

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA OBTENÇÃO DAS CORRENTES DE REFERÊNCIA DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO TRIFÁSICO COM TOPOLOGIA *FOUR-LEGS*

EDSON J. ACORDI¹, MÁRIO OLESKOVICZ², IVAN N. DA SILVA², SÉRGIO A. O. DA SILVA³

1. Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Câmpus Ivaiporã
PR466 - Gleba Pindaíva Secção C, Parte 2 – Ivaiporã PR
E-mail: edson.acordi@ifpr.edu.br

2. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo (USP) – São Carlos
Universidade de São Paulo - Câmpus de São Carlos
Av. Trabalhador São-carlense, 400, Arnold Schimidt
São Carlos - São Paulo - Brasil - CEP 13566-590
E-mails: olesk@sc.usp.br, insilva@sc.usp.br

3. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP)
Av. Alberto Carazzai, 1640, Cornélio Procópio, PR, CEP 86300-000
E-mail: augus@utfpr.edu.br

Abstract— This paper presents a proposal for implementation of a parallel active power filter (FAPP) using an artificial neural network to estimate the reference currents. In this approach, the FAPP will act to reduce the harmonic content generated by non-linear loads and reactive power compensation. The FAPP constituted with the topology of a four-leg inverter, making use of a Multilayers Perceptron neural network in the generation system of compensation currents, which is trained to estimate the fundamental component of the load current. The promising results obtained by simulations are presented to demonstrate the performance of FAPP in suppressing current harmonics and reactive power.

Keywords— Active Power Filter, Harmonics, Artificial Neural Networks, Electrical Power Quality.

Resumo— Este trabalho apresenta uma proposta de implementação de um filtro ativo de potência paralelo (FAPP) utilizando uma rede neural artificial para estimar as correntes de referência. Nesta abordagem, o FAPP atuará na redução do conteúdo harmônico gerado por cargas não lineares e na compensação de potência reativa. O FAPP constituído com a topologia de um inversor four-legs, faz uso de uma rede neural do tipo *Perceptron* Multicamdas (*PMC*) no sistema de geração das correntes de compensação, a qual é treinada para estimar a componente fundamental da corrente da carga. Os promissores resultados obtidos por meio de simulações são apresentados para demonstrar o desempenho do FAPP na supressão de harmônicos de corrente e de potência reativa.

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

1 Introdução

Os avanços tecnológicos na área da eletrônica de potência têm contribuído muito para o desenvolvimento de equipamentos capazes de tornar a execução de determinadas tarefas, sejam elas domésticas, comerciais ou industriais mais simples. No entanto, a crescente utilização de tais equipamentos, como exemplo, os conversores estáticos, principalmente por parte das indústrias, traz alguns inconvenientes como a degradação da qualidade da energia elétrica (QEE). Nesse contexto, a eletrônica de potência tem papel fundamental para garantir o processamento eficiente da energia elétrica (Abdalla; Rao; Perumal, 2010)

Muitos dos equipamentos eletrônicos são alimentados diretamente pela rede elétrica, e mais de 50% possuem um conversor estático de potência que, quando em operação, pode deformar a corrente elétrica de entrada, aumentando consideravelmente o seu conteúdo harmônico. Esta deformação prejudica a QEE elétrica da rede bem como pode afetar outros

equipamentos alimentados pela mesma. Além de prejudicar a QEE, estes equipamentos, por possuírem um baixo fator de potência, forçam a rede elétrica a fornecer mais energia do que aquela consumida pela carga diminuindo, desta forma, o seu rendimento. A busca constante por novas tecnologias, bem como o aperfeiçoamento das que já são bem conhecidas, se faz necessária, não somente para satisfazer as normas técnicas que regulamentam a utilização destes equipamentos, mas também para reduzir os gastos de consumo em quase todos os setores da economia, contribuindo, desta forma, para a melhoria da eficiência energética, atualmente tão difundida em todo o mundo.

O princípio de operação dos FAPPs é injetar/drenar corrente no ponto de conexão da rede com a carga de forma que as correntes drenadas da rede por cargas não lineares sejam idealmente senoidais. Para o correto funcionamento do FAPP, a estratégia a ser utilizada para se determinar as correntes a serem compensadas é um aspecto de extrema importância, assim como a técnica de controle aplicada, a qual deve ser capaz de fazer que

o filtro imponha de modo adequado as correntes de compensação. Além da compensação dos harmônicos de corrente, o filtro também pode compensar a potência reativa da carga bastando modificar a estratégia de geração das correntes de referência (Abdalla; Rao; Perumal, 2011; Hamoudi et al., 2006).

As principais topologias que permitem o controle da corrente de neutro são conhecidas como *Split-Capacitor*, *Three-Full Bridge* e a *Foru-Legs*. Um estudo detalhado sobre os modelos matemáticos envolvendo as topologias *Four-Legs* e a *Three-Full Bridge* é mostrado em Acordi et al. (2012).

Diversas técnicas para extração das correntes de compensação para filtros ativos de potência foram propostas, tais como o método baseado no sistema de eixos de referência síncrona (*SRF*), inicialmente proposto por Bhattacharya et al. (1991) e algumas variações como mostrado em Silva et al. (2008). Outros métodos baseados em redes neurais artificiais são mostrados em Farahat (2004) e Campanhol (2011).

Este trabalho apresenta um método alternativo para estimar as correntes de compensação de um FAPP trifásico com a topologia de um inversor *four-legs* por meio de uma rede neural artificial, a qual é treinada com uma carga formada por um retificador monofásico de onda completa com vários valores de cargas (Resistivo-Indutiva) a fim de formar o domínio para o treinamento da RNA, estabelecendo a faixa de potência de trabalho do FAPP.

A rede neural utilizada é do tipo *Perceptron Multicamadas (PMC)* e esta é treinada para estimar o valor da componente fundamental da corrente da carga, permitindo deste modo obter-se a corrente harmônica da carga, a qual em conjunto com o sistema de sincronismo do FAPP com a rede, é possível determinar as correntes de compensação que devem ser injetadas na rede para a supressão de harmônicos e reativos.

Para validar o método proposto, alguns resultados contemplando simulações são apresentados, mostrando a eficácia do FAPP na capacidade de suprimir as correntes harmônicas.

2 Inversor *Four-Legs* Empregado no Fapp

A topologia do inversor *Four-Legs* utilizado, é apresentada na Figura 1. Esta topologia permite a compensação total da corrente que flui pelo condutor, não apresentando problemas de resposta dinâmica como a estrutura de um inversor *Split-Capacitor*. Deste modo, esta topologia é mais adequada para aplicações onde se deseja compensar as correntes de sequência zero (Mendalek, 2009).

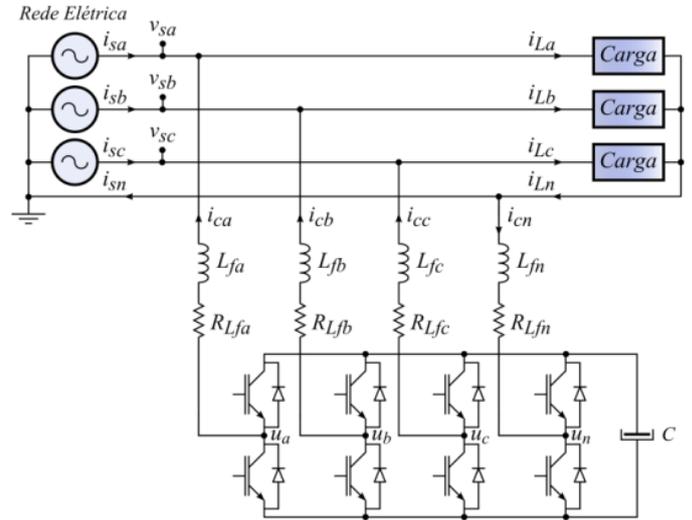


Figura 1. Topologia do FAPP *Four-Legs*.

3 Extração das Correntes de Referência Por Meio Do Sistema Tradicional (*SRF*)

Neste método, as correntes de carga (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) são medidas e transformadas do sistema trifásico de coordenadas estacionárias (abc) para o sistema bifásico de coordenadas estacionárias ($\alpha\beta 0$) como apresentado em (1).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Assim, as correntes do sistema de coordenadas ($\alpha\beta$) podem ser transformadas no sistema bifásico de referência síncrona (dq) por meio de (2), onde $\sin(\theta)$ e o $\cos(\theta)$ são os vetores unitários síncronos obtidos de um sistema *PLL (Phase-Locked Loop)* sincronizado com o sistema elétrico.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Deste modo, as correntes no sistema síncrono dq , são compostas por uma parcela contínua e outra alternada. A parcela contínua representa os termos fundamentais ativo e reativo das correntes de carga, e a parcela alternada representa as componentes harmônicas, as quais podem ser extraídas por meio do uso de um filtro passa alta, como mostrado na Figura 2.

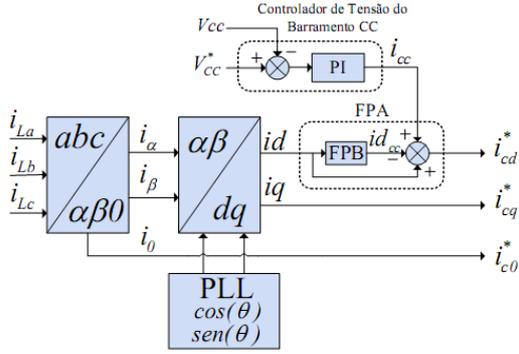


Figura 2. Topologia do FAPP Four-Legs.

A corrente de eixo direto (i_d) representa a soma da parcela de corrente ativa fundamental e a parcela de corrente harmônica da carga. Aplicando um filtro passa baixa (FPB) na corrente i_d , obtém-se a parcela i_{dc}^* , que representa a corrente ativa fundamental no eixo síncrono. Com isso, a componente alternada, que representa a parcela harmônica, é obtida subtraindo-se a corrente total de eixo direto i_d da parcela i_{dc}^* . Deste modo, o resultado representa somente a parcela harmônica da corrente de carga. A corrente de eixo em quadratura i_q representa a soma da parcela reativa fundamental e a parcela harmônica da corrente de carga. A corrente i_q não é filtrada, como pode ser observado na Figura 3, pois assim, é possível a compensação da parcela reativa da corrente de carga.

As correntes de referência de compensação (i_{cd}^* , i_{cq}^* , i_{c0}^*) mostradas na Figura 3, são então levadas a controladores PI (Proporcional-Integral) e depois são novamente transformadas para o sistema de coordenadas estacionárias ($\alpha\beta$) por meio da equação (3).

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}^* \\ v_{\beta}^* \\ v_0^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{cd}^* \\ v_{cq}^* \\ v_{c0}^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde, v_{cd}^* , v_{cq}^* e v_{c0}^* são as respectivas saídas dos controladores PI dos eixos $dq0$.

4 Aplicação da Rede Neural Artificial Para Estimar a Corrente Fundamental da Carga

Atualmente, muitas aplicações sobre QEE envolvendo as redes neurais artificiais têm sido propostas na literatura (Fernandes, Ricardo A. S.; Silva, I. N.; Oleskovicz, 2010). Neste trabalho, foi utilizada uma rede neural do tipo *perceptron* multicamadas para estimar a componente fundamental da corrente de carga. A estrutura utilizada é mostrada na Figura 3.

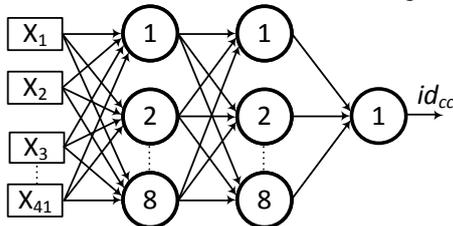


Figura 3. Estrutura da RNA.

Como pode ser observada na Figura 3, a estrutura da rede neural é composta de 41 entradas as quais representam o número de amostras para cada meio ciclo do sinal da corrente da carga. O vetor de entrada X contém os 41 valores da corrente de carga de eixo direto, i_d . Já o valor desejado para a única saída da RNA, contém somente o valor da componente fundamental da corrente da carga de eixo direto, i_{dc}^* . Além disso, a primeira e a segunda camada escondida é composta de 8 neurônios.

A função de ativação utilizada nas camadas escondidas foi a tangente hiperbólica. Já para a camada de saída foi utilizada a função linear. Para o treinamento da rede foi utilizado o conjunto de cargas mostradas na Tabela 1. Nota-se que foram utilizadas 10 curvas caracterizando diferentes valores de potências onde as cargas são desequilibradas, o que irá proporcionar uma melhor capacidade de generalização da RNA. Para cada curva foram obtidos 12 ciclos, totalizando 9.840 amostras (82 amostras por ciclo x 12 ciclos x 10 curvas).

TABELA 1 - PARÂMETROS DAS CARGAS PARA O TREINAMENTO DA RNA

Curva	Resistência Fase 'a' [Ω]	Resistência Fase 'b' [Ω]	Resistência Fase 'c' [Ω]	Indutores Fase 'a', 'b' e 'c' [mH]
1	2	3	4	150
2	4	5	8	150
3	6	7	10	150
4	8	9	12	150
5	10	11	15	150
6	12	13	18	150
7	14	15	21	150
8	16	17	24	150
9	18	19	27	150
10	20	21	30	150

A faixa de potência considerada para o treinamento da RNA, foi definida de 700 VA até aproximadamente 5 kVA, conforme os valores estabelecidos na Tabela 1.

Na Figura 4 é mostrada a topologia da carga que foi utilizada nas simulações, a qual é caracterizada como uma carga não linear. Os dados obtidos da simulação foram condicionados em matrizes para possibilitar o treinamento da RNA. Os parâmetros de treinamento da rede são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO TREINAMENTO

Rede	<i>Perceptron</i> Multicamadas
Taxa de Aprendizagem	0,005
Algoritmo de Treinamento	<i>Levenberg-Marquardt</i>
Avaliação do Desempenho	Erro quadrático médio (eqm)
Quantidade de Amostras	9840
Critério de Parada	$\text{Eqm} < 0,5 \times 10^{-4}$

Para a validação da rede, foram utilizados os valores de cargas mostrados na Tabela 3. A validação foi executada de modo *on-line*, no qual o FAPP executa o algoritmo estimando a corrente fundamental de eixo direto da carga. Na simulação, a tensão de alimentação de fase-neutro foi considerada como sendo igual a 127 (V_{ef}). A corrente de compensação para o FAPP é obtida por meio da

subtração da corrente de eixo direto da carga da corrente fundamental, ou seja, $id - id_{cc}$.

TABELA 3 - ELEMENTOS DAS CARGAS UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DA RNA

Fase 'a'	Fase 'b'	Fase 'c'
Retificador monofásico de onda completa com carga RL (R=4,8Ω e L=150mH)	Retificador monofásico de onda completa com carga RL (R=5,9Ω e L=150mH)	Retificador monofásico de onda completa com carga RL (R=8,8Ω e L=150mH)

Na Figura 4 é ilustrada a topologia de carga utilizada para treinamento e validação da RNA.

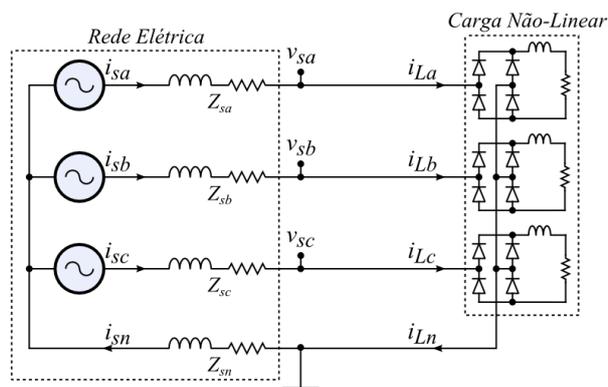


Figura 4. Topologia da Carga utilizada.

A Figura 5 apresenta os resultados da corrente de compensação obtidas por meio do algoritmo *SRF* e por meio da RNA. Como pode ser observado na corrente estimada com o método empregado, a RNA ficou muito próximo do método que utiliza o algoritmo de compensação *SRF*.

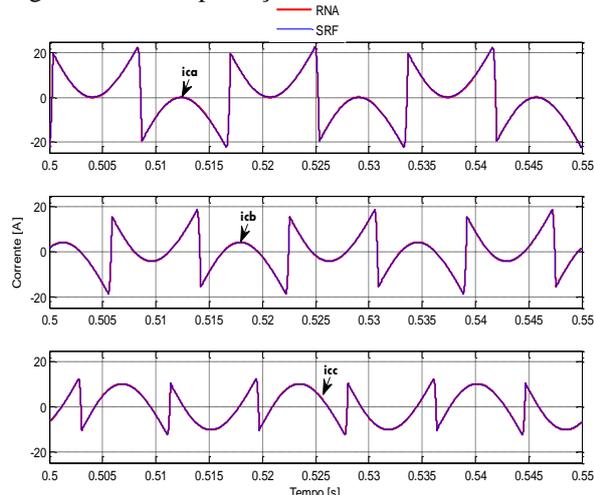


Figura 5. Corrente de Compensação obtidas com a RNA.

As formas de onda das correntes e tensões envolvidas são mostradas na Figura 6. As correntes da carga i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} e i_{Ln} , são mostradas na Figura 6 (a), as quais são desequilibradas. As correntes de fase drenadas da rede elétrica i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} e i_{sn} são mostradas na Figura 6 (b), onde é possível observar que as mesmas tornaram-se praticamente senoidais e equilibradas. Além disso, a corrente de neutro i_{sn} possui um valor próximo de zero, como era esperado

com o algoritmo de compensação utilizado. As correntes de compensação do FAPP i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} e i_{cn} , são mostradas na Figura 6 (c). Na Figura 6 (d), são mostradas individualmente a tensão v_{sa} , a corrente da carga i_{La} , a corrente compensada da rede i_{sa} e a corrente de compensação i_{ca} , enquanto as Figura 6 (e) e (f) apresentam as mesmas grandezas para as fases 'b' e 'c', respectivamente. Considerando as Figura 6 (d), (e) e (f), verifica-se que além de compensar o desequilíbrio das correntes da carga, o FAPP também compensou os reativos da mesma, pois as correntes compensadas i_{sa} , i_{sb} e i_{sc} estão em fase com as respectivas tensões v_{sa} , v_{sb} e v_{sc} .

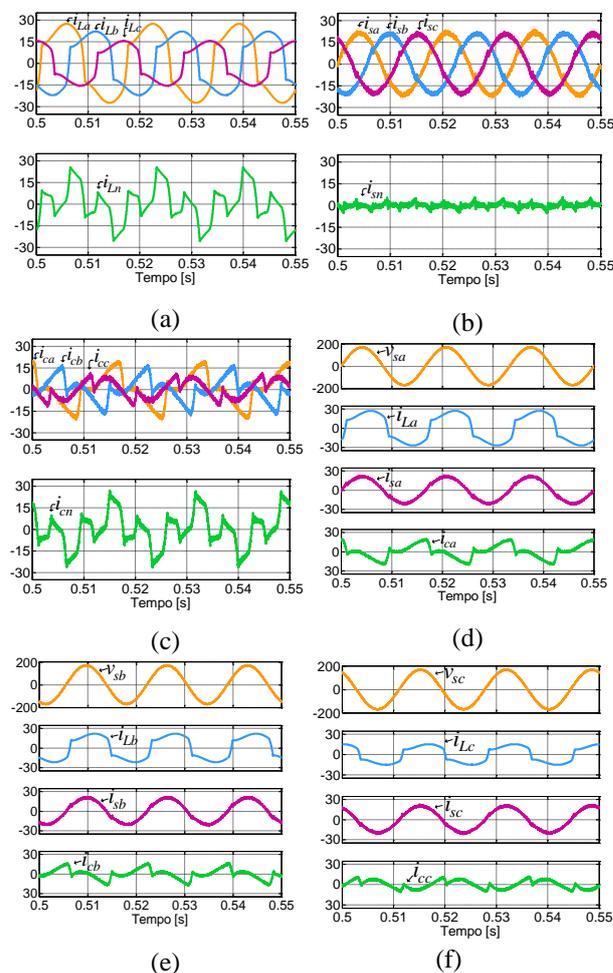


Figura 6 – Correntes e tensões:

- (a) Correntes i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} e i_{Ln} . (b) Correntes i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} e i_{sn} .
- (c) Correntes i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} e i_{cn} . (d) Tensão v_{sa} e correntes i_{La} , i_{sa} e i_{ca} .
- (e) Tensão v_{sb} e correntes i_{Lb} , i_{sb} e i_{cb} . (f) Tensão v_{sc} e correntes i_{Lc} , i_{sc} e i_{cc} .

A Tabela 4 mostra os valores da taxa de distorção das correntes da carga e da compensação considerando o método *SRF* e com a utilização da RNA.

TABELA 4 - ELEMENTOS DAS CARGAS UTILIZADAS NA VALIDAÇÃO DA RNA

Método	Distorção Harmônica Total das Correntes [%]		
	Fase 'a'	Fase 'b'	Fase 'c'
Sem Compensação	25,6	25,3	24,6
RNA	3,73	3,87	3,54
SRF	3,52	3,79	3,32

Nota-se pela tabela 4, que os valores por fase da taxa de distorção harmônica das correntes, antes da compensação do FAPP, estavam em aproximadamente 25%, o que representa um valor relativamente alto quando avaliado por meio da recomendação *IEEE 519-1996*. Observa-se ainda, que com a utilização da rede neural artificial, estes valores foram reduzidos a menos de 4%, desse modo ficando de acordo com a recomendação acima mencionada. Além disso, verifica-se que os resultados obtidos com a RNA ficaram muito próximos dos resultados obtidos por meio do método *SRF*.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a utilização de uma rede neural artificial em substituição ao método tradicional para se determinar a componente fundamental de eixo direto da corrente de carga. Notou-se por meio das simulações realizadas, que a rede neural artificial obtida do processo de treinamento, foi capaz de estimar adequadamente a corrente desejada para valores de carga dentro do domínio de treinamento, proporcionando deste modo a redução de componentes harmônicos e reativos presentes na carga, portanto melhorando a qualidade da energia elétrica quando se tem a presença de cargas não lineares.

Referências Bibliográficas

- Abdalla, I. I.; Rao, K. S. R.; Perumal, N. Harmonics Mitigation and Power Factor Correction with a Modern Three-phase Four-Leg Shunt Active Power Filter. In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY (PECon2010)*, 2010, Kuala Lumpur. Proceedings... Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2010. p. 156-161.
- Acordi, E. J.; Campanhol, L. B. G.; Silva, S. A. O.; Nascimento, C. B.; Goedel, A. Study of Shunt Active Power Filters Applied to Three-Phase Four-Wire Systems. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, [S.l.], v.10, p.277-279, 2012.
- Bhattacharya, S.; Divan, D.; Banerjee B. B. Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter. In: *EUROPEAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE*, 1991. Proceedings... [S.l.]: EPE, 1991. p. 30-35.
- Campanhol, L. B. G. ; Goedel, 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*, 2011, São João Del Rei-MG. X SBAI, 2011. v. X. p. 522-527.
- Farahat, M. A., and A. Zobah. "Active filter for power quality improvement by artificial neural networks technique." *Universities Power Engineering Conference*, 2004. UPEC 2004. 39th International. Vol. 2. IEEE, 2004.
- Fernandes, Ricardo A. S.; Silva, I. N.; Oleskovicz, Mário. Identificação de cargas lineares e não-lineares em sistemas elétricos residenciais usando técnicas para seleção de atributos e redes neurais artificiais. *SBA-Controle & Automação*, v. 21, n. 4, p. 389-405, 2010.
- Hamoudi, F.; Chaghi, A.; Adli, M.; Hocine, A. A comparative study between two strategies for four-wire shunt active filter control. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- IEEE Std. P519A/D5-1996. IEEE guide for applying harmonic limits on power systems. [S.l.]: [s.n.], 1996.
- Mendalek, N. Modeling and Control of Three-Phase Four-Leg Split-Capacitor Shunt Active Power Filter. In: *ADVANCES IN COMPUTATIONAL TOOLS FOR ENGINEERING APPLICATIONS - ACTEA*, 2009, Zouk Mosbeh. Proceedings... Zouk Mosbeh: ACTEA, 2009. p. 121-126.
- 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 2008).