



V SBQEE
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica
17 a 20 de Agosto de 2003
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 101
Tópico: Modelagens e Simulações

ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AO PROJETO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Franklin M. P. Pamplona*
UFCG

Benemar Alencar de Souza
UFCG

RESUMO

A aplicação de filtros harmônicos passivos em redes de distribuição é apresentada como um problema de otimização combinatória, o qual é resolvido empregando-se algoritmos genéticos. A redução da distorção harmônica total do alimentador é adotada como função de adaptação. Os índices harmônicos do sistema são calculados pelo método da injeção de corrente. O algoritmo implementado é aplicado a um alimentador radial de 23 kV e nove barras com três cargas injetoras de harmônicas. Os resultados obtidos demonstram que o método proposto é bastante adequado para a solução do problema de especificação e localização de filtros passivos em redes de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Distúrbios Harmônicos; Redução de harmônicas; Filtros harmônicos passivos; Algoritmos Genéticos; Qualidade da energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

As unidades consumidoras conectadas aos circuitos de distribuição possuem um caráter fortemente indutivo e de características não-lineares, que injetam correntes harmônicas de diversas ordens nos sistemas elétricos das concessionárias de energia. A distorção harmônica resultante é cada vez mais acentuada devido a crescente proliferação de equipamentos eletro-eletrônicos nas residências, instalações

comerciais e em pequenas indústrias. Esses equipamentos são muito sensíveis às distorções de tensão e corrente e exigem uma qualidade de energia cada vez maior para seu correto funcionamento, embora sejam eles próprios os injetores de harmônicos no sistema.

A maioria dos problemas de distorção dos sinais encontrados nos sistemas de distribuição devem-se a harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens e, em menor grau a harmônicas de 9^a, 11^a e 13^a ordens [1], [2]. Dentre os diversos métodos utilizados para reduzir distúrbios, um dos mais empregados é a instalação de filtros para bloquear ou captar as correntes harmônicas. Os filtros passivos de sintonia simples são os mais utilizados pelas concessionárias por serem os mais simples e de menor custo [3]. Estes filtros consistem basicamente de um circuito em derivação composto da ligação de indutores em série com capacitores. Frequentemente, é suficiente a aplicação de um único filtro harmônico passivo de 5^a ordem. Casos em que apenas um filtro não é suficiente para controlar os níveis de correntes harmônicas requerem um estudo mais detalhado, que deve considerar o projeto e a aplicação de filtros de diversos tipos.

Os parâmetros de indutância (L) e capacitância (C) de um filtro de sintonia simples são mutuamente dependentes, pois são calculados para uma determinada frequência harmônica: a *frequência de sintonia*. Na prática, os valores disponíveis de capacitância para o projeto de um filtro são discretos. São os valores padronizados dos módulos capacitivos comercialmente

* Av. Aprígio Veloso, 882 - CEP 58109-970 – Campina Grande - PB - BRASIL
Tel.: +55 (083) 310-1049 - FAX: +55 (083) 310-1015 - E-mail: franklin@dee.ufcg.edu.br

disponíveis. Por outro lado, a localização do filtro num alimentador também pode ser considerada como uma variável discreta, devido à viabilidade da instalação em determinadas barras do alimentador. Isto torna o problema da localização e projeto de filtros, um problema de otimização combinatória típico [4], que deve levar em consideração a natureza distribuída e variável das cargas lineares e das fontes harmônicas no sistema.

Os métodos de solução propostos para o problema da alocação ótima de filtros passivos em sistemas elétricos de potência são bastante diversificados. Cada método se baseia em hipóteses simplificativas, alguma das quais comuns, e outras específicas. Na literatura, os métodos mais recentes empregam ferramentas de análise da sensibilidade da rede diante os distúrbios harmônicos [5], [6] e técnicas heurísticas de otimização combinatória [4]. Dentre essas, os algoritmos genéticos têm se destacado por sua aplicação na solução de diversos problemas. Uma aplicação explorada com bastante sucesso é a alocação de bancos de capacitores [7], [8]. Recentemente, apresentou-se uma aplicação para a determinação dos parâmetros de filtros harmônicos passivos em circuitos secundários [9].

Este trabalho apresenta um método que aplica a otimização combinatória por algoritmos genéticos para a localização e projeto ótimos de filtros harmônicos passivos.

2.0 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema da alocação de filtros harmônicos passivos em um alimentador de distribuição consiste em determinar a localização e os parâmetros de cada filtro. O objetivo é minimizar as distorções harmônicas de tensão ao longo do alimentador, com os menores custos associados. Os filtros passivos são compostos por módulos de bancos capacitivos cujas capacidades são múltiplos inteiros de uma unidade padrão (50, 150 ou 300 kvar, por exemplo). Por outro lado, os pontos de instalação possível são as barras do alimentador e portanto, também formam um conjunto finito. Dessa forma, o problema é notadamente de otimização combinatória.

Para simplificar a análise do problema, algumas hipóteses foram consideradas neste trabalho: (a) o sistema opera em condições balanceadas, (b) as cargas são invariáveis no tempo, (c) a capacitância e o efeito pelicular das linhas são desprezíveis.

2.1 Sistema de distribuição radial

Um alimentador de distribuição radial direto com m barras é ilustrado na Figura 1. Cada barra pode conter uma carga e um capacitor em derivação.

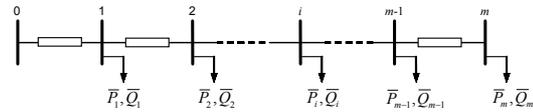


Figura 1 – Diagrama unifilar de um alimentador de distribuição radial direto.

A análise de harmônicas neste sistema de distribuição pode ser realizada empregando o método da injeção de corrente. Neste método, as tensões harmônicas em cada barra são obtidas através da solução das equações de rede formuladas na forma de matriz de admitâncias e de um conjunto de fontes de correntes que representam as características das cargas não lineares nas frequências harmônicas [10]. A equação matemática que descreve esta análise é:

$$\mathbf{Y}^h \mathbf{V}^h = \mathbf{I}^h, \quad (1)$$

em que \mathbf{I}^h é o vetor das correntes harmônicas injetadas nas barras, na frequência harmônica de ordem h , \mathbf{V}^h é o vetor das tensões harmônicas a ser calculado e \mathbf{Y}^h é a matriz admitância da rede. Na notação adotada, o sobrescrito h assume todos os valores de ordens harmônicas de interesse. O sobrescrito 1 ($h = 1$) corresponde aos parâmetros na frequência fundamental.

Na construção da matriz admitância da rede são empregados modelos dos componentes do sistema cujos parâmetros são dependentes da frequência. As admitâncias de cada trecho do alimentador e dos bancos de capacitores, em cada frequência harmônica, são:

$$y_i^h = \frac{1}{R_i + jhX_i} \quad (2)$$

e

$$y_{C_i}^h = hy_{C_i}^1. \quad (3)$$

sendo, R_i e X_i a resistência e a reatância indutiva do trecho i do alimentador entre as barras $i-1$ e i , e $y_{C_i}^1$ é a admitância *shunt* do banco de capacitores na barra i , na frequência fundamental.

As cargas lineares residenciais e comerciais são representadas por uma combinação paralela de resistência e reatância indutiva. Estes parâmetros são obtidos através dos dados da carga na

freqüência fundamental. A admitância harmônica destas cargas é, então, dada pela expressão:

$$y_{L_i}^h = \frac{\bar{P}_i}{|V_i^1|^2} - j \frac{\bar{Q}_i}{h|V_i^1|^2}, \quad (4)$$

em que \bar{P}_i e \bar{Q}_i são as potências ativa e reativa da carga linear na barra i .

As cargas não lineares são representadas por fontes de correntes harmônicas cujos valores nominais à freqüência da rede são:

$$I_i^1 = \left(\frac{\tilde{P}_i + j\tilde{Q}_i}{|V_i^1|} \right)^*, \quad (5)$$

sendo \tilde{P}_i e \tilde{Q}_i as potências ativa e reativa da carga não linear na barra i .

Nas freqüências harmônicas, a fonte tem valores nominais:

$$I_i^h = esp^h I_i^1, \quad (6)$$

sendo esp^h o valor percentual da corrente, na h -ésima ordem harmônica.

3.0 - O ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos genéticos são estratégias de busca adaptativa, baseadas em um modelo da evolução biológica, segundo os mecanismos de seleção natural e da genética [11]. São utilizados em problemas de otimização, em que se busca a solução ótima global, ou ao menos uma boa aproximação dela.

Nestes algoritmos, uma população de indivíduos (soluções potenciais) evolui, por meio de determinadas operações, até que sejam todos iguais e representem uma solução próxima da ótima. Cada indivíduo é representado por um conjunto de *genes*, que constitui o que se denomina *cromossomo*. A cada geração, os indivíduos competem entre si pela sobrevivência através de um esquema de evolução, que favorece os indivíduos mais adaptados ao ambiente e seleciona os que sofrerão transformações, dando origem à próxima geração. Depois de algumas gerações, o algoritmo usualmente converge e o melhor indivíduo representa a solução ótima global.

3.1 Algoritmo de solução

O algoritmo genético implementado neste trabalho é esquematizado no fluxograma da Figura 2, o qual é baseado na metodologia usada

em [7]. Emprega-se o método da roleta, no qual os cromossomos são escolhidos aleatoriamente, mas de modo que os com melhor adaptação tenham mais probabilidade de serem escolhidos para reprodução.

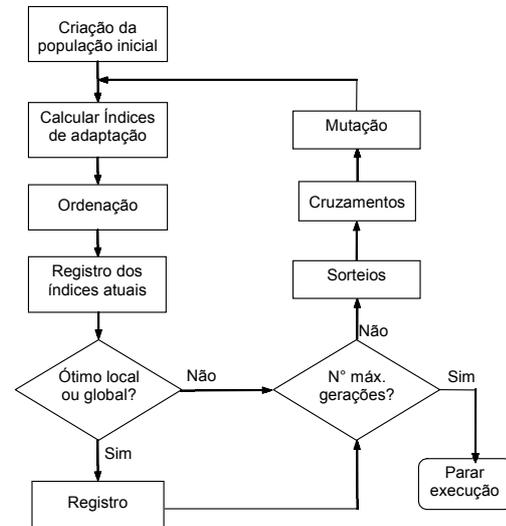


Figura 2 – Fluxograma do algoritmo genético implementado.

Na etapa de cruzamento emprega-se o operador *crossover aritmético* que apresenta melhores resultados de busca na representação real, adotada para os cromossomos deste estudo [12]. Este operador segue o esquema:

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \text{ e}$$

e

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2,$$

em que p_1 e p_2 são os cromossomos “pais”, c_1 e c_2 os cromossomos “filhos”, e β é um número aleatório entre 0 e 1.

Um operador de *mutação uniforme* é empregado, de modo que uma quantidade aleatória de genes de um cromossomo escolhido aleatoriamente, é substituída por números também aleatórios.

A população é estacionária, ou seja, cada geração começa e termina do mesmo tamanho. O critério de parada é simplesmente o de se atingir o número especificado de gerações. Na busca do ótimo global, verifica-se a convergência da população conforme o valor do desvio padrão do índice de adaptação dos cromossomos a cada geração.

3.2 A codificação dos parâmetros do problema

Neste trabalho, o número de filtros e suas freqüências de sintonia são previamente fixados. Emprega-se uma codificação decimal, de modo

que a representação das soluções potenciais está inserida diretamente nos cromossomos. Estes são constituídos por pares de genes que informam em qual barra determinado filtro harmônico será instalado e com quantos módulos capacitivos o mesmo será dimensionado. Dessa forma, a posição relativa de cada par de genes no cromossomo indica de qual filtro é a informação apresentada. Na Figura 3 vê-se a estrutura de um cromossomo implementado dessa maneira, com a representação de uma solução para a instalação de 3 filtros passivos.

Cromossomo	2	4	7	2	5	1
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Conteúdo dos genes	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos	Nº da barra	Nº de módulos capacitivos
	1º Filtro		2º Filtro		3º Filtro	

Figura 3 – Estrutura de um cromossomo para o projeto de 3 filtros harmônicos.

No cromossomo da Figura 3, o primeiro par de genes informa acerca do 1º filtro passivo, indicando que este será instalado na barra 2 e deverá possuir 4 módulos capacitivos. O segundo par de genes diz respeito ao 2º filtro passivo, indicando que este será instalado na barra 7, contendo 2 módulos capacitivos. Finalmente, o último par de genes informa que o 3º filtro passivo deve ser instalado na barra 5, possuindo apenas 1 módulo capacitivo. Em nível computacional cada cromossomo é visto como um vetor.

3.3 Função objetivo

O propósito deste estudo é encontrar as melhores barras para instalação de filtros passivos, de ordens diversas, para minimizar a distorção harmônica de tensão no sistema de distribuição. Assim, a função objetivo, ou função de adaptação, a ser maximizada é expressa da seguinte forma:

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_h |V_{i0}^h - V_{if}^h|, \quad (7)$$

sendo:

V_{i0}^h as tensões harmônicas de ordem h , na barra i , na configuração original do alimentador,

V_{if}^h as tensões harmônicas de ordem h , na barra i , com a instalação dos filtros,

$h = \{5, 7, 9, 11, \dots\}$ as ordens harmônicas de interesse.

O fluxograma do algoritmo empregado para o cálculo das tensões harmônicas do sistema é mostrado na Figura 4. Os dados utilizados por este algoritmo são obtidos na decodificação das informações contidas em cada cromossomo.

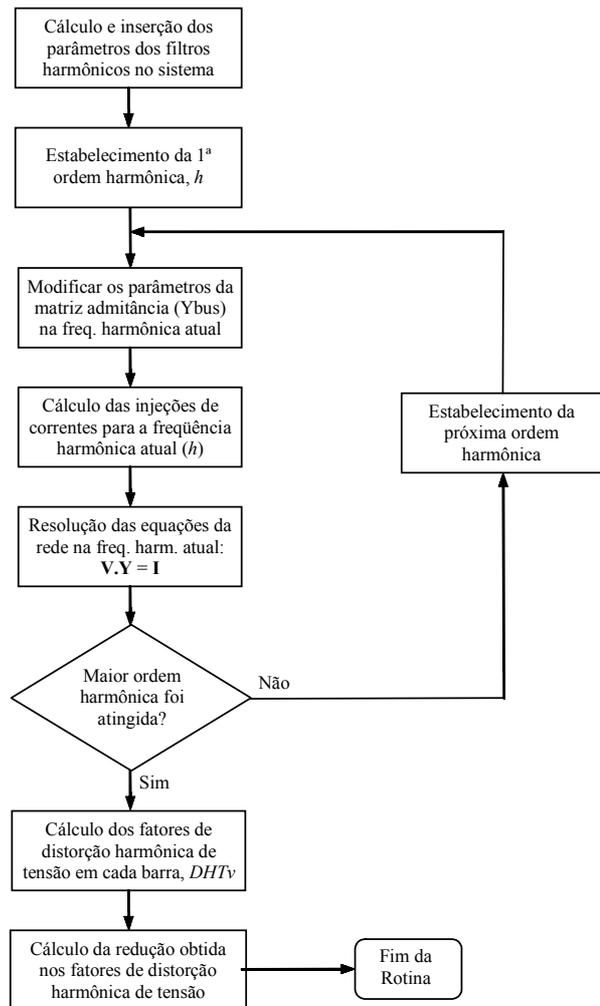


Figura 4 – Fluxograma do Método de Análise Harmônica.

Algumas restrições são impostas para melhorar o desempenho do algoritmo. Uma dessas restrições procura evitar a sobre-compensação reativa do sistema. Nos algoritmos genéticos as restrições são tratadas por meio de adicionais de penalidade na função de adaptação.

4.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Nesta seção um alimentador de distribuição simples [4] é utilizado como exemplo para demonstrar a aplicabilidade do método proposto. O alimentador é radial direto como mostrado na Figura 5. Tem 9 barras e tensão nominal de 23 kV. Os demais dados relativos ao sistema são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

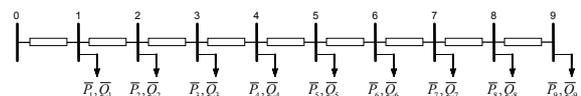


Figura 5 – Alimentador radial direto (sem ramais).

As características das fontes de correntes harmônicas são mostradas na Tabela 3.

Neste exemplo, o problema consiste em alocar dois filtros harmônicos passivos de 5ª e 7ª ordens, que serão constituídos por um ou mais módulos capacitivos de potência igual a 150 kvar cada. Deve-se identificar qual a localização ideal e os parâmetros dos filtros que proporcionem a redução máxima da distorção harmônica total de tensão ao longo do alimentador.

Tabela 1. Dados do alimentador, na frequência fundamental de 60 Hz.

Da barra	Para Barra	$R (\Omega)$	$X (\Omega)$
0	1	0.1233	0.4127
1	2	0.0140	0.0651
2	3	0.7463	1.2050
3	4	0.6984	0.6084
4	5	1.9831	1.7276
5	6	0.9053	0.7886
6	7	2.0552	1.1640
7	8	4.7953	2.7160
8	9	5.3434	3.0264

Tabela 2. Dados de Carga.

Barra	\bar{P} (kW)	\bar{Q} (kvar)
1	1840	460
2	980	340
3	1790	446
4	1598	1840
5	1610	600
6	780	110
7	1150	60
8	980	130
9	1640	200

Tabela 3. Dados das fontes de correntes harmônicas.

Barra	Amplitude (%) da corrente harmônica				
	5	7	11	13	17
5	5.8	4.0	2.2	1.7	1.1
7	4.4	3.1	1.9	1.3	0.8
9	5.7	3.9	2.4	1.7	1.1

Na resolução deste problema estipulou-se um número máximo de 300 gerações, com taxas de cruzamento e mutação de 60% e 2% respectivamente.

Devido a natureza aleatória das operações básicas e da geração da população inicial, o método atinge a solução ótima em um número diferente de gerações cada vez que é executado. Na Tabela 4, são apresentados os resultados de três execuções do algoritmo implementado.

Tabela 4. Solução ótima encontrada pelo algoritmo genético.

Execução	Gerações	Cromossomo
1ª	39	9 18 8 9
2ª	18	9 18 8 9
3ª	45	9 18 8 9

Na Figura 6 é apresentado um gráfico que indica a evolução da população ao longo das gerações. No eixo das ordenadas, está representado o valor da função de adaptação do melhor indivíduo e da média da população de cada geração. Pode-se observar que somente após várias gerações a população torna-se completamente idêntica, contudo um indivíduo que representa a solução ótima já estava presente na população antes mesmo da vigésima geração. Isto indica a rapidez com que a evolução ocorre rumo à solução ótima.

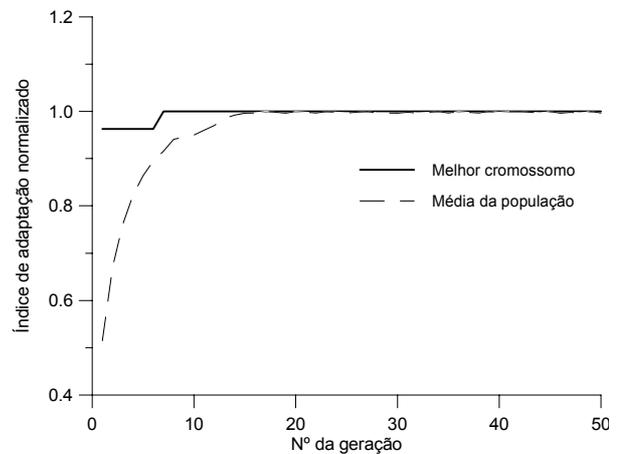


Figura 6 – Evolução da população ao longo das gerações.

Com a aplicação dos filtros harmônicos segundo a solução ótima encontrada, os índices das distorções harmônicas individuais e totais de tensão nas barras encontram-se abaixo dos limites recomendados no *IEEE Standard 519* [10], de 3% e 5%, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados obtidos no projeto de 2 filtros.

Barra	Configuração original		Com a aplicação dos filtros	
	Máx DHI (%)	DHT (%)	Máx DHI (%)	DHT (%)
1	4.94	6.59	1.23	2.15
2	4.94	6.23	1.23	2.17
3	4.96	6.77	1.24	2.21
4	4.98	6.86	1.24	2.24
5	5.05	7.20	1.26	2.37
6	5.08	7.28	1.21	2.31
7	5.12	7.50	1.17	2.27
8	5.19	7.85	1.18	2.14
9	5.30	8.24	1.37	2.63
Valor Máximo	5.30	8.24	1.37	2.63

Na Figura 7 são mostrados os valores de distorção harmônica total de tensão nas barras do alimentador, com sua configuração original e com a aplicação do método apresentado.

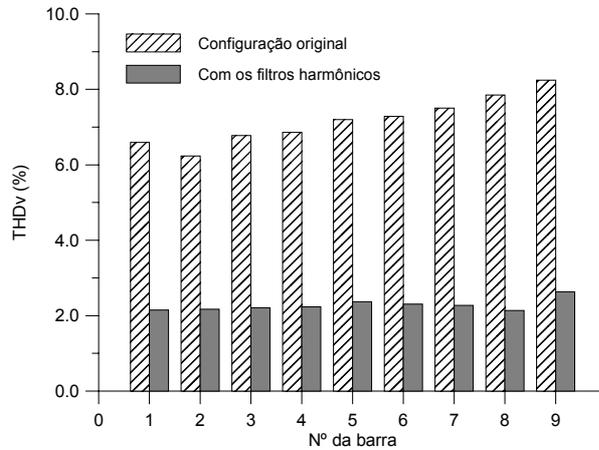


Figura 7 – Distorção harmônica total nas barras do alimentador.

5.0 - CONCLUSÕES

Foi elaborado um algoritmo genético para obter a solução ótima no projeto de filtros harmônicos passivos em sistemas elétricos de distribuição, tendo sido verificado que essa ferramenta de otimização se adequa muito bem ao problema.

O algoritmo apresentado fornece a localização e os parâmetros dos filtros harmônicos passivos de sintonia simples, considerando a redução máxima das distorções harmônicas totais das tensões de barra.

Apesar de algumas simplificações adotadas no método proposto, procurou-se implementar um algoritmo com requisitos suficientes de modo a ser aplicado a qualquer sistema radial de distribuição em que as características das cargas não lineares sejam conhecidas.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro e à Coordenação do PPgEE/UFCG e ao DEE/UFCG pela infra-estrutura oferecida.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] M. E. Tostes, U. H. Bezerra, J. N. Garcez, A. A. Tupiassu, A. C. A. Sena, "Development of Experimental Models for harmonic Representation of Low Voltage Customers", *IEEE Power Tech Proceedings*, Portugal, September 2001.

[2] A. E. Emanuel, J. A. Orr, D. Cyganski, E. M. Gulachenski, "A Survey of Harmonic Voltages and Currents at Customer's Bus", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 411-421, January 1993.

[3] C. Kawann, A. E. Emanuel, "Passive Shunt Harmonic Filters For Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 1825-1831, November 1996.

[4] Tien-Ting Chang, Hong-Chan Chang, "Application of Differential Evolution to Passive Harmonic Filter Planning", *Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP'98*, October 14-16, Athens, Greece, pp. 149-153.

[5] Gary W. Chang, Shou-Yung Chu, Hung-Lu Wang, "Sensitivity-Based Approach for Passive Harmonic Filter Planning in a Power System", *Proceedings of the 2002 IEEE PES Winter Meeting*, New York, pp. 937-940, January 2002.

[6] José Rubens Macedo Jr., José Wilson Resende, "Alocação Ótima de Filtros, Capacitores e Cargas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", *Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 21 a 26 de Outubro, São Paulo, Brasil.

[7] H. A. Ferreira, B. A. Souza and H. N. Alves, "Optimal Capacitor Allocation in Electrical Distribution Systems Using a Genetic Algorithm", *Proceedings of the IEEE/PES T&D 2002 Latin America*, March 18-22, São Paulo, Brasil.

[8] T. S. Chung, H. C. Leung, "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 21, pp. 561-596, 1999.

[9] C. C. Moura, M. E. L. Tostes, E. P. Santos, R. C. L. Oliveira, T. M. Branco, U. H. Bezerra, "Determination of the R-L-C Parameters of a Passive Harmonic Filter Using Genetic Algorithms", *Proceedings of the 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

[10] IEEE STANDARD 519, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE, New York, 1992.

[11] D. E. Goldberg, "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*". Addison-Wesley, 1989.

[12] Carlos de Oliveira Galvão e Mêuser Jorge Silva Valença, *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais*. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/ABRH, 1999.