

Filtro Ativo de Potência Paralelo Monofásico ANPC 5 Níveis utilizando Redes Neurais como Método de Compensação Seletiva de Harmônicos

Rodrigo Barriviera ¹

Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Campus Ivaiporã ¹
rodrigo.barriviera@ifpr.edu.br ¹

Edson Junior Acordi ²

Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Campus Paranaíba ²
edson.acordi@ifpr.edu.br ²

Rodrigo Augusto Modesto ³

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP) ³
rodrigomodesto@utfpr.edu.br ³

Ricardo Quadros Machado ⁴

Universidade de São Paulo (LAFAPÉ-EESC-USP) ⁴
rquadros@sc.usp.br ⁴

Resumo — Este trabalho apresenta uma estratégia de compensação ativa de potência de forma seletiva, de forma a gerar as correntes harmônicas de referência, que são utilizadas na malha de controle de um filtro ativo de potência paralelo monofásico com um conversor multinível ANPC 5 níveis. É possível através da estratégia seletiva, escolher quais componentes harmônicas presentes na corrente da carga poderão ser suprimidas. Esta estratégia consiste em um algoritmo baseado em redes neurais artificiais, a qual utiliza a rede adaline que calcula o vetor de pesos sinápticos que são os coeficientes da série de Fourier para a seleção das componentes harmônicas de forma adaptativa através da regra delta. De forma a validar o desenvolvimento teórico, são apresentados os resultados de simulações.

Palavras-chaves — Qualidade de Energia, Conversor Multinível ANPC 5 Níveis, Filtro Ativo de Potência Paralelo, Harmônicos, Redes Neurais Artificiais.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm sido utilizados com frequência em aplicações industriais, comerciais e residenciais equipamentos baseados na eletrônica de potência conectados à rede elétrica, como fontes chaveadas, retificadores controlados e não controlados para o acionamento de máquinas CC, inversores para o acionamento de máquinas CA, cicloconversores, dentre outros. Estas cargas, cujas características são não-lineares, drenam da rede elétrica elevadas correntes harmônicas ao interagirem com a impedância da linha resultando em distorções na tensão da rede elétrica, mais especificamente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) do sistema elétrico [1]. Tensões e/ou correntes harmônicas são um dos principais problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) encontrados nos sistemas elétricos de potência.

Assim, a circulação de correntes harmônicas na rede elétrica pode causar, redução do Fator de Potência (FP), aumento de ruídos na frequência audível, aquecimento excessivo de transformadores, bem como oscilações eletromagnéticas de torque em motores elétricos [2].

Pode-se citar outro problema relacionado com a QEE quando se têm cargas não-lineares monofásicas conectadas em sistemas elétricos trifásicos a quatro-fios. Existe a circulação de correntes harmônicas pelo condutor de neutro, devido à existência de componentes harmônicas de sequência zero e seus múltiplos mesmo que estas cargas estejam perfeitamente balanceadas [3].

Uma alternativa para minimizar os problemas causados pelas cargas não-lineares é a utilização de Filtros Ativos de Potência Paralelos (FAPPs) [4,5]. Estes normalmente são utilizados para compensação da potência reativa da carga, bem como supressão de harmônicos de corrente. O FAPP consiste em injetar na rede elétrica correntes de compensação, iguais e em fase oposta de forma a cancelar as correntes harmônicas e/ou compensar os reativos da carga.

Em algumas situações existe a necessidade de se fazer a compensação de somente algumas componentes harmônicas da corrente das cargas, reduzindo assim a potência a ser processada pelo FAPP, o que resulta em um aumento da eficiência do sistema. No entanto, para que seja possível a compensação seletiva das componentes harmônicas é necessário gerar correntes de referência que contenham somente as componentes que se deseja compensar. Os métodos mais comumente utilizados para gerar as correntes de compensação não possibilitam compensações seletiva das componentes harmônicas [8-16]. Neste artigo é apresentada uma proposta de utilização de uma rede neural artificial para a geração de correntes de compensação seletiva de componentes harmônicos.

Atualmente um dos enfoques de pesquisa em Eletrônica de Potência consiste na busca de dispositivos semicondutores de potência capazes de conduzir elevadas correntes e paralelamente suportar grandes valores de tensão quando bloqueados. Assim, de modo a garantir uma operação em níveis elevados de tensão ou corrente e melhorar a confiabilidade da associação série e paralela de alguns tipos de chaves semicondutoras de potência pode-se recorrer a diversos recursos, tais como os conversores multiníveis que são utilizados neste trabalho. Ademais, os conversores multiníveis

são utilizados neste trabalho para possíveis operações com tensões e potências mais altas.

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com a Fig. 1 a corrente de uma carga não-linear i_L é composta por duas componentes, a componente fundamental i_f , que pode ser as parcelas ativa e/ou reativa, e as componentes harmônicas i_h . A fonte de alimentação precisa fornecer somente a parcela ativa de potência para a carga na forma ideal. Assim sendo, a corrente da fonte i_s deverá ser igual a componente fundamental da corrente da carga i_f . Portanto, o FAPP deve-se comportar como uma fonte de corrente não-senoidal, fornecendo as componentes harmônicas e reativas da corrente da carga. A corrente injetada na rede pelo FAPP i_c de ser igual à soma das componentes harmônicas i_h com a parcela fundamental reativa da carga. Assim, o FAPP fornece a parcela fundamental reativa da carga afim de realizar também a correção do Fator de Deslocamento (FD) ou fator de potência fundamental (IEEE Std 1459-2010) [6].

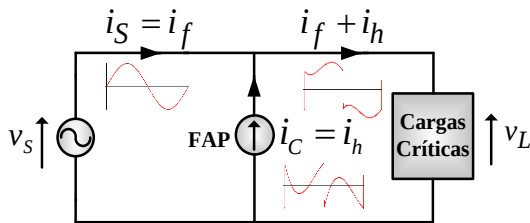


Fig. 1. Princípio de compensação de um FAPP

Muitas estratégias têm sido empregadas para a obtenção das correntes de referência de compensação a serem utilizadas pelos FAPPs, de tal modo que proporcione um bom desempenho ao sistema [7]. Inicialmente estes métodos foram propostos para sistemas trifásicos equilibrados [8] e desequilibrados [9].

A partir dos métodos de compensação ativa para sistemas trifásicos, apresentaram propostas de métodos com modificações que possibilitaram serem utilizados em sistemas monofásicos. [10-12].

Existem também outras propostas de métodos de compensação ativa empregando técnicas de processamento digital de sinais, tais como, filtragem adaptativa, transformada rápida de Fourier, redes neurais artificiais dentre outras [13-16].

Ademais é apresentado uma rede neural artificial que calcula os coeficientes da Série de Fourier para gerar os sinais de referências para um FAPP monofásico, de forma a eliminar harmônicos e reativos totais ou somente as componentes harmônicas desejadas (seletor harmônico) geradas por cargas não lineares.

III. TOPOLOGIA DO FAPP MONOFÁSICO

O conversor utilizado para implementar o FAPP monofásico e validar o algoritmo de geração de referências baseado em redes neurais é o inversor de tensão multinível ANPC 5 níveis mostrado na Fig. 2.

A. Conversor Multinível ANPC 5 Níveis

A idéia principal dos conversores multiníveis consiste em repartir a tensão ou corrente total de um conversor entre um número determinado de conversores menores. É possível em determinados casos, obter níveis intermediários de tensão ou corrente que viabilizam a síntese de uma forma de onda alternada em degraus, com baixa distorção harmônica. De tal modo que o principal objetivo é a redução de perdas e melhoria da estabilidade mecânica dos acionamentos de motores CA.

Os conversores multiníveis tipo Active Neutral Point Clamped (ANPC) de cinco níveis foram apresentados por [17]. Esta estrutura é uma continuidade do conversor ANPC de três níveis no qual foi inserido um capacitor de fase e mais duas chaves estáticas de potência na saída do conversor, realizando assim o aumento do número de níveis de três para cinco, e subsequentemente, desta maneira pode-se aumentar ainda mais o número de níveis deste tipo de estrutura [18].

Neste caso, o conversor multinível ANPC cinco níveis monofásico apresentado na Fig. 2, têm-se fundamentalmente dois estados de comutação para conectar o terminal de saída (corrente alternada) ao ponto médio (ponto neutro) do barramento CC, um estado positivo U , um estado negativo $-U$, dois estados $-U+U/2$ e $U-U/2$ no qual $U/2$ representa a tensão sobre o capacitor de fase quando está descarregado ou carregado e dois estados $U/2$ e $-U/2$. A tensão sobre o capacitor de fase (C_f) varia entre $-U/2$ e $U/2$, [18].

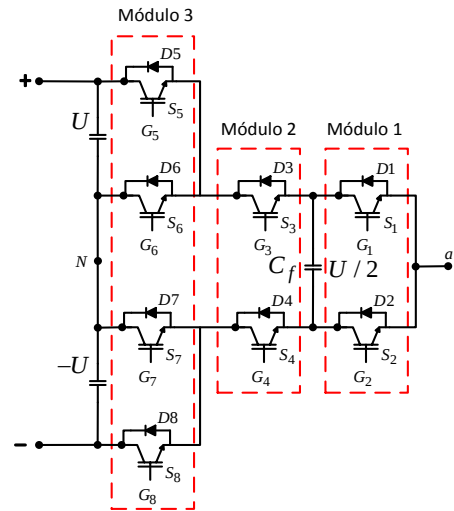


Fig. 2. Active Neutral Point Clamped (ANPC) – 5 níveis monofásico

A tensão de fase assume cinco níveis de tensão entre o ponto neutro central e ponto de saída: $-U$, $-U/2$, 0 , $U/2$ e U , no qual são numerados entre 0 e 4, respectivamente. De acordo com esses níveis, para a geração dos pulsos das chaves é necessário obter a tensão sobre o capacitor de fase (flutuante) V_{Cf} , a corrente de saída i_x e a tensão de referência $V_{ref\{R,S,T\}}$ para equilibrar de forma ativa a tensão sobre os capacitores de fase [18], constituindo em decidir qual estado de chaveamento será realizado de acordo com as oito chaves.

B. Topologia Completa do FAPP Monofásico

O FAPP consiste em um inversor multinível ANPC 5 níveis com um indutor de acoplamento na saída L_f , conectado em paralelo com a rede as cargas de acordo com a Fig. 3.

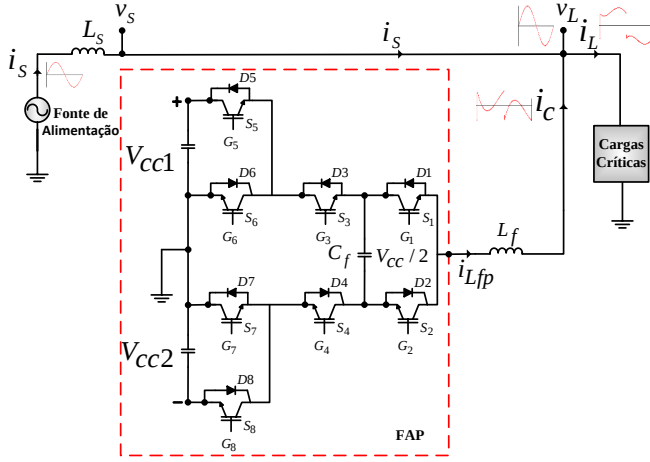


Fig. 3. Filtro Ativo de Potência Paralelo

A respectiva função de transferência em malha fechada $FTMFi(s)$ de controle da corrente do FAPP obtida pelo modelo do conversor e utilizando um controlador PI é dada por (1).

$$FTMFi(s) = \frac{Kp_s s + Ki_s [K_{PWM} (V_{cc} / 2)]}{L_{eqs} s^2 + [Kp_s K_{PWM} (V_{cc} / 2) + R_{eqs}] s + Ki_s K_{PWM} (V_{cc} / 2)} \quad (1)$$

O diagrama em blocos do FAPP monofásico atuando como fonte de corrente de compensação determinado pelo método descrito posteriormente é mostrado na Fig. 4.

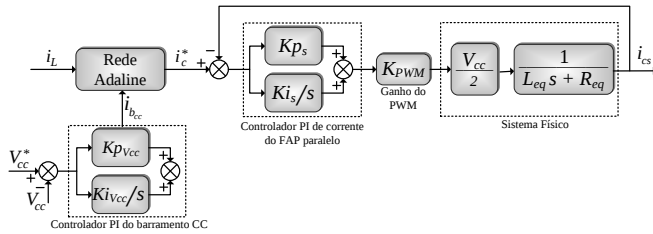


Fig. 4. Diagrama em blocos da malha de controle de corrente

IV. REDE ADALINE PARA GERAÇÃO DA CORRENTE DE COMPENSAÇÃO

As Redes Neurais Artificiais (RNA) apresentam uma tecnologia baseada em técnicas computacionais inspiradas na estrutura neural biológica, ou seja, são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos. Têm a capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento e podem ser determinadas como um conjunto de unidades de processamento, caracterizadas por neurônios artificiais que são interligados por um grande número de interconexões [21]. Os atributos mais atrativos consistem em elevadas habilidades em mapear sistemas não-lineares, aprendendo os comportamentos envolvidos a partir de informações adquiridas.

A Fig. 5 apresenta o diagrama de um neurônio artificial, que representa uma rede adaline composta de um neurônio [21]. Este neurônio é composto por um vetor de entradas X , um vetor de pesos sinápticos W e uma função de ativação $g(\cdot)$. Considerando a função de ativação uma função linear, a saída y é simplesmente a soma dos elementos do vetor de entrada ponderados pelos pesos sinápticos, de acordo com a equação (2).

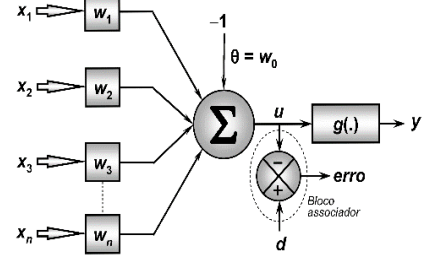


Fig. 5. Rede Adaline de único neurônio

Fonte: Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas. 2010. p. 74.

$$y = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots + w_n x_n \quad (2)$$

O vetor W pode ser ajustado necessariamente por duas formas. A primeira através de um treinamento supervisionado (off-line), e a segunda através de um treinamento não supervisionado (on-line).

No entanto, é apresentado neste trabalho uma rede neural adaptativa de um único neurônio, usada para calcular os coeficientes da série de Fourier das correntes da carga conforme mostrado na Fig. 6 [19]. O vetor de pesos é ajustado pela regra delta [20] de forma on-line, no qual demanda um esforço computacional maior, mas, pode ser aplicado para todo tipo de carga.

A partir do sinal desejado y_d que é igual à corrente da carga, quando y for muito próximo de y_d o vetor de pesos W corresponde aproximadamente aos coeficientes da série de Fourier da corrente da carga, que pode ser escrita pela equação (3).

$$y_d(k) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega k T_s) + \sum_{n=1}^N B_n \cos(n\omega k T_s) \quad (3)$$

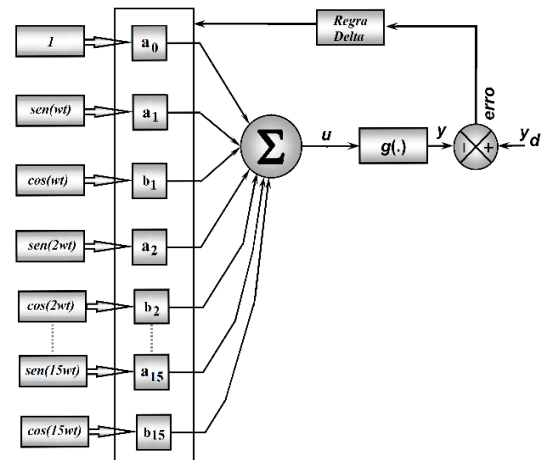


Fig. 6. Aproximação com série de Fourier do sinal y_d com a rede Adaline

As amplitudes e os ângulos de fase são dados por (4) e (5).

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4)$$

$$\phi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (5)$$

A corrente de compensação i_{cref} a ser processada pelo FAPP será a saída do seletor harmônico contendo as amplitudes das componentes harmônicas que se deseja compensar mais a ação de controle do controlador do barramento CC multiplicado por um vetor unitário síncrono $\cos(\omega t)$, onde ωt representa a posição angular da tensão da rede que é obtido pelo algoritmo de sincronismo (PLL), que deve ser imune a distorções presente na rede elétrica [22]. A corrente da carga i_L menos a saída da rede adaline gera um erro que é o sinal de entrada para regra delta que tem a função de minimizar este erro ajustando o coeficiente da série de Fourier. O diagrama de blocos da Fig. 7 apresenta o algoritmo para geração das correntes de compensação i_{cref} conforme a harmônica desejada.

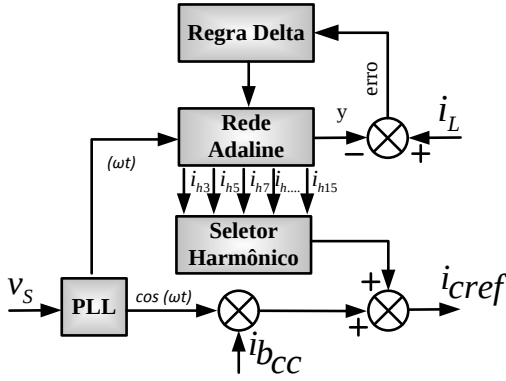


Fig. 7. Diagrama em blocos para geração das correntes de compensação com seletor harmônico

V. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais foram realizadas no software MATLAB/Simulink®. Portanto, foi possível avaliar a estrutura completa FAPP monofásico, contendo os algoritmos baseado na rede neural artificial adaline, sistema de controle, conversor multinível ANPC 5 níveis, modulação *Phase Shifted* (PS) [23] e os elementos de filtragem conforme apresentado na Fig. 3. A carga utilizada é um retificador monofásico de onda completa com cargas RL acopladas. Os principais parâmetros utilizados nas simulações estão mostrados na Tabela 1.

TABELA I. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

Tensão eficaz da rede elétrica	127V
Frequência da rede elétrica	60Hz
Indutor de acoplamento do FAPP	1mH
Tensão do barramento CC	400V
Capacitância do barramento CC	4700μF
Capacitância do capacitor de fase	3300μF
Frequência de chaveamento do inversor	2Khz
Retificador Monofásico de Onda Completa - Carga R	7,5Ω
Retificador Monofásico de Onda Completa - Carga L	200mH

De forma a validar a rede Adaline para a geração das correntes de compensação total e parcial, se faz necessário inicialmente apresentar os resultados da rede calculando a corrente de algumas cargas não lineares conectadas a um sistema monofásico.

A corrente calculada pela rede neural adaline y , a corrente de carga i_L drenada da rede elétrica e a amplitude da parcela fundamental da corrente da carga A_I estimada pela rede são apresentadas na Fig. 8.

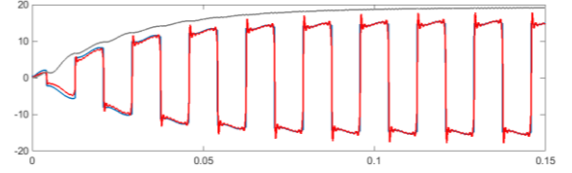


Fig. 8. Corrente calculada pela rede y , corrente da carga i_L e a amplitude da parcela fundamental da corrente da carga A_I

A Fig. 9 apresenta a tensão na carga v_L e a corrente da carga não-linear i_L e seu espectro harmônico é mostrada na Fig. 10 com uma taxa de 48,33% de distorção harmônica. Já a tensão na rede v_s e a corrente da rede com compensação total i_s com uma taxa de 3,87% de distorção harmônica mostradas na Fig. 11 de acordo com [19].

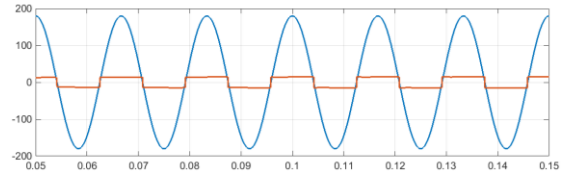


Fig. 9. Tensão na carga v_L e a corrente na carga i_L

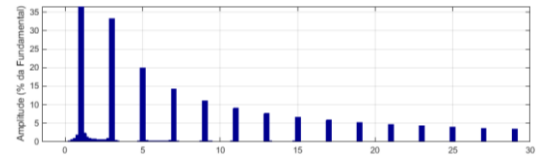


Fig. 10. Ordem dos harmônicos na corrente na carga i_L

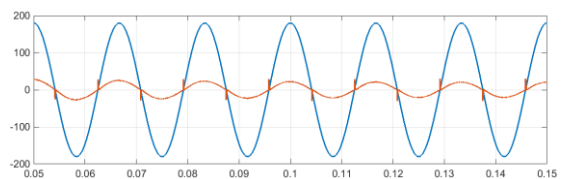


Fig. 11. Tensão na rede v_s e a corrente na rede i_s

O comportamento da tensão no barramento CC, corrente de carga e entrada após um degrau de carga de 100% é mostrado na Fig. 12 e Fig. 13.

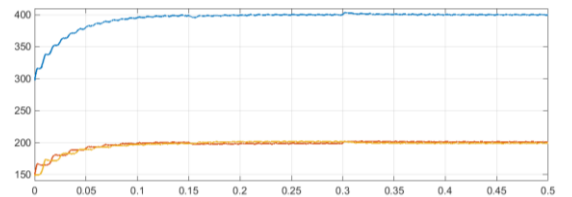


Fig. 12. Tensão total no barramento CC e Tensões nos capacitores do barramento CC

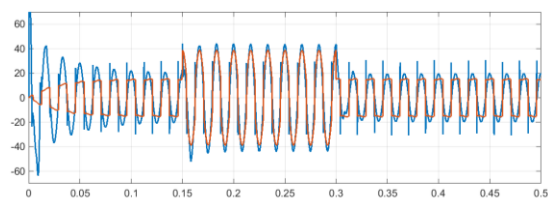


Fig. 13. Corrente da carga i_L e a corrente da rede i_s

Os harmônicos de 3ª a 15ª ordem foram selecionados para serem suprimidos sucessivamente. Primeiramente na Fig. 14 é mostrada a corrente de entrada somente com a compensação da 3ª harmônica. Na Fig. 15 é apresentada o espectro harmônico da corrente de entrada com compensação da 3ª harmônica.

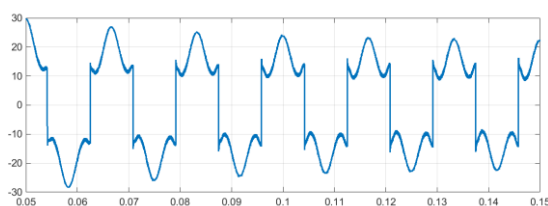


Fig. 14. Corrente da entrada com compensação de 3ª ordem

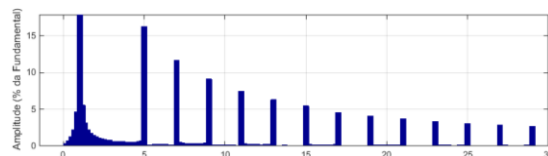


Fig. 15. Espectro harmônico da corrente de entrada com compensação de 3ª ordem

Na Fig. 16 é mostrada a corrente de entrada com compensação da 3ª e 5ª harmônica. Na Fig. 17 é apresentada o espectro harmônico da corrente de entrada com compensação da 3ª e 5ª harmônica.

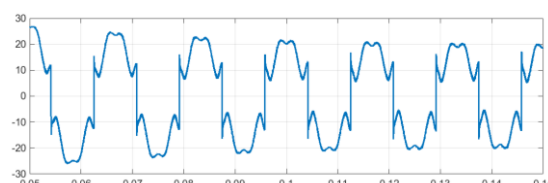


Fig. 16. Corrente da entrada com compensação de 3ª e 5ª ordem

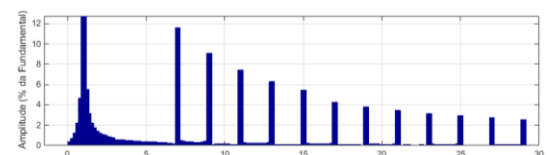


Fig. 17. Espectro harmônico da corrente de entrada com compensação de 3ª e 5ª ordem

Na Fig. 18 é mostrada a corrente de entrada com compensação da 3ª, 5ª e 7ª harmônica. Na Fig. 19 é apresentada o espectro harmônico da corrente de entrada com compensação da 3ª, 5ª e 7ª harmônica. Na Fig. 20 é mostrada a corrente de entrada com compensação da 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª e 15ª harmônica. Na Fig. 21 é apresentada o espectro

harmônico da corrente de entrada com compensação da 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª e 15ª harmônica.

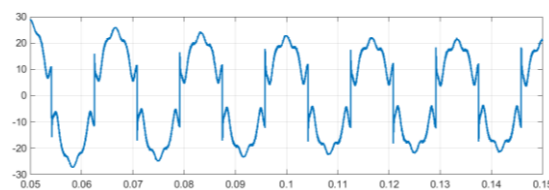


Fig. 18. Corrente da entrada com compensação de 3ª, 5ª e 7ª ordem



Fig. 19. Espectro harmônico da corrente de entrada com compensação de 3ª, 5ª e 7ª ordem

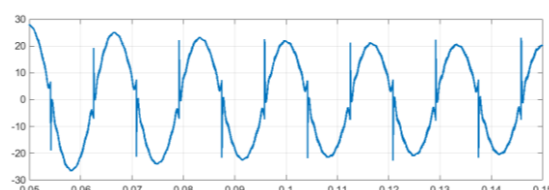


Fig. 20. Corrente da entrada com compensação de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª e 15ª ordem

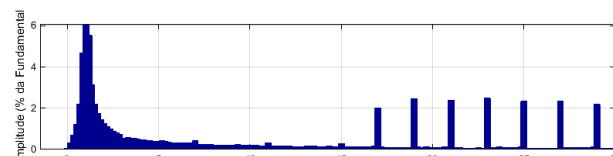


Fig. 21. Espectro harmônico da corrente de entrada com compensação de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª e 15ª ordem

Pode-se observar em todos os casos, que apenas as componentes harmônicas correspondentes aos harmônicos escolhidos são atenuados. A Tabela 2 apresenta a Distorção Harmônica Total individual dos harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª e 15ª.

TABELA 2. DHT DOS HARMÔNICOS DE 3ª A 15ª ORDENS

Corrente	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª
i_s	0.6%	0.3%	0.62%	0.1%	0.5%	0.1%	0.4%

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de uma estratégia seletiva para a geração das correntes de compensação harmônica, por meio de redes neurais artificiais, as quais foram utilizadas nas malhas de controle do FAPP monofásico com conversor multinível ANPC 5 níveis, para eliminação de harmônicos gerados por cargas não lineares.

A topologia utilizada na rede neural foi uma rede adaline, de forma a calcular o vetor de pesos sinápticos que representam os coeficientes da série de Fourier. Foi utilizada a regra delta de forma on-line para ajustar o vetor de pesos, o que possibilita a rede neural calcular os coeficientes da série de Fourier para qualquer tipo de carga conectada ao sistema elétrico. Com os

coeficientes da série de Fourier calculados, possibilitou a compensação seletiva das componentes harmônicas. Assim podendo reduzir as perdas do conversor que são mais significativas em aplicações de potências mais elevadas.

Foram apresentados resultados baseados em simulações computacionais de forma a validar o desenvolvimento teórico. Por meio dos resultados obtidos, ficou demonstrado que é possível através da estratégia de compensação proposta selecionar quais as componentes harmônicas presente na corrente da carga serão suprimidas pelo FAPP monofásico. Apresentando uma solução atrativa somando se as vantagens dos conversores multiníveis principalmente quando empregado em sistemas de alta potência.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Kamran, F. and Habetler, T., A Novel On-Line UPS with Universal Filtering Capabilities, IEEE/PESC'95, pp. 500-506, 1995.
- [2] Dugan, R. C. e Mcdermott, T. E. Distributed generation: Operating conflicts for distributed generation interconnected with utility distribution systems. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 8, pp. 19-25, 2002.
- [3] CRUZS, T. M. A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems. Industry Applications, IEEE Transactions on., v. 26, n. 4, pp. 719 – 725, July/Aug. 1990.
- [4] AREDES, M. Active Power Line Conditioners. Dr-Ing. Thesis, Technische Universität Berlin, 1996.
- [5] AKAGI, H. Active Harmonics Filters. Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2128 – 2141, Dec. 2005.
- [6] IEEE Std. 1459-2010. Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. March. 2010.
- [7] Ribeiro, S. H. J., Martins, J. S., Afonso, J. L., Avaliação de Diferentes Técnicas de Análise de Sistemas Elétricos Com Formas de Onda Não-Sinusoidais, IV SBQEE, 2001.
- [8] Akagi H., Kanazawa Y., Akira A. Instantaneous Reactive Power Compensators Switching Devices Without Energy Storage Components, IEEE, pp. 825-830, 1989.
- [9] Bhattacharya S., Divan D. M. and Banerjee B. B., Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter, EPE'91, Vol. 3, pp. 30-35, 1991.
- [10] Liu J., Yang J., Wang Z., A New Approach For Single-Phase Harmonic Current Detecting and its Application in a Hybrid Active Power Filter, IEEE/IECON, pp. 849-854, 1999.
- [11] Silva, S. A. O., Modesto, R. A., Active Power Line Compensation Applied to a Three-Phase Line Interactive UPS System Using SRF Method, IEEE/PESC, pp. 2358-2362, 2005.
- [12] Silva, S. A. O. and Modesto, R. A., A Comparative Analysis of SRF-based Controllers Applied to Active Power Line Conditioners. 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON, pp. 405-410, 2008.
- [13] Pereira, R. R., Silva C. H., Borges L. E., Torres G., Application of Adaptive Filters in Active Power Filters, IEEE/COBEP, pp. 770-774.
- [14] Han, B., (2009) Single-phase active power filter using FFT with harmonic phase-delay compensation, IEEE/PES, 2009.
- [15] Nascimento, C. F., Junior, A. A. O., Goedtel, A., Silva, I. N. and Serni, P. J. A. Neural Network-Based Approach for Identification of the Harmonic Content of a Nonlinear Load in a Single-Phase System. IEEE Latin America Transactions, vol. 8, no. 1, pp. 65-73, 2010.
- [16] Campanhol, L. B. G.; Goedtel, A.; Silva, S. A. O.; Nascimento, C. F. Utilização de Rede Neural Artificial na Geração das Correntes de Compensação de um Filtro Ativo de Potência Paralelo Trifásico. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, pp. 522-527, 2011.
- [17] Brückner T., Bernet S., Güldner H. The active NPC converter and its loss-balancing control. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, pp. 855– 868, June 2005.
- [18] Barbosa P., Steimer P., Steinke J., Winkelkemper M., Celanovic N. Active-neutral-point-clamped (ANPC) multilevel converter technology. In: Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Recife, Brasil, p. 10, Jun. 2005.
- [19] Modesto, R. A., Silva, S. A. O., Oliveira, A. A. J., Barriviera, R. Método de Compensação Ativa de Potência utilizando Redes Neurais Artificiais aplicado a um Filtro Ativo de Potência Paralelo Monofásico. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 4833, Fortaleza, Out. 2013.
- [20] Silva, I. N. da, Spatti, D. H. e Flauzino, R. A. Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas. Artliber, 2010.
- [21] Widrow, B., Hoff, M. E. Adaptive switching circuits. Proceedings of the IRE Wescon Convention Record, pp. 96-104, 1960.
- [22] Silva, S. A. O., Campanhol, L. B. G., Goedtel, A., Nascimento, C. F. and Paão, D. A Comparative Analysis of p-PLL Algorithms for Single-Phase Utility Connected Systems. 13th European Power Electronics Conference and Applications, 2009.
- [23] Zaragoza J., Pou J., Ceballos S., Robles E., Jaen C., Corbalan M. Voltage-balance compensator for a carrier-based modulation in the neutral-point-clamped converter. In: IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 2, pp. 305– 314, Feb. 2009.