear da corrente de carga por ajuste do ângulo de disparo de um triac

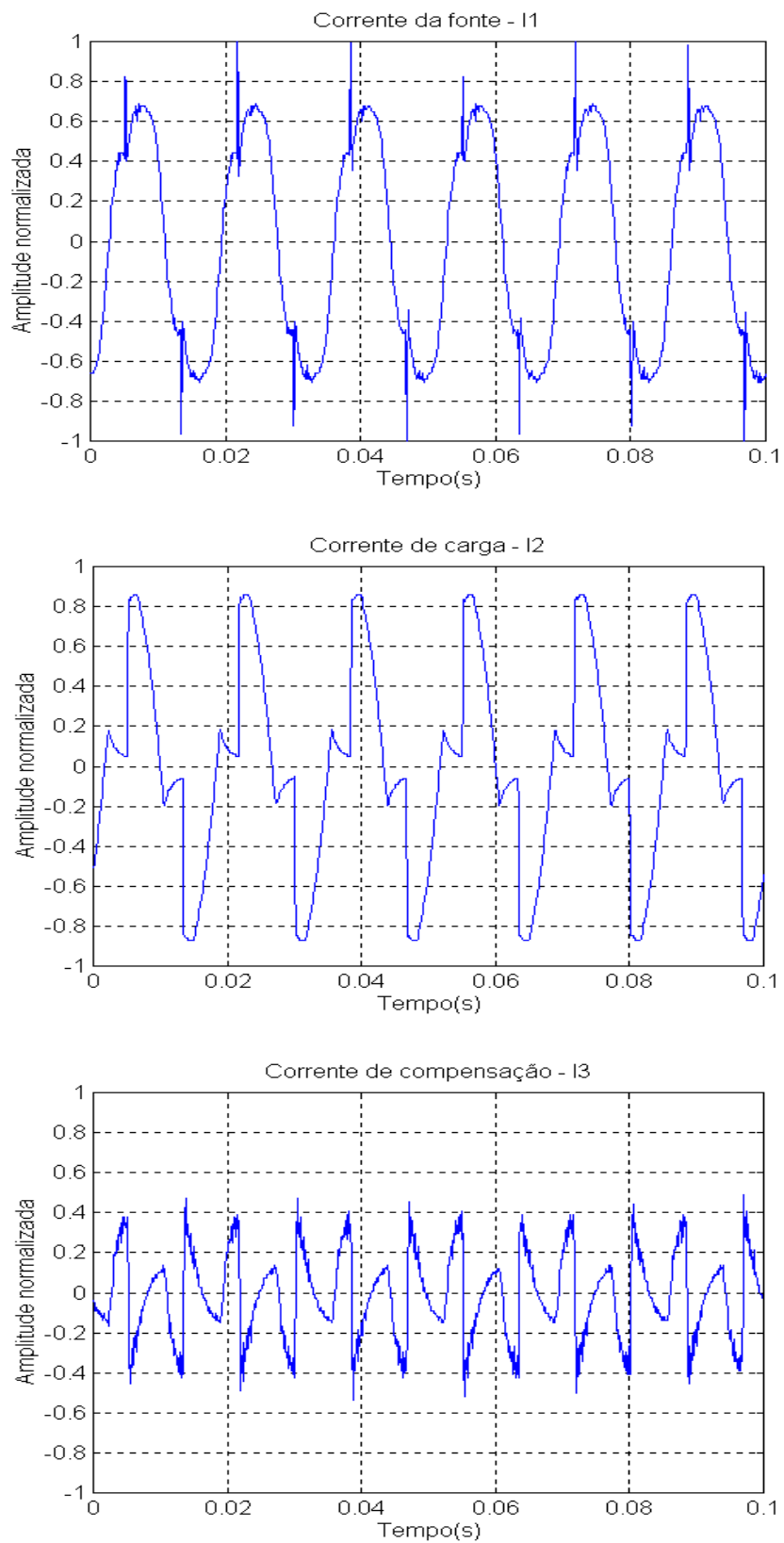
**T1** - Transformador ( 127/12 V ) para amostrar a forma de corrente na carga, I2

**Filtro** - Filtro elimina-faixa (notch-filter), atenuação = 50 dB @ 60 Hz

**PWM** - Amplificador de potência, tipo Pulse Width Modulation para injetar no circuito a corrente de compensação I3

**T2** - Transformador de saída (250 V/12 V) do amplificador PWM

**FIGURA 2**  
**FORMAS DE ONDA E ESPECTROS DE POTÊNCIA DOS SINAIS DE CORRENTE DO FILTRO ATIVO**



## FIGURA 2 - CONTINUAÇÃO

