



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



Código: AJU 04 135
Tópico: Análise, Diagnósticos e Soluções

ESTRATÉGIAS ÓTIMAS PARA PROJETOS DE FILTROS HARMÔNICOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Carmina Célia Moura de Moura*

Maria Emília de Lima Tostes

Ubiratan Holanda Bezerra

Tadeu da Mata Medeiros Branco

Rogério Diogne de Souza e Silva

Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico

RESUMO

Este artigo propõe o desenvolvimento de estratégias ótimas para projetos de filtros harmônicos a serem aplicadas em sistemas de distribuição industriais com cargas não-lineares. A fim de eliminar os harmônicos encontrados pretende-se dimensionar filtros passivos sintonizados utilizando-se Algoritmos Genéticos. Além da filtragem harmônica propriamente dita, o procedimento de projeto aqui adotado leva também em consideração aspectos de custo e os reflexos positivos obtidos sobre o perfil da tensão. Um exemplo de aplicação da metodologia proposta em um sistema industrial modelo é apresentado e analisado.

PALAVRAS-CHAVE

Algoritmos Genéticos; Filtros Harmônicos; Custos; Qualidade da Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

A solução dos problemas provocados pela circulação de harmônicos em sistemas de energia elétrica envolve o desenvolvimento de medidas mitigadoras que utilizam algum método de filtragem das formas de ondas distorcidas. O objetivo é oferecer às componentes da onda de corrente com frequências diferentes da fundamental um caminho alternativo de circulação, deixando fluir para o sistema alimentador somente a componente fundamental

da mesma, correspondente à frequência nominal da rede. Com a redução da circulação das correntes harmônicas as perdas ativas e reativas são reduzidas, refletindo-se também na liberação de potência para o sistema de distribuição, bem como na melhoria da operação e no prolongamento do tempo de vida dos seus componentes, como bancos de capacitores e transformadores.

A partir desse contexto o presente trabalho propõe um estudo considerando a aplicação de filtros passivos em sistemas industriais associada a uma análise de custos. Um estudo comparativo aplicado a um sistema modelo de distribuição industrial será apresentado. Em todos os casos estudados será considerado o emprego de Algoritmos Genéticos na determinação dos parâmetros dos filtros, levando-se em consideração o fator de qualidade, a potência reativa gerada e a interação com o restante do sistema através de um fluxo de carga harmônico.

É importante ressaltar também que o compromisso básico da função objetivo adotada para solucionar o problema envolve a minimização da impedância do filtro na frequência harmônica desejada (considerando-se as restrições impostas pelos componentes dos filtros) e, simultaneamente, a maximização da sua impedância na frequência fundamental (a fim de limitar as perdas provocadas pela parcela da corrente na frequência fundamental que o atravessa).

* Av. Augusto Corrêa, 1 - Caixa Postal 8619 - CEP 66075-900 – Belém - PA - BRASIL
Tel.: +55 (91) 211-1634 - FAX: +55 (91) 211-1634 - E-mail: carmina@ufpa.br

2.0 - O MODELO DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO

Os filtros passivos sintonizados são formados a partir da combinação de uma capacitância (C), uma indutância (L) e uma resistência de amortecimento (R) sintonizadas para filtrar uma determinada frequência harmônica, geralmente de baixa ordem, como a terceira, a quinta, a sétima e a décima primeira. A figura 1 mostra a representação monofásica de um filtro sintonizado *shunt* cujos componentes estão em série [1]. Deve-se ressaltar que a resistência de amortecimento corresponde ao valor intrínseco de resistência do indutor e dos cabos de conexão do circuito, não sendo necessário adicionar esse componente ao filtro durante a sua implementação física.

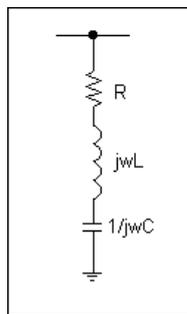


Figura 1: Filtro passivo sintonizado de segunda ordem

A fim de caracterizar os filtros harmônicos passivos pode ser utilizado um parâmetro denominado *fator de qualidade*, calculado em função dos componentes resistivo, capacitivo e indutivo que os constituem, como mostra a equação 1:

$$q = \frac{I}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

Para os filtros sintonizados, quanto menor o fator de qualidade maior é o valor da impedância na frequência de sintonia, implicando em maiores níveis de distorção harmônica para o sistema. Portanto, para esse tipo de filtro são adotados valores elevados para o fator de qualidade, geralmente entre 20 e 80 [1], [2].

A frequência de ressonância ou de sintonia é outro parâmetro importante para a caracterização dos filtros passivos. Nesse caso, a reatância indutiva e a reatância capacitiva são iguais, ou seja, a impedância do filtro torna-se resistiva. Então, tem-se:

$$h = \frac{I}{w\sqrt{LC}} \quad (2)$$

onde:

h : ordem das frequências harmônicas.

w : frequência angular nominal do sistema, em rad./seg

Desprezando-se a resistência do circuito, a potência reativa fornecida pelo filtro na frequência fundamental (Q_1), em kVAr, é dada por:

$$Q_1 = \frac{V_1^2}{Z_0} = \frac{V_1^2 wC}{1 - w^2 LC} \quad (3)$$

onde:

V_1 : tensão de alimentação da barra do filtro na frequência fundamental.

Z_0 : impedância do filtro na frequência fundamental.

A potência total, em kVA, do capacitor (S_C) e do indutor (S_L) do filtro pode ser calculada fazendo-se [3]:

$$S_C = V_C I = \frac{V_1}{1 - w^2 LC} \sqrt{I_h^2 \left[1 + \frac{I}{h^2} + \left(\frac{V_1 I_h}{h Q_1} \right)^2 \right] + \left(\frac{Q_1}{V_1} \right)^2} \quad (4)$$

$$S_L = V_L I = \frac{w^2 LC V_1}{1 - w^2 LC} \sqrt{I_h^2 \left[1 + h^2 + \left(\frac{h V_1 I_h}{Q_1} \right)^2 \right] + \left(\frac{Q_1}{V_1} \right)^2} \quad (5)$$

onde:

V_C : tensão *rms* sobre o capacitor do filtro.

V_L : tensão *rms* sobre o indutor do filtro.

I : corrente *rms* que atravessa o filtro.

I_h : corrente harmônica de ordem h que atravessa o filtro.

2.1 Cálculo do custo dos filtros passivos

O cálculo do custo de filtros passivos pode variar em função do material utilizado pelo fabricante, das condições em que o mesmo deverá ser instalado (abrigado ou ao ar livre), dos níveis de distorção harmônica previstos (que são traduzidos em folgas de tensão e de corrente considerados durante a confecção do equipamento) e da sua potência reativa. De acordo com a referência [3], o custo dos componentes dos filtros passivos sintonizados nas frequências de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens na tensão 13,8kV, instalados ao ar livre, podem ser aproximados pela seguinte equação linear:

$$\text{Custo}_C = K_C + U_C S_C \quad (6)$$

$$\text{Custo}_L = K_L + U_L S_L \quad (7)$$

onde:

Custo_C : custo do capacitor do filtro, em\$.

Custo_L : custo do indutor do filtro, em\$.

K_C, K_L : constantes de custo dos componentes capacitivo e indutivo, respectivamente, em \$.

U_C, U_L : custo unitário do capacitor e do indutor, respectivamente, em \$/kVA.

Considerando-se o custo total do filtro (C_T) igual à soma do custo do capacitor e do custo do indutor e que, de acordo com informações recebidas de fabricantes nacionais, o custo dos reatores representa entre 35% e 40% do custo total dos filtros, pode-se fazer:

$$C_T = \text{Custo}_C + 0,35(\text{Custo}_C) = 1,35(\text{Custo}_C) \quad (8)$$

No presente trabalho, os valores utilizados para K_C e U_C foram determinados em função do custo fornecido pelos fabricantes consultados, para filtros de várias potências sintonizados em 5ª ou 7ª ordem em sistemas de 13,8kV, levando em conta que os filtros operam com 30% de DHT₁% (Distorção Harmônica Total de Corrente). Em virtude dos dados obtidos terem sido fornecidos em função da potência reativa, em kVAr, a equação final para cálculo do custo total dos filtros foi:

$$C_T = 1,35(K_C + U_C Q_1) \quad (9)$$

2.2 Apresentação da função objetivo

2.2.1 Caso base:

O caso base estudado considerou a alocação ótima de filtros passivos sem levar em conta as restrições de custo envolvidas. Nesse caso, a função objetivo adotada refletiu o compromisso da solução de minimizar a impedância do filtro na frequência harmônica desejada e, simultaneamente, maximizar a sua impedância na frequência fundamental, a fim de limitar as perdas provocadas pela corrente de 60Hz, ou seja:

$$\underset{R,L,C}{\text{Min}} J = |Z_h| + \lambda \frac{I}{|Z_o|} \quad (10)$$

sujeito a:

$$R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$$

$$L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$$

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$$

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$$

onde:

Z_h : impedância do filtro na frequência harmônica considerada, calculada por:

$$Z_h = R + j \left(2\pi h f L - \frac{I}{2\pi h f C} \right) \quad (11)$$

λ : fator de multiplicação que fornece a sensibilidade do filtro em relação à influência da impedância na frequência fundamental (definido empiricamente).

2.2.2 Caso 2: Considerando as restrições de custo

A segunda estratégia de otimização considerada levou em conta a minimização do custo na função objetivo do problema. Essa consideração implicou em uma parcela adicional na função objetivo envolvendo o custo total do filtro. Esse parâmetro foi, então, associado a um segundo fator de multiplicação (λ_F). Logo:

$$\underset{R,L,C}{\text{Min}} J = |Z_h| + \lambda \frac{I}{|Z_o|} + \lambda_F C_T \quad (12)$$

Sujeito às mesmas restrições consideradas no caso base.

3.0 - DESCRIÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO

A teoria dos Algoritmos Genéticos mistura modelos computacionais e biológicos, utilizando conceitos como indivíduos (ou genótipos) para representar o conjunto de possíveis soluções para um problema. O conjunto formado pelos indivíduos, também chamados de “cromossomos”, recebe a denominação geral de população. Os elementos da população podem ser formados por uma sequência binária de caracteres denominada de *string*, mas também pode ser utilizada a codificação real ou inteira das variáveis. Os caracteres individuais dos cromossomos são os “genes”, responsáveis por conter as informações características de cada possível solução [4].

De uma forma geral, pode-se dizer que um Algoritmo Genético é estruturado da seguinte maneira:

- Uma população inicial é formada a partir de um conjunto finito de potenciais soluções, onde cada solução corresponde a um indivíduo.
- Cada indivíduo da população é avaliado a partir de uma função que lhe associa um valor que corresponde a sua potencialidade como solução. Essa função, denominada de *fitness* ou aptidão, caracteriza o problema a ser resolvido e pode ser representada através de uma equação matemática (geralmente a função objetivo do problema) ou de maneira qualitativa. Admitindo-se que essa função é crescente à medida que se aproxima a solução ótima, o melhor indivíduo possui o maior valor de *fitness*.

- Um conjunto de indivíduos é selecionado para ser submetido a um processo evolutivo que utiliza regras de transição probabilísticas (operadores seleção, *crossover* e mutação). Os novos indivíduos gerados são inseridos na população e uma nova geração, com características modificadas, é criada.
- Os indivíduos são novamente avaliados e o processo de evolução se repete até que o critério de parada seja satisfeito.

A fim de melhor representar o problema proposto utilizou-se a codificação real, considerando apenas três “campos” (ou regiões): o do capacitor, o da resistência e o do indutor do filtro. Para constituir a população inicial valores inteiros para C, R e L entre as faixas de valores consideradas para cada componente são selecionados aleatoriamente. Os operadores seleção, *crossover* e mutação foram esquematizados como segue:

Seleção: o objetivo desse operador é selecionar os indivíduos de forma a compor uma nova população com características superiores àquelas da população anterior. O critério de seleção adotado neste trabalho é o *Roulette Wheel* (roleta), onde os indivíduos são selecionados proporcionalmente à razão entre o *fitness* individual e a soma dos *fitness* de todos os elementos, conforme descrito em [4].

Crossover: esse operador inicia o processo evolutivo aplicado à população selecionada, representando a troca de informações “genéticas” entre indivíduos, sendo composto basicamente de três etapas: a escolha dos indivíduos, dois a dois, que irão sofrer as alterações impostas pelo operador, a determinação aleatória de um ou mais pontos onde os mesmos serão alterados, e a troca de informações entre indivíduos (“pais”), para gerar dois novos indivíduos (“filhos”). A proporção de indivíduos “pais” que serão selecionados é determinada a partir da probabilidade de *crossover* – $p_c \in [0, 1]$. No presente trabalho, a partir dos pares formados pelos elementos selecionados, é realizada a permutação de valores no “campo” dos capacitores entre os dois indivíduos. Os novos valores de R e L são definidos a partir da combinação linear dos valores dos cromossomos “pais” (*crossover* aritmético), conforme apresentado em [5].

Mutação: é incorporado ao modelo dos Algoritmos Genéticos a fim de prevenir o problema da “convergência prematura” associado ao operador de *crossover*, assegurando a variedade na busca da solução ótima através de pequenas modificações nos indivíduos. Esse

operador está associado à probabilidade de mutação – $p_m \in [0, 1]$, que determina a proporção de modificação imposta à população. A diversidade introduzida por esse operador eleva a possibilidade de busca em todos os subespaços associados ao problema, inibindo a probabilidade da escolha de um ponto ótimo local. No presente trabalho esse operador é realizado de acordo com o esquema mostrado na referência [5].

Visto que a técnica dos Algoritmos Genéticos foi elaborada fundamentalmente para solucionar problemas de maximização, a alternativa utilizada no presente trabalho para se obter a minimização da função foi a de elaborar um problema de maximização, sendo o valor de *fitness* de cada elemento calculado a partir do inverso da função objetivo considerada. Deve-se ressaltar ainda que a estratégia de otimização utilizada procurou assegurar a transferência das melhores informações contidas de uma geração para a outra, garantindo a presença do melhor indivíduo na população (elitismo).

4.0 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O sistema industrial de 13 barras utilizado no presente trabalho, conforme detalhado na referência [6], é típico de uma planta industrial de tamanho médio. A sua rede de distribuição local opera em 13,8kV, sendo alimentada pela concessionária em 69kV. O sistema original possui também uma geração própria alimentando uma carga de 800kVA. No entanto, a fim de contornar uma limitação apresentada pela versão disponível do programa utilizado para cálculo do fluxo de carga harmônico, que admite a inserção de somente uma fonte geradora (concessionária), a carga alimentada pela barra de geração própria da usina foi adicionada à carga alimentada pela concessionária. O sistema modificado é mostrado na figura 2.

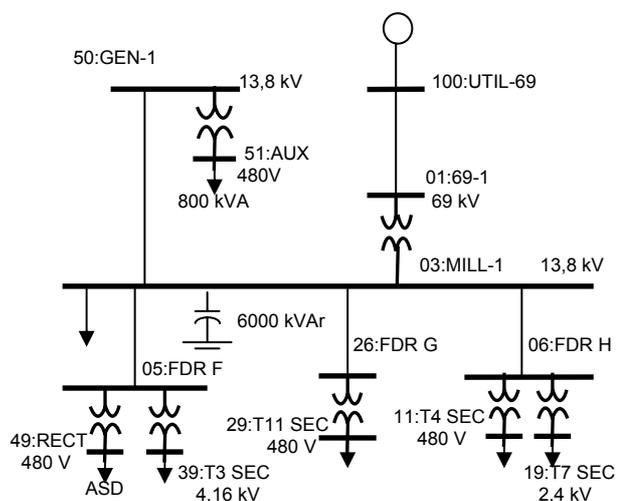


Figura 2: Sistema industrial estudado

A planta possui uma carga não-linear (controlador de velocidade variável) na barra 49:RECT cujas harmônicas mais significativas são a de 5ª ordem (18,24%) e a de 7ª ordem (11,9%). Os valores das impedâncias dos cabos, linhas e transformadores, bem como os dados de carga do sistema podem ser obtidos na referência [6].

Inicialmente verificou-se o comportamento do sistema sem a utilização de filtros harmônicos. Nesse caso, foi identificada uma Distorção Harmônica Total de Tensão ($DHT_V\%$) elevada na barra 49:RECT e problemas de subtensão nas barras 39:T3 SEC e 19:T7 SEC, conforme mostra a tabela 1. Nas demais barras do sistema a distorção harmônica de tensão não ultrapassou o limite máximo de 5% [7]. Merece destaque, no entanto, o elevado valor de $DHT_I\%$ na barra da concessionária.

Tabela 1: Situação inicial de algumas barras do sistema

Barra	Tensão (pu)	$DHT_V\%$	$DHT_I\%$
100:ÚTIL-69	0,998	0,74%	16,65%
49:RECT	0,972	10,13%	23,84%
39:T3 SEC	0,943	4,58%	1,36%
19:T7 SEC	0,946	4,59%	1,32%

A fim de solucionar os problemas observados com a execução do fluxo de carga harmônico, foi considerada a possibilidade de instalação de filtros harmônicos na barra 05:FDR F utilizando-se os valores de R, L e C mais frequentes fornecidos como resultado do Algoritmo Genético. Para cálculo dos custos foram adotados os seguintes valores: $K_C = R\$48.170,00$ e $U_C = R\$18,5/kVAr$.

Os filtros foram dimensionados separadamente, bastando, para isso, entrar com o valor de h desejado no programa principal do Algoritmo Genético proposto. Foram testadas várias possibilidades para λ e λ_F , a fim de definir o melhor ajuste desses parâmetros, os quais foram, respectivamente: 5 e 1×10^{-6} .

Os limites adotados para R, L e C foram: $0,5\Omega \leq R \leq 5,0\Omega$; $1mH \leq L \leq 200mH$; $1\mu F \leq C \leq 20\mu F$. Os valores de p_m e p_c adotados foram 0,1 e 0,85, respectivamente. Os resultados obtidos considerando-se 200 gerações de uma população com 20 indivíduos são apresentados a seguir. Para os dois casos estudados (sem restrições de custo e com restrições de custo), pôde ser notada a regulação de tensão obtida com a inserção dos filtros dimensionados no sistema através da melhora no perfil de tensão das barras.

4.1 Dimensionamento de filtros harmônicos sem restrições de custo

Para dimensionar os filtros harmônicos sem levar em conta as restrições de custo envolvidas foi utilizada a função objetivo apresentada na seção 1.2.1 (caso base). Os resultados obtidos com o Algoritmo Genético para um filtro de 5ª ordem de 897kVAr para valores de C, L e R iguais a $12\mu F$, 23mH e $0,55\Omega$, respectivamente, indicaram uma melhora significativa no índice de $DHT_I\%$ da barra da concessionária e a solução do problema de subtensão na barra 19:T7 SEC. A fim de solucionar a subtensão da barra 39:T3 SEC foi dimensionado pelo Algoritmo Genético um filtro de 7ª ordem de 660kVAr, com valores de C, L e R iguais a $9\mu F$, 16mH e $0,55\Omega$, respectivamente. Na tabela 2 é mostrado o perfil das barras citadas anteriormente, após a inserção dos filtros de 5ª e 7ª ordem.

Tabela 2: Situação das barras após a inserção dos filtros

Barra	Tensão (pu)	$DHT_V\%$	$DHT_I\%$
100:ÚTIL-69	0,999	0,03%	0,37%
49:RECT	0,977	6,84%	23,6%
39:T3 SEC	0,951	0,18%	0,03%
19:T7 SEC	0,955	0,19%	0,03%

Os custos dos filtros harmônicos, calculados de acordo com a equação 8, são: R\$87.400,00 para o filtro de 5ª ordem e R\$81.500,00 para o filtro de 7ª ordem.

As figuras 3 e 4 mostram a evolução do *fitness* do melhor indivíduo de cada geração do Algoritmo Genético para os filtros dimensionados. Os valores de R, L e C adotados correspondem ao melhor indivíduo da última geração.

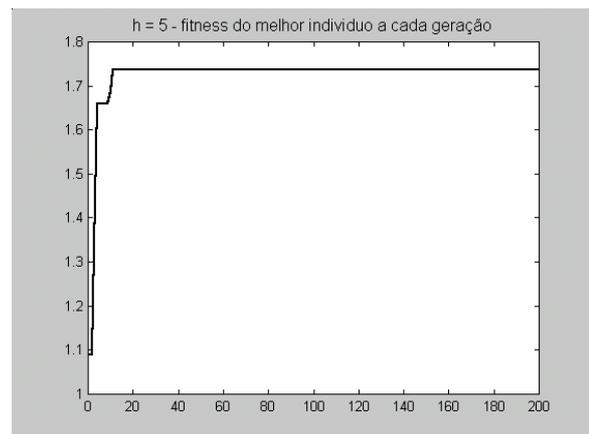


Figura 3: *Fitness* do melhor indivíduo para $h = 5$

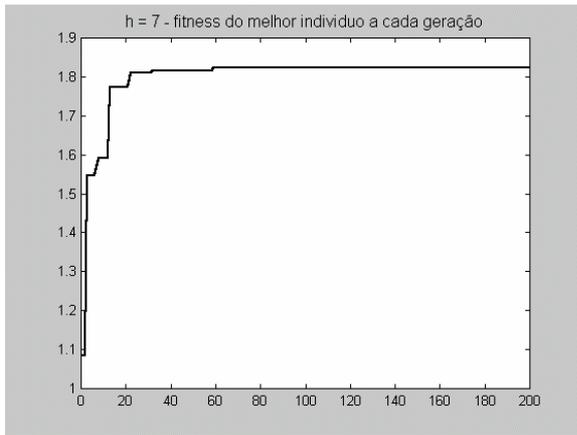


Figura 4: *Fitness* do melhor indivíduo para $h = 7$

4.2 Dimensionamento de filtros harmônicos com restrições de custo

O dimensionamento dos filtros harmônicos considerando os custos dos capacitores e indutores foi feito com base na função objetivo apresentada na seção 1.2.2 (caso 2). Novamente foi feito o dimensionamento inicial de um filtro de 5ª ordem para a barra 05:FDR F. A solução obtida via Algoritmo Genético foi um filtro de 822 kVAr, ao custo de R\$85.500,00. Os valores de C, L e R correspondentes são: 11 μ F, 25mH e 0,6 Ω , respectivamente. A fim de solucionar o problema de subtensão na barra 19:T7 SEC, foi considerada também a colocação de um filtro de 7ª ordem de 586kVAr, ao custo de R\$79.600,00, na barra 05:FDR F. Os valores de C, L e R para esse filtro são, respectivamente, 8 μ F, 18mH e 0,6 Ω . Os resultados finais obtidos para as barras em questão são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Situação das barras após a inserção dos filtros, considerando-se os custos envolvidos

Barra	Tensão (pu)	DHT _V %	DHT _I %
100:ÚTIL-69	0,999	0,03%	0,38%
49:RECT	0,978	6,85%	23,62%
39:T3 SEC	0,95	0,18%	0,03%
19:T7 SEC	0,954	0,19%	0,03%

De acordo com os resultados apresentados na tabela 3 pode-se destacar a melhora significativa do índice de DHT_I% na barra da concessionária e a solução dos problemas de subtensão nas barras 39:T3 SEC e 19:T7 SEC, além de uma diminuição nos custos envolvidos.

A evolução do *fitness* do melhor indivíduo de cada geração do Algoritmo Genético para os filtros dimensionados deu-se de maneira similar àquela mostrada nas figuras 3 e 4. Os valores de R, L e C adotados correspondem ao melhor indivíduo da última geração.

5.0 - CONCLUSÕES

Os Algoritmos Genéticos têm sido utilizados em aplicações envolvendo problemas complexos de otimização ou proposições abstratas que apresentam uma série de possibilidades de solução, mas onde se deseja determinar a melhor solução ou estratégia a ser seguida. O fato de realizar uma busca multidirecional da solução a partir de pontos selecionados aleatoriamente, ou seja, provenientes de várias direções dentro de um espaço de soluções, torna a metodologia em questão mais robusta que os métodos de busca baseados em gradientes ou outras técnicas de derivação.

Os resultados preliminares mostrados neste trabalho indicam a viabilidade da utilização da técnica de Algoritmos Genéticos na solução de problemas envolvendo a alocação ótima de filtros harmônicos em sistemas industriais, levando-se em consideração que os custos envolvidos representam uma parcela significativa na tomada de decisões das empresas. Além da filtragem harmônica, foi possível verificar os reflexos positivos sobre o perfil da tensão. Esse aspecto deverá ser incluído na função objetivo do problema em uma próxima etapa.

Um aspecto importante que deve ser ressaltado, no entanto, é a necessidade de se acoplar à técnica desenvolvida um programa para cálculo do fluxo de carga harmônico, aumentando a sensibilidade do programa e eliminando a interferência do programador na tomada de decisões.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 1985.
- [2] M. F. ALVES, "Critérios para Especificação e Projeto de Filtros de Harmônicas", *Revista Eletricidade Moderna*, p. 30-40, Junho 1994.
- [3] C. Kawann, A. E. Emanuel, "Passive Shunt Harmonic Filters for Low and Medium Voltage: a Cost Comparison Study", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No.4, pp. 1825-1831, November 1996.
- [4] Z. Michalewicz, *Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, 1996.
- [5] C. C. M. Moura, M. E. L. Tostes, E. P. Santos, R. C. L. Oliveira, T. M. M. Branco, U. H. Bezerra, "Determination of the R-L-C Parameters of a Passive Harmonic Filter Using Genetic Algorithm", *Proceedings of the 2002 International Conference on Harmonics and Quality of Power*, October 06-09, Rio de Janeiro, Brasil.
- [6] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, *Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation*, IEEE Power Engineering Society.
- [7] IEEE Standard 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.