

SEL  
03  
01  
05



Cadastrado pelo ICMC  
Sysno: 1412548

SYSNO	1412548
PROD	0001103
ACERVO EESC	

## Sobre o XV Congresso Brasileiro de Automática

---

O Congresso Brasileiro de Automática (CBA) é um congresso bianual promovido pela Sociedade Brasileira de Automática (SBA), afiliada brasileira da International Federation on Automatic Control (IFAC). O CBA é o maior e mais tradicional evento científico de sua área na América do Sul, já tendo sido realizado anteriormente em 14 oportunidades. A décima quinta edição do CBA - CBA2004 - realiza-se pela primeira vez no Rio Grande do Sul, na cidade de Gramado no período de 21 a 24 de Setembro de 2004 no Centro de Convenções da FAURGS. A organização desta edição do congresso ficou sob a responsabilidade do Grupo de Controle, Automação e Robótica (GCAR) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS.

O CBA2004 recebeu o número recorde de 1.007 artigos, submetidos por mais de 800 autores distintos, o que representa um aumento de aproximadamente 38% com relação à sua edição anterior. A fim de agilizar o processo de submissão e revisão de artigos foi utilizado um sistema totalmente informatizado via internet.

Cada área temática do congresso foi colocada sob a responsabilidade de um ou mais membros do comitê de programa, conforme segue.

- Teoria de Controle:
  - Carlos Emanuel de Souza-LNCC
  - José Cláudio Geromel-UNICAMP
  - Liu Hsu-UFRJ
  - Oswaldo Luiz do Valle Costa-USP
  - Pedro Luis Dias Peres-UNICAMP
  - Rafael Santos Mendes-UNICAMP
- Controle de Processos:
  - Argimiro Resende Secchi-UFRGS
- Automação da Manufatura:
  - José Eduardo Ribeiro Cury-UFSC
  - José Reinaldo Silva-USP
- Sistemas Inteligentes:
  - Aldayr Dantas de Araújo-UFRN
  - Edson de Paula Ferreira-UFES
  - Fernando Antônio Campos Gomide-UNICAMP
  - Luis Pereira Calôba-UFRJ
  - Ricardo Tanscheit-PUC/RJ
- Protocolos e redes:
  - Carlos Eduardo Pereira-UFRGS
- Sistemas de Potência:
  - Antônio José Alves Simões Costa-UFSC
  - Glauco Nery Taranto-UFRJ
  - Luiz Danilo Barbosa Terra-PUC/MG
  - Sandoval Carneiro Jr.-UFRJ
  - Alexandre Sanfelice Bazanella-UFRGS

# UMA ROTINA BASEADA EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS EM CHAVEAMENTOS DE BANCO DE CAPACITORES

RENATA A. MACÊDO

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF  
Rua Delmiro Gouveia, 333 – Bongi, Recife - PE - CEP 50761-901  
E-mails: renatam@chesf.gov.br

DONATO DA SILVA FO., DENIS V. COURY, ADRINANO A. F. M. CARNEIRO

Depto. De Engenharia Elétrica, Escola de Eng. de São Carlos, Universidade de São Paulo.  
P.O.Box 359, CEP 13566-590, São Carlos, SP, BRASIL, -55-16-273 9366  
E-mails: donato, coudy @eel.eesc.sc.usp.br

ANDRÉ P. L. F. DE CARVALHO

Depto. de Ciências da Computação, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo.  
P.O.Box 668, CEP 13560-970, São Carlos, SP, BRASIL, -55-16-274 9136  
E-mails: andre@icmc.sc.usp.br

**Resumo**— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para estimativa das componentes de frequência presentes em uma forma de onda ruidosa proveniente de um Sistema Elétrico de Potência. O método proposto é baseado em Algoritmos Genéticos. A implementação utilizada no presente trabalho foi chamada *GOOAL - Genetic Object Oriented Algorithm*, um algoritmo inteligente inteiramente desenvolvido pelo grupo de pesquisa local. Os resultados obtidos foram comparados com a técnica clássica de Fourier com o propósito de validar o mesmo. Resultados altamente promissores, especialmente considerando a representação real do espaço de busca, os resultados demonstram que o método proposto apresenta boa precisão no cálculo das componentes harmônicas do sistema.

**Abstract:** This paper presents an approach to identify harmonics in power system distorted waveforms. The proposed method is based on Genetic Algorithms, which is an optimization technique inspired by genetics and natural evolution. *GOOAL - Genetic Object Oriented Algorithm*, a specially designed intelligent algorithm for optimization problems, was successfully implemented and tested. The software ATP was utilized for the modeling the electric system under study as well as for data collecting for analysis and test. The results were compared to the classical Fourier approach to its validation. The solutions show that the proposed method is very precise, especially considering the real representation of the solution.

**Keywords:** Genetic Algorithms, Electric Power System, Harmonics, DC Component.

## 1 Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) visam garantir que o mercado consumidor de energia seja atendido dentro de critérios de qualidade de suprimento e a baixos custos. Para tanto, em um sistema elétrico ideal, a energia gerada deve ser suprida a um nível de tensão e frequência constantes. Contudo, tais condições não se apresentam na prática (ARRILLAGA *et al.*, 2000).

As formas de onda que retratam o comportamento de um SEP são sinais tipicamente não periódicos, contendo oscilações de alta frequência, sinais de frequência fundamental e seus harmônicos, que distorcem a forma de onda senoidal fornecida pelas concessionárias de energia elétrica.

Os efeitos adversos das componentes harmônicas nas formas de onda de tensão e corrente em um SEP, bem como as suas causas, são bastante estudados e vêm se tornando assunto de interesse em diversas áreas de pesquisa, levando a um melhor entendimento dos danos causados em equipamentos e na má operação dos sistemas de controle e proteção (ARRILLAGA, 2000).

As componentes harmônicas deterioram a qualidade da energia fornecida pelas concessionárias, aumentam a potência reativa do sistema, elevam as perdas no cobre e no ferro devido ao aquecimento em máquinas, reatores e transformadores, acentuam as perdas nas linhas de transmissão e, eventualmente, causam aquecimento de cabos e equipamentos, reduzindo sua vida útil.

Justifica-se assim a importância da análise destes efeitos nos equipamentos e na operação do sistema, visto que o impacto econômico gerado pelo fornecimento de uma energia de baixa qualidade reflete-se diretamente na confiabilidade do suprimento elétrico, no rendimento e no custo final da energia gerada (WAGNER *et al.*, 1993).

De acordo com DUGAN (1996), a avaliação das distorções harmônicas é uma tarefa muito importante para a operação correta do SEP. Contudo, tal avaliação se torna imprecisa visto que são encontradas certas dificuldades na medição dessas ondas devido ao fato de que as cargas geradoras das componentes harmônicas serem de natureza dinâmica.

Tradicionalmente, a análise harmônica pode ser baseada nas teorias de estimação estática ou dinâmica. Os métodos baseados no ajuste dos

Mínimos Quadrados (MQ), na Transformada Discreta de *Fourier* (TDF) e na Transformada Rápida de *Fourier* (TRF) são exemplos de estimação estática, enquanto o Filtro de *Kalman* é um exemplo de estimação dinâmica.

A técnica dos MQ é baseada na minimização da soma do quadrado da diferença entre o valor estimado e o valor medido por uma função. KAMWA & GRONDIN (1992) mostraram que, para um modelo não-linear de tensão/corrente do sistema, a técnica dos MQ oferece uma estimativa razoável dos fasores envolvidos.

A TDF e a FFT são fundamentadas na teoria de transformadas ortogonais, onde a forma de onda medida consiste de uma componente fundamental acrescida de uma infinita soma de harmônicos (COOLEY, 1992).

O Filtro de *Kalman* é um estimador ótimo recursivo e é também utilizado para identificar componentes harmônicas em SEP (SOLIMAN, 1997). O mesmo é baseado em uma estimativa dinâmica e possui a capacidade de identificar, analisar e localizar os harmônicos contidos em um sinal trifásico não estacionário.

Durante as últimas décadas houve um grande interesse na resolução de problemas de estimação de harmônicos utilizando-se técnicas baseadas em Inteligência Artificial. Algumas delas serão abordadas a seguir.

FARAHAT, *et al.* (1991) implementaram um *software* Especialista que permite o diagnóstico de problemas operacionais causados por componentes harmônicas presentes nas formas de onda de tensão e corrente de um sistema de distribuição. DASH *et al.* (1998) apresentam uma abordagem baseada na utilização de RNAs na estimação de distorções harmônicas em SEP. Em (SOLIMAN, HELAL & AL-KANDARI, 1999), a regressão linear *Fuzzy* é usada para medir componentes harmônicas em uma forma de onda não-senoidal.

Atualmente os Algoritmos Genéticos (AGs), vêm recebendo atenção como um algoritmo robusto de busca estocástica em problemas de estimação com resultados bastante promissores. EL-NAGGAR & YOUSSEF (2000) propuseram um método rápido e eficiente, baseado em AG, para a estimação da variação de frequência, magnitude da tensão e ângulo de fase para a implementação de um relé de frequência para proteção de um SEP.

Neste trabalho será apresentado um método baseado em AGs para a análise de distorções harmônicas das formas de ondas provenientes de um SEP. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo

proposto apresenta boa precisão no cálculo das componentes harmônicas. Adicionalmente, o método proposto é comparado com o método clássico de *Fourier* para a validação do mesmo. Resultados altamente promissores foram encontrados com a aplicação desta tecnologia.

## 2 O Modelo Harmônico

Matematicamente, um sinal periódico e distorcido pode ser representado adequadamente em termos de sua frequência fundamental e suas componentes harmônicas, sendo expressos como uma Série de *Fourier*. Cada componente harmônico do sinal possui uma amplitude e ângulo de fase, como também uma frequência que é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema.

Um sinal variante no tempo pode ser tomado como uma composição de diferentes sinais de frequências distintas. Por exemplo, uma forma de onda variante no tempo,  $x(t)$ , pode ser escrita como (MACÊDO *et al.*, 2003):

$$x(t) = x_0 e^{-\lambda t} + \sum_{i=1}^N A_{c,i} \cos(i\omega_0 t + \theta_{c,i}) + A_{s,i} \sin(i\omega_0 t + \theta_{s,i}) \quad (1)$$

onde  $x_0$  é a componente CC de  $x(t)$  e  $\lambda$  é a constante de tempo;  $A_{c,i}$ ,  $A_{s,i}$ ,  $\theta_{s,i}$  e  $\theta_{c,i}$  são as amplitudes dos termos co-seno e seno, respectivamente e o ângulo de fase do  $i^{\text{ésimo}}$  harmônico;  $\omega_0$  é a frequência fundamental do sistema e  $N$  é o número de harmônicos presente em  $x(t)$ .

Para se obter os parâmetros da equação acima, são empregados algoritmos matemáticos. Assumindo que o sinal  $x(t)$  é amostrado a uma taxa amostral pré-definida de  $\Delta t$ , após  $(m-1) \cdot \Delta t$  segundos, haverá  $m$  amostras,  $x(t_1)$ ,  $x(t_2)$ , ...,  $x(t_m)$ , para  $t_1$ ,  $t_2$ , ...,  $t_m$ , onde  $t_1$  é uma referência de tempo arbitrária. Assim, pode-se descrever o sistema de equações 2, onde  $e(t_k)$ ,  $k = 1, \dots, m$ , é o erro estimado no tempo  $t_k$ . Em um sistema elétrico, o sinal  $x(t)$  é normalmente a tensão ou a corrente e  $\omega_0$  é a frequência do sistema, que é 377 rad/sec (60Hz).

Resolvendo o sistema de equações dado por (2) para encontrar  $\lambda$ ,  $x_0$ ,  $A_{c,i}$  e  $A_{s,i}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , não é uma tarefa de fácil execução visto que o sistema de equações é redundante.

A seguir será apresentado um método baseado em AGs para a análise de distorções harmônicas das formas de onda de tensão e corrente em situações de distúrbio em um sistema elétrico.

$$\begin{bmatrix} x(t_1) \\ x(t_2) \\ \vdots \\ x(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda t_1} & \cos(\omega_0 t_1 + \theta_{c,1}) & \sin(\omega_0 t_1 + \theta_{s,1}) & \cdots & \cos(N\omega_0 t_1 + \theta_{c,N}) & \sin(N\omega_0 t_1 + \theta_{s,N}) \\ e^{-\lambda t_2} & \cos(\omega_0 t_2 + \theta_{c,1}) & \sin(\omega_0 t_2 + \theta_{s,1}) & \cdots & \cos(N\omega_0 t_2 + \theta_{c,N}) & \sin(N\omega_0 t_2 + \theta_{s,N}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ e^{-\lambda t_m} & \cos(\omega_0 t_m + \theta_{c,1}) & \sin(\omega_0 t_m + \theta_{s,1}) & \cdots & \cos(N\omega_0 t_m + \theta_{c,N}) & \sin(N\omega_0 t_m + \theta_{s,N}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ A_{c,1} \\ A_{s,1} \\ \vdots \\ A_{c,N} \\ A_{s,N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(t_1) \\ e(t_2) \\ \vdots \\ e(t_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são um algoritmo de busca e otimização que utilizam processos aleatórios de busca guiados por decisões probabilísticas para obtenção de soluções ótimas ou aproximadamente ótimas. GOLDBERG (1989).

Esta técnica, diferente das técnicas convencionais de otimização, trabalha simultaneamente com um conjunto de possíveis soluções no espaço de busca denominada **população**. Cada possível solução, geralmente chamada de **indivíduo**, representa uma solução do problema que está sendo resolvido.

A idéia do método é fazer com que os indivíduos da população evoluam ao longo das iterações, chamadas **gerações**, produzindo soluções cada vez melhores em direção a uma solução ótima ou aproximadamente ótima.

Para que a evolução ocorra, é necessário que os indivíduos da população sejam avaliados a partir da aplicação de uma **função de aptidão**, que indica o quanto o indivíduo é bom em relação ao objetivo desejado. Essencialmente, os AGs tentam minimizar o valor retornado pela função de aptidão fazendo com que os indivíduos da população evoluam ao longo das iterações até o algoritmo convergir para sua solução factível.

A criação de cada nova geração nada mais é que a criação de novos indivíduos a partir dos existentes, gerando assim um conjunto de descendentes. Os melhores indivíduos de uma geração, que possuem melhor aptidão, são selecionados através do operador de **seleção** e são modificados por meio da aplicação de operadores genéticos denominados **cruzamento** e **mutação**.

Uma estrutura geral de um AG pode ser descrita na Figura 1, onde  $P(t)$  representa uma população de indivíduos a cada geração  $t$ .

```

t = 0;
Gera população inicial P(0);
Avalia P(t);
para todo indivíduo i da população P(t)
faça:
    Avalia aptidão do indivíduo i;
fim para
enquanto Critério de parada não for
satisfeito faça:
    t = t + 1;
    Aplica Seleção em P(t-1);
    Aplica Cruzamento em P(t);
    Aplica Mutação em P(t);
    Avalia P(t);
Fim enquanto
    
```

Figura 1 – Estrutura geral de um AG

Primeiramente, é gerada aleatoriamente uma população inicial de indivíduos  $P(0)$ . Cada indivíduo representa uma possível solução para o problema onde  $P(t) = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t\}$  para  $t$  iteração. Cada solução  $x_n^t$  é avaliada e a ela é associada um número, ou nota. Essa nota reflete sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Após a avaliação da população, é selecionado um subconjunto da população (espaço de busca) que irá produzir uma nova população  $P(t+1)$  (iteração  $t+1$ ).

Alguns membros desse subconjunto podem sofrer modificações por meio de operadores genéticos de cruzamento e mutação, gerando descendentes para a próxima geração. Esse processo é repetido até que o algoritmo convirja para uma solução factível.

O sucesso da implementação do AG dependerá da escolha da melhor representação do problema, do tamanho da população inicial, dos tipos de operadores utilizados, das probabilidades dos operadores genéticos e função de adaptação.

O primeiro paço a ser considerado é a representação do problema proposto. No presente trabalho foram testados dois tipos de representação, onde cada indivíduo da população gerada foi representado por uma estrutura de dados (vetor) de valores binários e reais com o propósito de encontrar a melhor maneira de representar o problema.

A Figura 2 ilustra as codificações utilizadas. O sinal proveniente do SEP é representado matematicamente por suas componentes de corrente contínua, fundamental e harmônicas. Desta forma, o indivíduo, representado por um vetor de dados, é composto pela componente de corrente contínua do sinal, e as componentes harmônicas co-seno e seno do sinal sucessivamente.

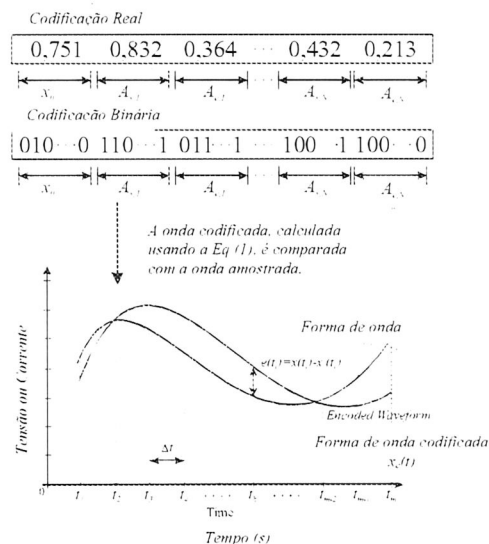


Figura 2 – Representação da codificação dos parâmetros para o AG proposto

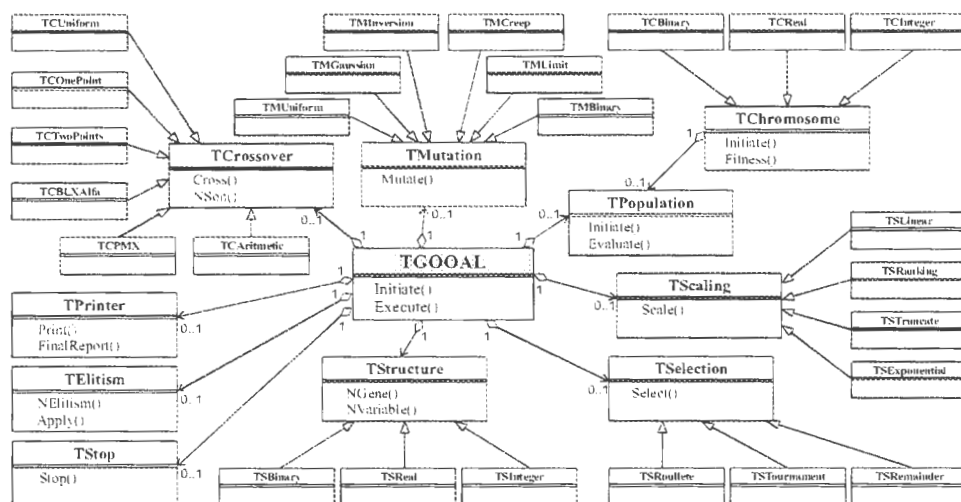


Figura 3 – Configuração do AG

#### 4 Descrição do Software Desenvolvido

A implementação utilizada neste trabalho foi denominada *GOOAL - Genetic Object Oriented Algorithm* e está sendo desenvolvida pelo grupo de pesquisa da EESC-USP. A estrutura do *GOOAL*, representada por seu diagrama de classes, é mostrada pela Figura 3, onde o algoritmo foi desenvolvido de acordo com o paradigma da Programação Orientada a Objeto (POO) (MACÊDO et ali. 2003).

O conceito principal da POO é a própria noção de objeto. Visto sob o ponto de vista de programação, a idéia principal da POO é quebrar o programa em blocos reduzidos, discretos e distintos, denominado objeto, contrastando com a programação convencional, pois removem as restrições devidas à inflexibilidade das linguagens de programação tradicionais.

O algoritmo proposto visa modelar um sinal ruidoso proveniente de um sistema elétrico sob condições anormais como a injeção de uma falta em uma linha de transmissão e o chaveamento de banco de capacitores. O programa foi desenvolvido em Linguagem C++ orientada a objeto, desenvolvido no compilador Builder C++ da Borland.

## 5 O Sistema de Potência Analisado

As situações transitórias em sistemas de potência são comuns. Uma clara apreciação de tais eventos é essencial para um completo entendimento do comportamento do sistema elétrico, visto que seus componentes são sujeitos a um grande estresse devido a correntes e/ou tensões distorcidas que, em casos extremos, resultam em danos.

Neste trabalho foi simulado uma situação de chaveamento de Bancos de Capacitores (BCs) em um sistema de distribuição para obtenção do

conjunto de dados para análise e testes do algoritmo proposto. Para a modelagem dos sistemas elétricos foi utilizado o *software ATP- Alternative Transient Program* (ATP - Rule Book, 1987).

O *software* ATP é uma ferramenta de grande importância e flexibilidade na realização de estudos de transitórios em SEP, permitindo uma representação detalhada do sistema elétrico a ser simulado, buscando uma aproximação às situações e características encontradas na prática. Deve ser mencionado que algumas considerações práticas tais como o efeito dos transdutores (TPs e TCs), filtros anti-aliasing e quantização sobre os dados simulados do sistema foram também incluídos na simulação, fazendo com que os dados obtidos pelo *software* ATP sejam muito próximos dos reais. Contudo, como toda ferramenta computacional, está sujeita a restrições.

Deve ser ressaltado que a modelagem deste sistema de distribuição primária faz parte de uma situação real encontrada junto à CPFL e que a mesma, apresenta grande semelhança com o encontrado na prática (OLESKOVICZ et. al., 2003).

O circuito modelado foi representado por meio de uma fonte de tensão, em regime, de 138kV/60Hz. Durante a energização do BC há o aparecimento de sobretensões transitórias. No modelo estudado, foram considerados os parâmetros reais do sistema, nos quais incluem as resistências envolvidas com o amortecimento do circuito. Quando o capacitor é chaveado, um transitório de tensão similar ao apresentado na Figura 4 pode ser observado. A Figura 5 mostra a corrente observada após o chaveamento do capacitor. Os transitórios se propagam pelo sistema podendo causar má operação do mesmo.

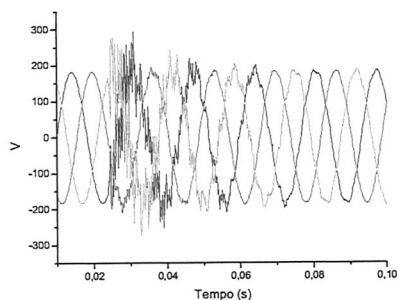


Figura 4 – Tensão em chaveamento de BCs

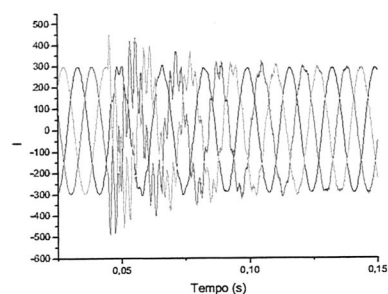


Figura 5 – Corrente em chaveamento de BCs

## 6 Identificação de Componentes Harmônicas Utilizando AGs

O problema de identificação de harmônicas foi desenvolvido empregando a técnica de AGs como ferramenta de otimização para estimação das componentes harmônicas presentes no sinal ruidoso. Esta avaliação deve prover medidas precisas do conteúdo harmônico em um sistema de potência e as características exatas das tensões e correntes.

Quando da ocorrência de um chaveamento de BCs, as formas de onda das tensões e correntes são drasticamente afetadas. As ondas de tensão e corrente são corrompidas por ruídos, na forma de componentes de CC (decaindo exponencialmente), componentes de frequência fundamental e de frequências superiores a 60Hz.

Estes sinais foram simulados e analisados por meio de AG. Para a análise do método proposto a taxa amostral utilizada foi de 2,4 kHz (40 amostras por ciclo), representado por uma janela de 1 ciclo de dados.

Inicialmente foram geradas formas de onda de tensão e corrente, em situações chaveamento de BCs em um sistema de distribuição, com coeficientes previamente conhecidos. O grau de distorção harmônica presente nos sinais analisados dependerá da taxa da frequência de corte do filtro utilizado. No presente trabalho o sinal foi limitado em 500 Hz.

As equações 3 e 4 descrevem matematicamente as formas de onda de tensão e corrente para um

chaveamento de BCs apresentadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

$$V(t) = 0,0294 \exp(-0,4t) + 0,8769 \cos(\omega t) - 0,4806 \sin(\omega t) + 0,0084 \cos(2\omega t) - 0,0064 \sin(2\omega t) + 0,0026 \cos(3\omega t) + 0,0005 \sin(3\omega t) + 0,0007 \cos(4\omega t) + 0,0061 \sin(4\omega t) - 0,0006 \cos(5\omega t) + 0,0149 \sin(5\omega t) - 0,0446 \cos(6\omega t) + 0,0446 \sin(6\omega t) - 0,0197 \cos(7\omega t) - 0,1008 \sin(7\omega t) \quad (3)$$

$$I(t) = 0,0550 \exp(-0,4t) + 0,9832 \cos(\omega t) + 0,1842 \sin(\omega t) + 0,0141 \cos(2\omega t) + 0,0245 \sin(2\omega t) + 0,0077 \cos(3\omega t) + 0,0197 \sin(3\omega t) + 0,0050 \cos(4\omega t) + 0,0168 \sin(4\omega t) - 0,0039 \cos(5\omega t) + 0,0154 \sin(5\omega t) + 0,0033 \cos(6\omega t) + 0,0161 \sin(6\omega t) + 0,0033 \cos(7\omega t) + 0,0230 \sin(7\omega t) \quad (4)$$

Para definir as características dos AGs, foi feito um teste de sensibilidade, onde alguns parâmetros importantes foram analisados a fim de se obter a melhor configuração para os mesmos. A Tabela I ilustra as diversas configurações analisadas, como a representação do problema (binária ou real), métodos de seleção, elitismo, operadores genéticos e os parâmetros genéticos.

Testes anteriores indicaram que para a representação binária, foram obtidos melhores resultados representando os indivíduos da população inicial com 10 bits por parâmetros, levando-se em conta a precisão e o tempo computacional (MACÊDO *et al.*, 2002).

Tabela I Parâmetros testados pelo AG.

Parâmetros	Características
População Inicial	12, 24 e 48 indivíduos
Método de Seleção	0 – Seleção da Roleta 1 – Seleção por Torneio, com 2 repetições 2 – Seleção pelo Método Estocástico do Resto
Elitismo	1 – Um Indivíduo Elitista 2 – Dois Indivíduos Elitistas
Cruzamento	0 – Cruzamento Uniforme 1 – Cruzamento de Um-Ponto 2 – Cruzamento de Dois-Pontos 3 – Cruzamento Média Aritmética 4 – Cruzamento BLX- $\alpha$ , com $\alpha$ igual a 0,5
$P_c$	Probabilidade de Cruzamento de 90% e 97%
Mutação	0 – Mutação Binária 1 – Mutação Uniforme 2 – Mutação Gaussiana, com $\delta = 0,05$
$P_m$	Probabilidade de Mutação de 5% e 10%

Este teste de sensibilidade aponta a exploração de um grande grupo de dados para obter uma conclusão relativa à melhor configuração do problema proposto, onde uma análise foi feita com o intuito de organizar, analisar e interpretar os resultados.

Conseqüentemente, a utilização de alguns procedimentos para organização e descrição do conjunto de dados gerados se fez imprescindível devido à necessidade de uma apreciação mais objetiva e segura devido a quantidade de dados obtidos. Foram analisadas 504 configurações diferentes, das quais 216 para a codificação binária e 288 para a codificação real. As 504 configurações foram aplicadas a cada caso estudado de tensão e corrente para o chaveamento de BCs, totalizando 1008 testes.

Os resultados obtidos foram organizados de forma sistemática, permitindo interpretar os resultados oriundos do estudo, sendo a melhor configuração de cada caso mostrado nas Tabelas II e III.



As Tabelas II e III mostram também os resultados obtidos utilizando o método tradicional de Fourier. Pode-se notar a superioridade dos resultados obtidos pelo uso da técnica baseada em AGs, comparada com o método clássico de Fourier, especialmente na estimação da componente CC.

Tabela II. Magnitude dos harmônicos estimados pela Equação 4

Tensão	Exato	Erro (%)		
		Fourier	Binário	Real
$V_g$	0.0294	100.68	$0.340 \pm 0.032$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,1}$	0.8769	0.0684	$0.011 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,2}$	-0.4806	0.1457	$0.062 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,3}$	0.0079	5.9524	$4.761 \pm 0.002$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,4}$	-0.0062	3.1250	$7.812 \pm 0.001$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,5}$	0.0021	19.230	$11.530 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,6}$	0.0006	20.000	$100.00 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,7}$	0.0001	85.714	$100.00 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,8}$	0.0062	1.6393	$3.278 \pm 0.002$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,9}$	-0.0016	166.66	$100.0 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,10}$	0.0149	0.0000	$1.342 \pm 0.001$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,11}$	-0.4462	0.0448	$0.067 \pm 0.000$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,12}$	0.0469	5.1570	$1.345 \pm 0.009$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,13}$	-0.1969	0.0508	$1.015 \pm 0.027$	$0.000 \pm 0.000$
$V_{g,14}$	-0.1008	1.1765	$0.588 \pm 0.012$	$0.000 \pm 0.000$
Erro Total (%)		27.310	22.140	0.000

Tabela III. Magnitude dos harmônicos estimados pela Equação 8

Corrente	Exato	Erro (%)		
		Fourier	Binário	Real
$I_g$	0.0550	0.110	$3.438 \pm 0.004$	$0.0036 \pm 0.001$
$I_{g,1}$	0.9829	0.983	$0.108 \pm 0.001$	$0.0003 \pm 0.001$
$I_{g,2}$	0.1842	0.183	$4.225 \pm 0.021$	$0.0005 \pm 0.001$
$I_{g,3}$	0.0141	0.0139	$5.375 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.001$
$I_{g,4}$	0.0245	0.024	$10.118 \pm 0.003$	$0.0040 \pm 0.001$
$I_{g,5}$	0.0077	0.007	$3.519 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.000$
$I_{g,6}$	0.0197	0.019	$14.624 \pm 0.006$	$0.0050 \pm 0.001$
$I_{g,7}$	0.0055	0.005	$2.240 \pm 0.000$	$0.0000 \pm 0.001$
$I_{g,8}$	0.0168	0.016	$5.738 \pm 0.001$	$0.0119 \pm 0.001$
$I_{g,9}$	0.0039	0.004	$12.282 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.001$
$I_{g,10}$	0.0154	0.015	$0.344 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.001$
$I_{g,11}$	0.0033	0.003	$6.636 \pm 0.001$	$0.0303 \pm 0.001$
$I_{g,12}$	0.0161	0.016	$7.714 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.000$
$I_{g,13}$	0.0034	0.003	$30.33 \pm 0.000$	$0.2000 \pm 0.001$
$I_{g,14}$	0.0229	0.023	$0.121 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.000$
Erro Total (%)		27.310	6.676	0.016

Como a técnica baseada em AGs é um método aleatório, se fez necessário calcular a média e o desvio padrão de 20 repetições para cada caso testado. O critério de parada em cada teste foi o número de gerações, igual a 100.000 gerações. A configuração que apresentou melhor resultado, para a representação binária foi o cruzamento de dois pontos, com taxa de cruzamento de 90%, e taxa de mutação de 10%. Para a representação real, a melhor configuração foi o cruzamento BLX com taxa de cruzamento de 90% e mutação gaussiana. Em uma comparação entre as codificações binária e real, os testes apontam para uma superioridade da codificação real, que apresenta o menor erro na estimativa das componentes harmônicas.

## 7 Conclusão

Este trabalho apresenta um método para identificação de harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência baseado em AGs.

Os testes com as diferentes codificações para o AG mostram que a configuração real é a mais indicada para a análise harmônica, atestando que o método proposto pode ser uma ótima alternativa ao problema estimação de harmônicos em SEP.

Foi também feito um estudo comparativo com o método baseado na TDF, que se caracteriza como um método tradicional de análise harmônica. Os resultados mostraram que a estimação pelo AG apresentou menor erro, principalmente considerando-se a estimação da componente CC, comparando com o método tradicional.

Deve ser apontado que quanto mais realístico o modelo do sinal adotado for, maior será o esforço computacional do algoritmo a ele associado, sendo necessário um equilíbrio entre simplicidade e generalidade a fim de assegurar que os resultados apresentados sejam significativos. Assim, deve ser enfatizado, que o uso de AGs na estimação de harmônicos se mostra bastante precisa, sendo uma alternativa em SEP.

## Agradecimentos

Os autores gostariam agradecer o apoio financeiro recebido por parte da CAPES e a FAPES.

## Referências Bibliográficas

- Arrillaga, J.; Smith, A. C.; Watson, N. R., (2000). Power System Harmonic Analysis. John Wiley & Sons Ltd.
- Girgis, A. A., Qiu, J. (1989). Measurement of the Parameters of Slowly Time Varying High Frequency Transients, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol.38, n.6, Dec., pp.1057-1063.
- Wagner, V. E. et al., (1993). Effect of Harmonics on Equipment, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.8, n. 2, April, pp. 672-680.
- Dugan et al. (1996). Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill.
- Kamwa, L. Grondin; R. (1992). Fast Adaptive Schemes for Tracking Voltage Phasor and Local Frequency in Power Transmission and Distribution Systems. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 7(2):789-794.
- Cooley, J. W. (1992) How the FFT Gains Acceptance. *IEEE Signal Processing Magazine*, v.9, n.1, p.10-13.
- Soliman, S. A., El-Naggar, K., Al-Kandari, A. (1997) Kalman filtering Based Algorithm for Low Frequency Power Systems Sub-Harmonics Identification. *International Journal of Power Energy and Systems*, vol. 17, n. 1, pp. 38-42.
- Farahat, M. S.; et al., (1991): Development and Implementation of a Harmonic Expert System. XXXIII Cement Industry Technical Conference, Record of Conference Papers, pp. 357-374.
- Dash, P. K.; et al. (1998). A New Approach to Monitoring Electric Power Quality. *Electric Power Systems Research*, v.16, p.11-20.
- Soliman, S. A., Helal, I., Al-Kandari, A. M., (1999) Fuzzy Linear Regression for Measurement of Harmonic components in a Power System. *Electric Power system Research*, vol. 50, pp. 99-105.
- El-Naggar, K. M.; Youssef, K. M. (2000) A Genetic Based Algorithm for Frequency-Relaying Applications. *Electric Power Systems Research*, v.55, p.173-178.
- Macêdo, R. A., Filho, D. S.; Coury, D. V.; Carneiro, A.A.F.M. (2003) An Evolutionary Optimization Approach to Track Voltage and Current Harmonics in Electrical Power Systems. *IEEE PES General Meeting*, Toronto, Canada.
- Goldberg, D. E.; (1989). *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Reading, M.A. Addison Wesley.
- Alternative Transients Program Rule Book. (1987). Leuven EMTP Center.
- Oleskovicz, M., Coury, D. V., et al. (2003) Análise da Qualidade da Energia Utilizando Transformada Wavelets Combinada às Redes Neurais Artificiais. XVII SNPTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia.