

MÉTODO DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE POTÊNCIA UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADO A UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO MONOFÁSICO

RODRIGO A. MODESTO¹, SÉRGIO A. O. DA SILVA¹, AZAURI A. DE OLIVEIRA JR.², RODRIGO BARRIVIEIRA³.

1. *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP)
Av. Alberto Carazzai, 1640, Cornélio Procópio, PR, CEP 86.300-000
E-mails: rodrigomodesto@utfpr.edu.br, augus@utfpr.edu.br*

2. *Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo (EESC-USP)
E-mail: azauri@sc.usp.br*

3. *Departamento de Eletrotécnica, Instituto Federal do Paraná, Campus Ivaiporã (IFPR)
E-mail: rodrigo.barrivieira@ifpr.edu.br*

Abstract— This work presents an active power compensation method, used to obtain the reference currents in a single-phase shunt active power filter (FAP) for harmonic current suppression and reactive power compensation. The neural network consists of an adaptive network, in which the unsupervised training is used to estimate the peak amplitude of the fundamental load current component. The performance of the proposed artificial neural network is evaluated by computer simulation.

Keywords— Active Power Filter, Artificial Neural Network, Harmonics, Power Quality.

Resumo— Este trabalho apresenta um método de compensação ativa de potência, utilizado para a geração das correntes de referência de um filtro ativo de potência paralelo (FAP) monofásico para supressão de correntes harmônicas e compensação de reativos. A rede neural consiste em uma rede adaptativa, onde o treinamento da rede é feito de forma não supervisionada com objetivo de estimar o pico da componente fundamental da corrente da carga. O desempenho da rede neural proposta é validado via simulação computacional.

Palavras-chave— Filtro Ativo de Potência Paralelo, Redes Neurais Artificiais, Harmônicos, Qualidade de Energia.

1 Introdução

Nos últimos anos a preocupação pela qualidade de fornecimento e consumo de energia elétrica tem aumentado de forma considerável, principalmente pela proliferação de cargas não lineares em todos os níveis dos sistemas de energia (doméstico, comercial e industrial) (Kamran e Habetler, 1995). Estas cargas são importantes fontes geradoras da degradação da qualidade da energia utilizada, criando perturbações e/ou distorções na tensão e/ou corrente. Pelo fato dessas cargas drenarem correntes não senoidais da rede, diversos problemas são provocados no sistema elétrico e nas suas instalações, tais como:

- Baixos níveis do fator de potência da instalação;
- Altas taxas de distorções harmônicas da tensão da rede elétrica devido à circulação de harmônicos de corrente na mesma;
- Interferência em equipamentos e instrumentos sensíveis;
- Sobre dimensionamento de condutores elétricos e transformadores.

Ainda que as cargas não lineares tenham seu estágio de entrada, na maioria das vezes, conversores eletrônicos de potência e terem como consequência uma resposta não linear para uma excitação senoidal, causando os problemas citados anteriormente, sob outro ponto de vista, estes permitem que os equipamentos e processos no qual fazem parte sejam mais baratos fáceis de controlar e em alguns aspectos mais eficientes.

Na busca da minimização dos problemas, estão sendo feitas diversas pesquisas sendo que muitas delas apresentam resultados bastante relevantes e expressivos.

Pode-se citar a grande utilização do pré-regulador BOOST onde o próprio equipamento controla a redução do conteúdo harmônico e corrige o fator de potência, visto que a maioria das cargas não lineares utilizam na sua entrada retificadores monofásicos ou trifásicos, que apresentam bons resultados quando projetados com o pré-regulador. Porém, em equipamentos que já estão em funcionamento o custo e os detalhes da implementação podem inviabilizar o uso desta técnica, visto que exige a modificação da planta em questão.

Neste sentido os estudos sobre sistemas de filtragem de potência buscam alternativas para atenuar

estes problemas nas instalações e nos sistemas de energia. Principalmente na última década foram propostas novas possibilidades topológicas de filtros de potência, assim como diferentes estratégias de controle, devido à evolução da tecnologia eletrônica tanto em nível de semicondutores de potência como em nível de circuitos de controle. Também, veem sendo realizadas atualizações periódicas nas normas relativas às distorções e perturbações, com regulamentações cada vez mais restritas.

A solução mais comum, ainda utilizada em algumas aplicações industriais para a supressão de harmônicos de corrente e compensação da energia reativa na frequência fundamental, é a utilização de filtros passivos conectados em paralelo aos terminais das cargas não lineares. Os filtros passivos são robustos, no entanto são pesados e volumosos.

A utilização de filtros ativos conectados em paralelo com o sistema de fornecimento de energia elétrica soluciona problemas de ressonância paralela e série, que pode ser causadas pelos filtros passivos. Normalmente, estes filtros ativos são formados por inversores funcionando como fonte de corrente. Sua impedância de saída é alta diminuindo a possibilidade de ressonâncias entre filtro e a linha nas frequências harmônica características de ordem baixa (Peng, Akagi e Nabae, 1993).

Geralmente os Filtros Ativos de Potência Paralelos (FAP) implementados isoladamente são usados para eliminar harmônicos e compensar reativos da carga. Estes filtros injetam correntes de compensação, iguais e em fase oposta, para cancelar as correntes harmônicas e/ou compensar reativos.

2 Definição do Problema

O filtro ativo paralelo comporta-se como fonte de corrente não senoidal, fornecendo para o sistema correntes harmônicas de mesma amplitude, mas de fase oposta às geradas pelas cargas não lineares. A fonte de alimentação fica responsável em fornecer somente a parcela fundamental da corrente de carga ($i_s = i_f$), ou seja, para o sistema existe somente uma carga linear com corrente senoidal. O fator de deslocamento $\cos\phi$ pode ser corrigido se a parcela fundamental reativa da carga for considerada no algoritmo de geração de referências do FAP, obtido pelos métodos de compensação. A figura 1 apresenta um circuito monofásico simplificado que ilustra o FAP paralelo.

O bom desempenho do FAP paralelo está relacionado diretamente com o método utilizado para gerar os sinais de compensação (Ribeiro, Martins e Afonso, 2001). Tais métodos foram inicialmente propostos para sistemas trifásicos equilibrados (Akagi, Kanazawa e Akira, 1989) e desequilibrados (Bhattacharya, Divan e Banerjee, 1991).

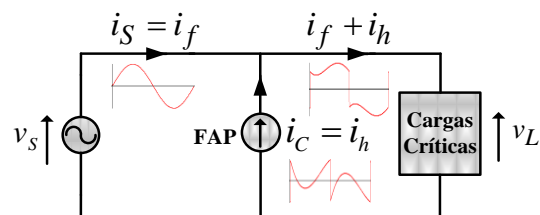


Figura 1. Princípio da compensação de um FAP

Para sistemas monofásicos existem na literatura propostas de métodos de compensação ativa baseados nos métodos inicialmente propostos para sistemas trifásicos, com modificações que possibilitam a implementação para sistemas monofásicos (Liu, Yang e Wang, 1999; Silva e Modesto, 2005; Silva e Modesto, 2008).

Outros métodos de compensação ativa utilizando técnica de processamento digital de sinais têm sido propostas, tais como, filtragem adaptativa, transformada rápida de Fourier, redes neurais artificiais dentre outras (Pereira et al., 2009; Han, 2009; Nascimento et al., 2010; Campanhol et al., 2011).

Baseado no exposto é apresentado uma rede neural artificial para gerar os sinais de referências para um FAP paralelo monofásico, para eliminar harmônicos e reativos gerados por cargas não lineares.

3 Topologia do FAP Monofásico

Qualquer inversor bidirecional em corrente pode operar como filtro ativo. Tanto inversores de tensão (VSI – Voltage Source Inverter) como inversores de corrente os (CSI – Current Source Inverter). Nos inversores de tensão deverá haver um controle no barramento CC para que a tensão sobre ele fique constante tornando-o capaz de fornecer a rede corrente necessária através do indutor de acoplamento L_f . Nos inversores de corrente a energia é armazenada em um indutor L no barramento CC, onde a corrente é modulada e injetada na rede. A corrente no barramento CC deverá ser maior que o valor de pico de corrente da carga a ser compensada, acarretando em perdas significativas no indutor L . As perdas em condução também são elevadas pelo fato que no CSI os diodos estão em série com as chaves, ou seja, o número de semicondutores conduzindo é o dobro.

O conversor utilizado para implementar o FAP monofásico e validar o algoritmo de geração de referências baseada em redes neurais é o inversor de tensão em ponte completa apresentado na figura 2.

Considerando o sistema físico como sendo o inversor mais o indutor L_f , na figura 3, as funções de transferência estão representadas como $G_i(s)$ do inversor e $G_p(s)$ da planta onde é considerado o indutor de acoplamento mais uma resistência série.

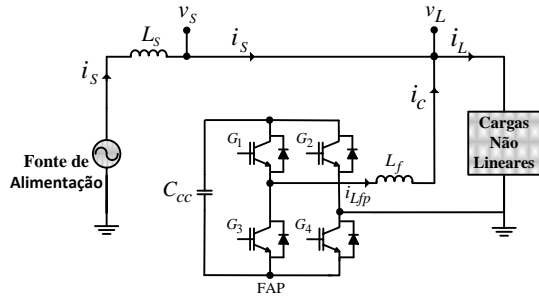


Figura 2. Filtro ativo de potência paralelo

Considerando que a função de transferência de um controlador PI $G_{ci}(s)$ é representada pela equação (1) e que através de um sensor de corrente na saída do inversor $H_i(s)$ nós podemos fechar a malha de controle de corrente que está apresentada pelo diagrama em blocos da figura 4.

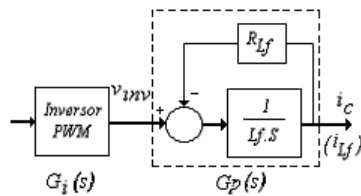


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema físico do FAP

$$G_{ci}(s) = \frac{K_P s + K_I}{s} \quad (1)$$

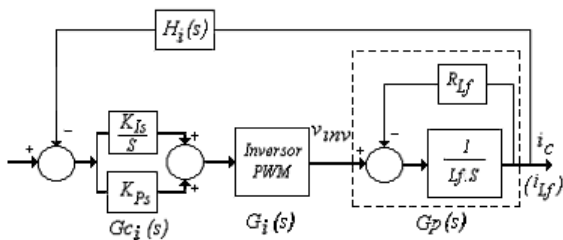


Figura 4 – Diagrama em blocos do controle de corrente

A função de transferência de malha fechada $FTMF_i(s)$ é dada pela equação (2).

$$FTMF_i(s) = \frac{K_P s + K_I}{L_f \cdot s^2 + (K_P + R_{Lf})s + K_I} \quad (2)$$

O diagrama em blocos do FAP operando como fonte de corrente de compensação gerada pelo método descrito no item seguinte é mostrado na figura 5.

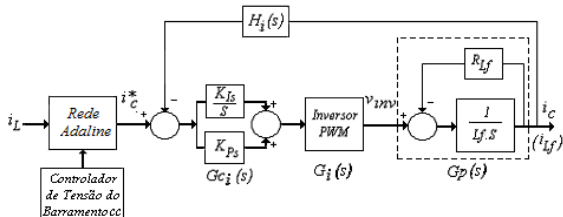


Figura 5 – Diagrama em blocos da malha de controle de corrente

4 Rede Adaline para Geração da Corrente de Compensação

As RNAs representam uma tecnologia baseada em técnicas computacionais inspiradas na estrutura neural biológica, com o intuito de simular o cérebro humano. Estas possuem a capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento e podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento, caracterizadas por neurônios artificiais que são interligados por um grande número de interconexões (Silva, Spatti e Flauzino, 2010).

A figura 6 mostra o diagrama de um neurônio artificial, a qual representa uma rede adaline de um neurônio. Esse 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, como mostrado pela equação 3.

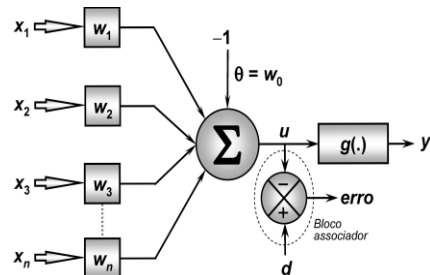


Figura 6 – Rede Adaline de único neurônio

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

$$y = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots + w_n x_n \quad (3)$$

O vetor W pode ser ajustado basicamente por duas formas. Uma delas através de um treinamento supervisionado (off-line), a outra com treinamento não supervisionado (on-line).

Neste trabalho é apresentada uma rede neural adaptativa de um único neurônio, utilizada para calcular os coeficientes da série de Fourier das correntes da carga (figura 7). O vetor de pesos é ajustado pela regra delta (Silva, Spatti e Flauzino, 2010) de forma on-line, o que demanda um esforço computacional maior, no entanto, pode ser aplicado para todo tipo de carga.

Considerando o sinal y_d igual à corrente da carga, quando y for muito próximo de y_d o vetor de pesos W corresponde aos coeficientes da série de Fourier da corrente da carga, que pode ser escrita pela equação (4).

$$y_d(k) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\omega k T_s) + \sum_{n=1}^N B_n \cos(n\omega k T_s) \quad (4)$$

As amplitudes e os ângulos de fase são dados

pela equação (5) e (6), respectivamente.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

$$\phi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (6)$$

A corrente de compensação i_{cref} a ser processada pelo FAP será a corrente da carga i_l menos a parcela fundamental da corrente da carga i_f . A corrente fundamental da carga é obtida pelo cálculo da amplitude da parcela fundamental da corrente da carga A_l e multiplicando por $\cos(\omega t)$ fornecido por algum algoritmo de sincronismo (PLL) o qual deve ser imune a distorções presente na rede elétrica (Silva et. Al, 2009). O diagrama em blocos da figura 8 apresenta o algoritmo para geração das correntes de compensação i_{cref} baseada em uma rede neural adaline.

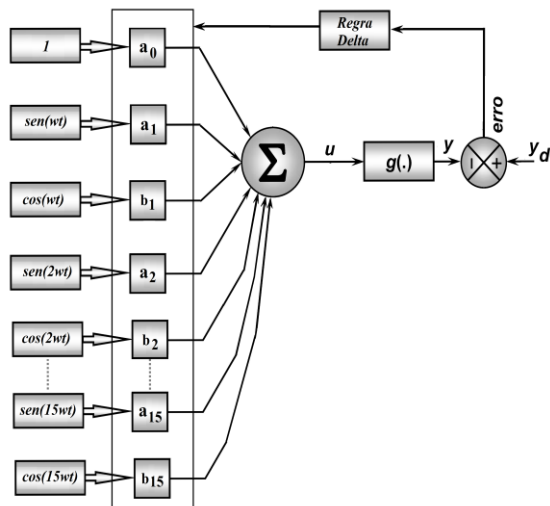


Figura 7 – Aproximação com série de Fourier do sinal y_d com a rede adaline.

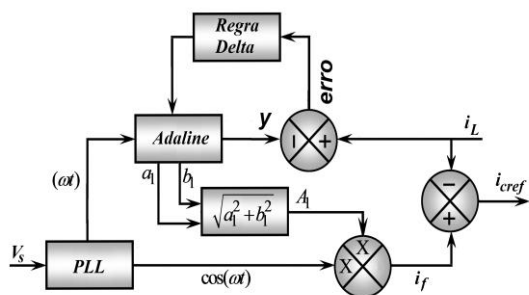


Figura 8 – Diagrama em blocos para geração das correntes de compensação i_{cref}

5 Resultados

Para validação da rede adaline na geração das correntes de compensação, inicialmente são apresentados resultados da rede calculando a corrente de algumas cargas não lineares conectadas

a um sistema monofásico.

Na figura 9 são apresentadas a corrente calculada pela rede neural adaline y , a corrente da carga i_l drenada da rede e a amplitude da parcela fundamental da corrente da carga A_l estimada pela rede.

Para avaliar a dinâmica dos ajustes do vetor de pesos que é feito de forma *on-line* pela regra delta, na figura 10 estão apresentadas a corrente calculada pela rede y , a corrente da carga i_l e a amplitude da parcela da carga A_l .

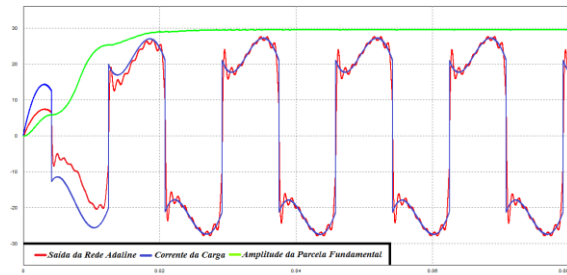


Figura 9 – Corrente calculada pela rede y , corrente da carga i_l e a amplitude da parcela fundamental da corrente da carga A_l

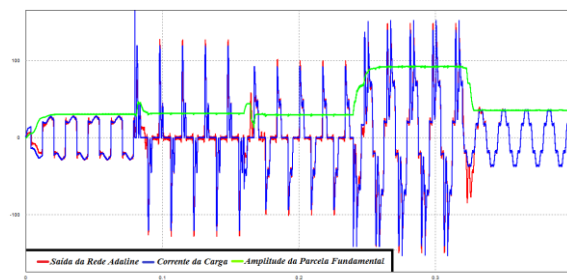


Figura 10 – Corrente calculada pela rede y , corrente da carga i_l e a amplitude da parcela fundamental da corrente da carga A_l

Para validar a aplicação da rede adaline na geração das correntes de compensação, o FAP paralelo monofásico foi simulado no programa de simulação PSIM, onde o inversor opera com frequência de chaveamento de 20 kHz. A compensação das correntes harmônicas, bem como de reativos, gerados por uma carga composta por um retificador monofásico em ponte completa alimentando uma carga R-L, onde $R=7,25\Omega$ e $L=20mH$.

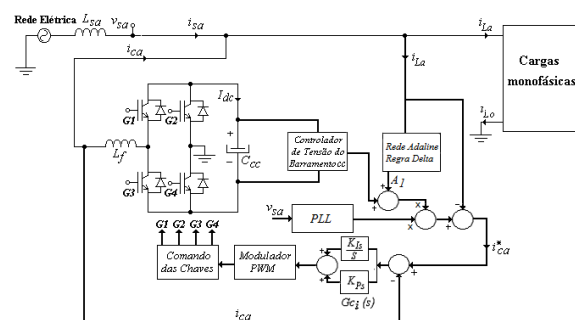


Figura 11 – Filtro ativo paralelo monofásico

6 Conclusões

A figura 12 apresenta a tensão na carga v_l e a corrente da carga não linear i_l . A corrente fornecida pela fonte i_s , bem como a tensão são mostradas na figura 13. Para avaliar o desempenho dos controladores na figura 14 está a corrente de referência i_{cref} e a corrente injetada na rede pelo FAP.

O comportamento da tensão no barramento CC após um degrau de carga de aproximadamente 80 % é apresentado na figura 15.

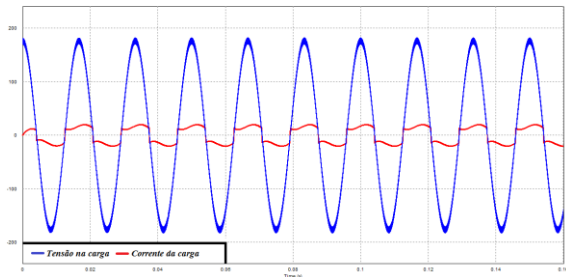


Figura 12 – Tensão na carga v_l e a corrente da carga i_l

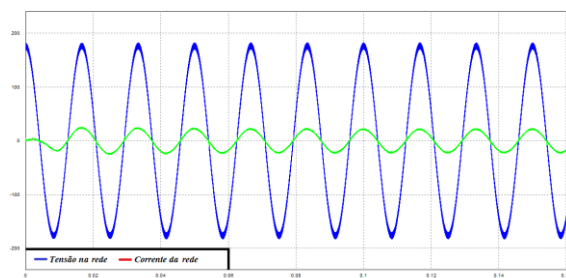


Figura 13 – Tensão na rede v_s e a corrente da rede i_s

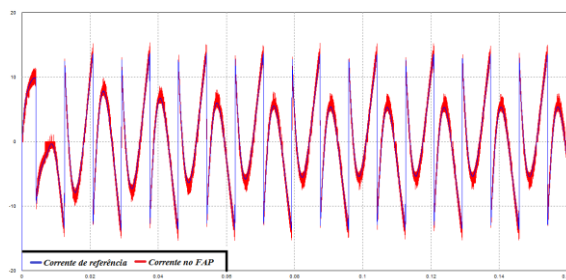


Figura 14 – Corrente de referência i_{cref} e a corrente do FAP i_c

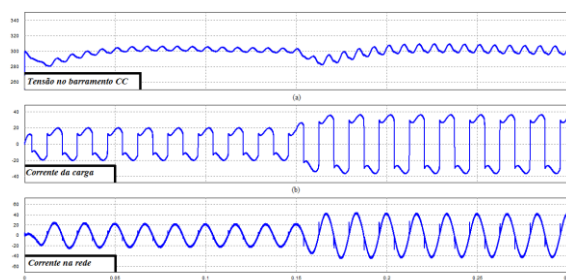


Figura 15 – Tensão no barramento CC (a), corrente da carga (b) e a corrente da rede (c)

Este trabalho apresentou um método alternativo, baseado em redes neurais artificiais, para obtenção das correntes de referência de compensação, a serem utilizadas por um FAP monofásico, para eliminação de harmônicos gerados por cargas não lineares.

A rede adaline foi utilizada para calcular os coeficientes da série de Fourier, cujo próprio vetor de pesos sinápticos são os coeficientes da série de Fourier. O vetor de pesos foi ajustado com a utilização da regra delta de forma on-line, o que demanda um maior esforço computacional, mas que se faz necessário devido às características dinâmicas das cargas conectadas ao sistema elétrico.

A validação da rede adaline, bem como, a estratégia de controle adotada foi comprovada por intermédio das simulações do FAP monofásico, apresentando mais uma alternativa para a melhoria da qualidade de energia elétrica.

Referências Bibliográficas

- Akagi H., Kanazawa Y., Akira A. (1989) Instantaneous Reactive Power Compensators Switching Devices Without Energy Storage Components, IEEE, pp. 825-830.
- Bhattacharya S., Divan D. M. and Banerjee B. B., (1991) Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter, EPE'91, Vol. 3, pp. 30-35.
- Campanhol, L. B. G.; Goedel, A.; Silva, S. A. O.; Nascimento, C. F. (2011) 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.
- Kamran, F. and Habetler, T., (1995) A Novel On-Line UPS with Universal Filtering Capabilities, IEEE/PESC'95, pp. 500-506.
- Liu J., Yang J., Wang Z., (1999) A New Approach For Single-Phase Harmonic Current Detecting and its Application in a Hybrid Active Power Filter, IEEE/IECON, pp. 849-854.
- Nascimento, C. F., Junior, A. A. O., Goedel, A., Silva, I. N. and Serni, P. J. A. (2010) 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.
- Peng F. Z., Akagi H. and Nabae A., (1992) Compensation Characteristics of a Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 29, nº 1, January/February.

- Pereira, R. R., Silva C. H., Borges L. E., Torres G., (2009) Application of Adaptative Filters in Active Power Filters, IEEE/COBEP, pp. 770-774.
- Ribeiro, S. H. J., Martins, J. S., Afonso, J. L., (2001) Avaliação de Diferentes Técnicas de Análise de Sistemas Eléctricos Com Formas de Onda Não-Sinusoidais, IV SBQEE.
- Silva, S. A. O., Modesto, R. A., (2005) Active Power Line Compensation Applied to a Three-Phase Line Interactive UPS System Using SRF Method, IEEE/PESC, pp. 2358-2362.
- Silva, S. A. O. and Modesto, R. A., (2008) 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.
- Silva, I. N. da, Spatti, D. H. e Flauzino, R. A. (2010a). Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas. Artliber.
- Silva, S. A. O., Campanhol, L. B. G., Goedtel, A., Nascimento, C. F. and Paíão, D. (2009). A Comparative Analysis of p-PLL Algorithms for Single-Phase Utility Connected Systems. 13th European Power Electronics Conference and Applications.
- Han, B., (2009) Single-phase active power filter using FFT with harmonic phase-delay compensation, IEEE/PES.