



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ - 12  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDOS DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE  
DE ENERGIA - GCQ**

**UMA METODOLOGIA EVOLUTIVA PARA IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES HARMÔNICAS EM UM  
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

**Renata A. Macêdo \***

**CHESF**

**Donato da S. Filho**

**BANDEIRANTES ENERGIA**

**Denis V. Coury**

**EESC/USP**

**Adriano A.F.M. Carneiro**

**EESC/USP**

**RESUMO**

As formas de onda de tensão e corrente que retratam o comportamento real de um sistema de potência são compostas por oscilações que distorce a sua forma original. A estimação destas distorções permite uma análise da qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária, fazendo com que ações preventivas ou mesmo corretivas possam ser tomadas garantindo uma operação adequada do sistema. Desta forma, uma clara apreciação de tais eventos é essencial para um completo entendimento do comportamento do sistema elétrico. Este artigo aborda o problema de qualidade da energia sob o ponto de vista das componentes harmônicas onde é apresentada uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos denominada *GOOAL*, um algoritmo inteligente especialmente projetado para solucionar os problemas de estimação de parâmetros em uma onda ruidosa.

**PALAVRAS-CHAVE**

Componentes Harmônicas, Algoritmos Genéticos, Qualidade da Energia, Sistemas Elétricos de Potência.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) compreende diferentes de equipamentos interligados entre si. Estes sistemas são planejados, construídos e operados de modo a atender às necessidades de energia elétrica dos usuários finais, dentro de padrões compatíveis de segurança e qualidade, fornecendo ao consumidor uma energia limpa, renovável e barata. Para tanto, em um sistema elétrico ideal, a energia gerada deve ser suprida a um nível de tensão e frequência constantes, em que as três fases do sistema encontram-se balanceadas e simétricas. Contudo, tais condições não se apresentam na prática.

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 geradoras (1).

Tais distorções podem ser referidas como a causa de vários problemas na operação, controle e proteção dos sistemas elétricos e seus efeitos, bem como as suas causas, são bastante estudados e vêm se tornando assunto de interesse em diversas áreas de pesquisa.

Uma questão importante relacionada às distorções nas formas de onda do sistema está relacionada aos efeitos indesejáveis na Qualidade da Energia (QE) fornecida ao sistema. Atualmente, tais aspectos vêm sendo monitorados e avaliados sistematicamente pelas concessionárias de energia elétrica.

Dentre as causas mais comuns que levam a um problema de QE, pode-se citar: perda de linhas de transmissão, saída de unidades geradoras, energização de transformador de grande porte, chaveamentos de bancos de capacitores, curto-circuito nos sistemas elétricos, operação de cargas com características não-lineares, etc.

Uma clara análise dos efeitos causados por tais distúrbios é essencial para um completo entendimento do comportamento do sistema elétrico. Mediante tal análise, pode-se avaliar as conseqüências tanto em

\*Rua Delmiro Gouveia, 333 - Anexo III - Bloco D - Sala 2 - Bongü - CEP 50761-901 - Recife - PE - BRASIL  
Tel.: (081) 3229-2184 - Fax: (081) 3229-2116 - e-mail: renatam@chesf.gov.br

equipamentos como na própria operação do sistema. Esses efeitos podem ser referidos como aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, afetando, assim, a vida útil de transformadores, máquinas rotativas, bancos de capacitores, etc. Podem-se também destacar efeitos como erros adicionais em medidores e o mau funcionamento do sistema de proteção. Nesta categoria estariam incluídos efeitos como: erros nas respostas de equipamentos, aumento ou diminuição do consumo de kWh, etc.

Vários grupos de pesquisa estão trabalhando atualmente no sentido de desenvolver normas que auxiliem a análise de tais distúrbios como, por exemplo, as publicações (2) e (3). Nestas normas, os autores identificaram as diversas fontes harmônicas em um SEP descrevendo também como o sistema responde à presença destas.

Diferentes técnicas são utilizadas na análise do conteúdo harmônico de um sinal. Um dos algoritmos mais empregados é aquele que utiliza a análise de Fourier, mais especificamente a TDF ou a FFT. O algoritmo da FFT é uma versão otimizada da TDF. Contudo, a aplicação inadequada do algoritmo da FFT pode levar a resultados incorretos. Tal aplicação incorreta pode causar *aliasing*, *leakage* e efeito *picket-fence* (4).

Outras pesquisas analisam a aplicabilidade do filtro de Kalman para identificação de componentes harmônicas. Em (5) o problema é formulado como um problema linear Fuzzy para identificar os parâmetros de uma forma de onda não senoidal dos sinais de um SEP.

Durante as últimas décadas houve um grande interesse na resolução de problemas de estimação de harmônicos utilizando-se técnicas baseadas em Inteligência Artificial (IA).

Em (6), foi implementado um Sistema Especialista para análise da qualidade da energia e monitoramento das distorções harmônicas presentes nos sinais de tensão e corrente do sistema. Em (7) é apresentado um algoritmo baseado em RNAs para estimação dos parâmetros das formas de onda de tensão ou corrente contaminadas por ruídos, onde o problema de estimação é formulado pelo uso de uma rede neural do tipo *adaline*.

É mostrado em (8) uma técnica para avaliação da frequência e estimação das componentes harmônicas em um sistema elétrico baseada na regressão linear Fuzzy. São utilizadas amostras digitalizadas de tensão, que são consideradas númeors Fuzzy, para estimar o conteúdo harmônico e a frequência dos sinais. O problema é formulado como um problema de otimização linear, onde o objetivo é minimizar o espelhamento das tensões amostradas.

Ao AGs são utilizados em (9) na estimação da variação de frequência e da magnitude da tensão e ângulo de fase para a implementação de um relé de frequência para proteção de um SEP.

Em (10), é apresentado uma aplicação de AGs para a redução da corrente de linha em um conversor CA/CC, onde o método proposto mostrou-se superior ao método tradicional de Newton-Raphson. (11) apresenta em seu trabalho um método para estimação de componentes harmônicas utilizando AGs binários híbridos. Neste trabalho, apenas o ângulo de fase do sinal ruidoso é estimado pelo AG proposto. Uma vez que o AG estima os ângulos de fase, estes são utilizados para estimar as amplitudes do sinal utilizando o método dos Mínimos Quadrados.

Um método para medição da magnitude de *Flickers* de tensão é proposto em (12). Neste trabalho, é apresentado um algoritmo baseado em AGs para estudo de Qualidade da Energia onde os AGs são utilizados para quantificar a magnitude e a frequência do Flicker no sistema.

Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos (AGs) para identificação de componentes harmônicas em um SEP. Os AGs são modelos computacionais de busca e otimização e vem sendo utilizados com sucesso na área de análise de Sistemas de Potência. O problema de estimação é tratado como um problema de otimização onde os AGs são utilizados para estimar os parâmetros ótimos do sistema. Serão analisadas as configurações binária e real. Após o desenvolvimento e a implementação dos algoritmos, os resultados serão comparados como o método de Fourier para validação do mesmo.

## 2.0 - 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 representado como uma forma de onda variante no tempo,  $x(t)$ , descrita em (1) (13):

$$x(t) = x_0 e^{-\lambda t} + \sum_{i=1}^N A_{c,i} \cos(iw_0 t + \theta_{c,i}) + A_{s,i} \sin(iw_0 t + \theta_{s,i}) \quad (1)$$

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;  $w_0$  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, 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  $w_0$  é a frequência do sistema, que no Brasil 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.

$$\begin{bmatrix} x(t_1) \\ x(t_2) \\ \vdots \\ x(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda t_1} & \dots & \cos(Nw_0 t_1 + \theta_{c,N}) & \sin(Nw_0 t_1 + \theta_{s,N}) \\ e^{-\lambda t_2} & \dots & \cos(Nw_0 t_2 + \theta_{c,N}) & \sin(Nw_0 t_2 + \theta_{s,N}) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ e^{-\lambda t_m} & \dots & \cos(Nw_0 t_m + \theta_{c,N}) & \sin(Nw_0 t_m + \theta_{s,N}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ A_{c,1} \\ A_{s,1} \\ \vdots \\ A_{c,N} \\ A_{s,N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(t_1) \\ e(t_2) \\ \vdots \\ e(t_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

As  $N$  equações representam os valores das tensões ou correntes provenientes do SEP. Deste modo, os AGs são utilizados para estimar os parâmetros desconhecidos da equação 1. Esta estimação é utilizada para recalculer os sinais da equação 2 a cada instante de tempo ( $x(t_k)$  calculado).

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.

O erro a cada instante de tempo pode ser calculado como:

$$e(t_k) = x'(t_k)_{(estimado)} - x(t_k)_{(calculado)} \quad (3)$$

### 3.0 - ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs são algoritmos de busca e otimização. Pertencem às classes dos algoritmos probabilísticas que utilizam procedimentos randômicos na busca por soluções ótimas ou aproximadamente ótimas. Eles propõe um paradigma alternativo ao processamento de dados convencional. Este novo paradigma se baseia na evolução natural, um método sofisticado de busca entre um vasto número de possíveis soluções.

Como todo método de otimização, os AGs são compostos por processos comuns para encontrar a solução ótima. A **função objetiva** formula o objetivo em termos dos parâmetros envolvidos no problema proposto. O **espaço de busca** considera todas as possibilidades de soluções do problema. A **função de avaliação** é a maneira pela qual o algoritmo avalia as possíveis soluções pertencentes ao espaço de busca. Esta retorna um valor real, uma nota ou índice, denotando o custo absoluto do indivíduo que foi dado como entrada. Essencialmente, um AG tenta minimizar ou maximizar o valor retornado pela função de avaliação.

O primeiro aspecto a ser considerado antes da utilização dos AGs é a representação destes. O AG processa populações de indivíduos, onde cada indivíduo é representado por uma estrutura de dados (vetor) de valores binários ou reais.

Inicialmente, os parâmetros do problema são codificados e é gerada uma população inicial  $P(t)$  composta por indivíduos  $x_n^t$ , onde  $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$  para  $t$  iterações. Cada indivíduo representa uma possível solução para o problema proposto. Cada solução é avaliada. Após a avaliação da população, o AG seleciona um subconjunto da população (espaço de busca) que irá produzir uma nova geração (iteração  $t + 1$ ) por meio de seleção.

Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais por meio de aplicação de operadores genéticos, cruzamento (recombinação genética) e mutação, gerando descendentes para a próxima geração. Uma abordagem elitista é adotada, uma vez que o objetivo principal do algoritmo não é a média da população, mas o melhor indivíduo da população. O elitismo é aplicado para garantir que a melhor solução seja repassada para a próxima sem alterar suas características.

Após um número predeterminado de iterações, o algoritmo converge e é esperado que o melhor indivíduo represente uma solução factível ótima ou aproximadamente ótima.

### 4.0 - O PARADIGMA DA PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETO

Como os AGs são uma técnica relativamente nova, ainda estão sendo propostos muitos operadores genéticos e evolutivos. Esta característica faz a implementação de computação seja genérica, fazendo com que novos códigos seja desenvolvidos continuamente. Então, para organizar o código de um AG de maneira estruturada e que seja aplicável em problemas distintos, foi necessário a implementação deste segundo o paradigma da programação orientada a objeto (POO). A POO significa que o *software* é organizado como uma coleção de objetos separados que incorporam tanto a estrutura quanto o comportamento dos dados, contrastando com a programação convencional.

A grande vantagem de *softwares* baseados em objetos é a sua fácil manutenção e atualização devido a sua flexibilidade e reutilização de códigos, permitindo a criação de componentes de novas classes usando o código existente. Esta característica possibilita a implementação de um AG geral, onde pode-se testar várias configurações propostas para o AG na aplicação de estimação de componentes harmônicas. Este trabalho

apresenta uma metodologia de desenvolvimento de um *software* baseado em objetos, que proporcionam melhor entendimento do problema proposto, compreendendo desde o projeto até a sua implementação.

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 1, que resume o programa proposto onde pode-se observar os objetos e as classes. Na figura, uma classe é representada pelos quadros, que contém, o nome das classes e uma lista de atributos (15).

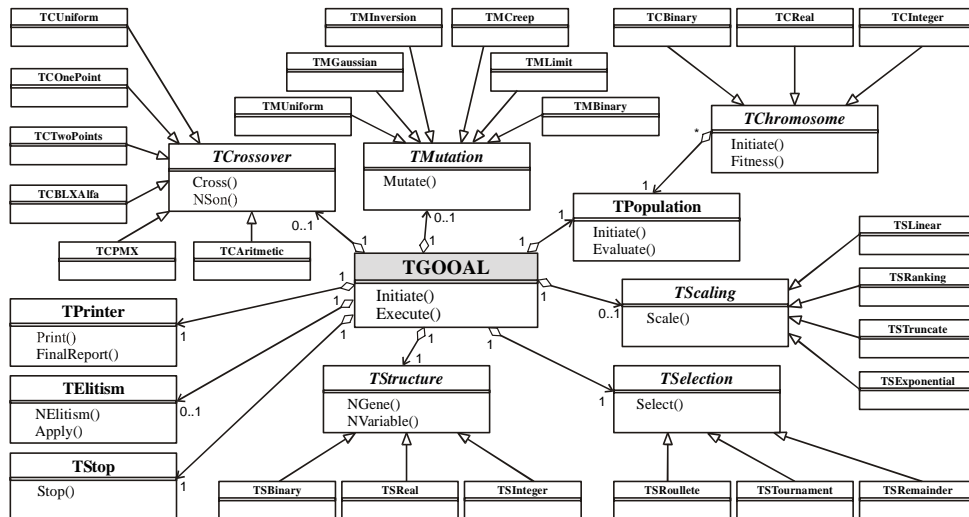


FIGURA 1 – Diagrama de classe do programa proposto

O conceito principal da POO é a própria noção de objeto. Segundo esse paradigma de programação, o programa é organizado como um conjunto de objetos separados que incorporam tanto a estrutura quanto o comportamento dos dados. 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.

Para visualizar todas as classes criadas para a implementação proposta projetou-se um *software*, descrevendo todos os tipos de dados abstratos e as relações entre eles. Uma breve descrição das partes que compõem o *software* é mostrada na próxima seção.

#### 4.1 Descrição do Software desenvolvido

O *software* desenvolvido foi implementado na análise das componentes harmônicas presentes no SEP utilizando-se Algoritmos Genéticos. Nesta seção serão descritas o conjunto de classes necessárias para implementar o processo de estimação baseado em Algoritmos Genéticos.

Todas as classes do problema são brevemente mostradas na FIGURA 1. A classe principal, responsável pelo gerenciamento das demais classes, é a *TGOOAL*. Esta classe contém objetos das outras classes, tais como *TPopulacaoInicial*, *TCruzamento*, *TMutacao*, *TPopulacao*, *TEscalonamento*, *TSelecao*, *TEstrutura*, *TParada*, *TElitismo* e *TImpressao*. Os nomes das classes sugerem a sua própria função.

Pode-se citar como exemplo a classe *TChromosome*, que apresenta comportamento diferenciado de acordo com a representação binária ou real. Desta forma, diferentes métodos são implementados para as classes.

Outras classes foram desenvolvidas sem a necessidade de mecanismos especiais, como as classes *TPrinter*, que imprime relatórios sobre o processo de busca, *TElitism*, que copia o melhor indivíduo de uma geração para a próxima, e a classe *TStop*, que decide quando a busca termina.

Todas as classes brevemente descritas são as mesmas, qualquer que seja o problema proposto. O que faz uma aplicação diferente das outras é a definição de como o indivíduo será codificado, a função de avaliação que determina a nota de cada indivíduo e a escolha do conjunto de operadores genéticos.

#### 5.0 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA

A influência de cada parâmetro no desempenho do algoritmo depende da classe de problemas que se está tratando. Assim, a determinação destes parâmetros é uma investigação empírica e depende da realização de um grande número de testes.

Deve ser escolhido a função de avaliação, o tipo de representação do AG, o conjunto de operadores genéticos, as probabilidades de cruzamento e mutação, a população inicial e o critério de parada. Todos estes parâmetros juntos representam a configuração do problema. O propósito deste artigo é comparar várias configurações para o AG a fim de definir a melhor delas para a identificação de componentes harmônicas de um SEP.

### 5.1 A Função de Avaliação

A Função de Avaliação (*FA*) é a função responsável por avaliar a solução do problema a cada geração. O objetivo aqui é minimizar o erro de estimação  $e$  dado pela equação (3). O erro médio quadrático é calculado e minimizado utilizando-se a equação (4)

$$FA = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N e_k^2}{N} + \Delta}} \quad (4)$$

Onde  $\Delta$  é uma constante muito pequena (neste trabalho =0,00001) para evitar problemas de divisão por zero caso o erro calculado seja zero.

### 5.2 Representação genética do problema

O primeiro aspecto a ser considerado antes da utilização dos AGs é a representação do problema. Cada indivíduo foi representado por uma estrutura de dados (vetor) de valores binários ou reais. A tarefa do AG proposto é encontrar um valor estimado  $x'(t)$ , estimado pelo AG, da função  $x(t)$ , onde  $x(t)$  é a forma de onda de tensão proveniente do sistema.

Os parâmetros estimados pelo AG são a componente CC e a magnitude da frequência fundamental e das componentes harmônicas seno e co-seno da forma de onda de tensão mostrada pela FIGURA 2.

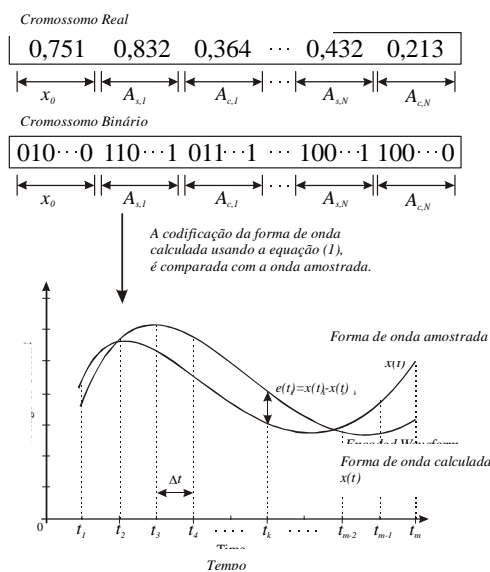


FIGURA 2 – Parâmetros da codificação binária e real.

### 5.3 A configuração do AG

Para cada codificação, existem diferentes operadores genéticos. Nesta análise, foram escolhidos diferentes métodos de seleção, cruzamento e mutação, associados com suas probabilidades, e o número de indivíduos elitistas para cada codificação (binária ou real), especificados na TABELA 1.

TABELA 1  
PARÂMETROS DO AG PROPOSTO

Parâmetros	Características
População Inicial	12, 24 e 48 indivíduos.
Escalonamento	Sem Escalonamento e Escalonamento linear, com fator de escalonamento de 2.0
Método de Seleção Elitismo	Seleção da Roleta, Seleção por Torneio, com 2 repetições e Seleção pelo Método Estocástico do Resto. 1 ou 2 Indivíduos Elitistas.
Cruzamento	Cruzamento Binário Uniforme, de 1-Ponto ou 2-Pontos. Cruzamento Real Média Aritmética e Cruzamento BLX- $\alpha$ , com $\alpha$ igual a 0,5.
$P_c$	Probabilidade de Cruzamento de 90% e 97%
Mutação	Mutação Binária e Mutação Real Uniforme ou Gaussiana, com $\delta = 0,05$ .
$P_m$	Probabilidade de Mutação de 5% e 10%.

Inicialmente, foi determinada a representação binária de um indivíduo como sendo um vetor composto por 10 *bits* por parâmetros. A definição do tamanho da população inicial, tipo operador genético, bem como suas probabilidades para as representações binária e real foram definidas a partir de testes, onde foram avaliados também, diferentes tipos de operadores evolucionários, totalizando 504 configurações diferentes das quais 216 para a codificação binária e 288 para a codificação real.

Neste trabalho as seguintes características foram aplicadas:

- O tamanho de cada indivíduo da população é fixo;
- Cada parâmetro de cada AG foi analisado separadamente ficando os outros fixos;
- Cada AG foi executado 20 vezes para cada configuração para cálculo o desvio padrão do algoritmo.

## 6.0 - OS DADOS ANALIZADOS

Como enfatizado anteriormente, o propósito principal deste trabalho é identificar as várias frequências harmônicas presente no sinal. Levando isso em conta, um sinal típico de distúrbio no sistema de transmissão da CHESF foi utilizado para análise e validação do algoritmo proposto.

Quando da ocorrência de um distúrbio no sistema, as formas de onda das tensões e correntes são drasticamente afetadas. A magnitude da tensão e corrente são corrompidos por ruídos, na forma de componentes de CC (se deteriorando exponencialmente) e também componentes de frequência fundamental e superiores a 60 Hz.

Para verificação do algoritmo proposto, foram utilizados dados provenientes de uma linha de transmissão de 230KV, considerada uma linha típica da CHESF. A FIGURA 3 caracteriza a forma de onda do distúrbio.

As grandezas analógicas provenientes do sistema elétrico foram obtidas por meio da rede de monitoração da CHESF. A rede de monitoração é composta de uma rede de registradores digitais de perturbações que, associados a recursos do sistema de telecomunicações, permite disponibilizar as informações em uma estação de coleta e armazenamento de dados para uma posterior análise das perturbações. Os registradores são interligados a um servidor via rede TCP/IP ou linha telefônica o que permite que, quando da ocorrência de uma perturbação, que uma rotina implementada no servidor armazene e disponibiliza automaticamente os dados coletados na home-page da Chesf proporcionando um rápido acesso às informações.

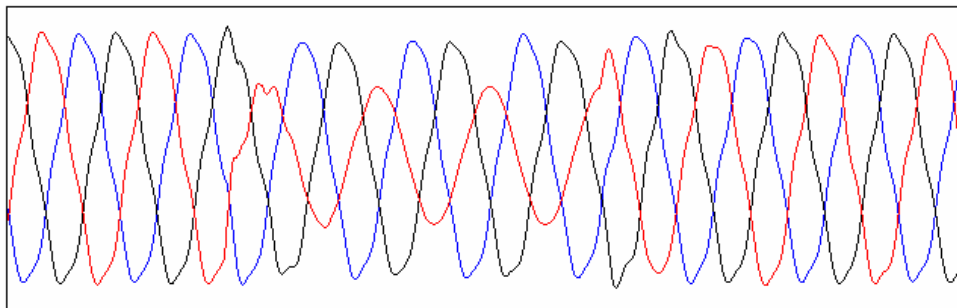


FIGURA 3 – Forma de onda das tensões no momento do distúrbio.

## 7.0 - APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA ANÁLISE HARMÔNICA

Como primeira etapa do trabalho, foi necessário pré-processar os dados coletados (sinal de tensão contínuo no tempo) por meio de reamostragem, normalização e conversão do formato para torná-los mais apropriados à sua utilização no algoritmo proposto.

A Tabela II descreve os resultados obtidos para a melhor configuração do AG para a forma de onda da tensão mostrada na FIGURA 2 onde as componentes harmônicas presentes no sinal foram extraídas utilizando o método clássico TDF e o método proposto a fim de comparar os resultados, onde:

- A identificação da probabilidade de cada evento, ou seja, o cruzamento ou a mutação, foi obtida a partir de testes realizados com valores possíveis de probabilidades;
- Os dados **Exatos**, apresentados na coluna 2 da Tabela 2 refere-se a formulação matemática da equação 1, para a forma de onda de tensão da FIGURA 3;
- Uma comparação com o método clássico de Fourier, a Transformada Discreta de Fourier (coluna 3), onde a coluna 4 apresenta o **Erro** médio obtido pelo método, em comparação com os dados exatos da coluna 2;
- As colunas 5, 6, 7 e 8 da Tabela se refere aos resultados obtidos pelo algoritmo implementado, para a representação do **AG Binário** e o **AG Real**, juntamente com o seus **Erros** médios, em comparação com os dados exatos apresentados na coluna 2, respectivamente.

A configuração que apresentou menor erro nas estimativas dos parâmetros para o **AG Binário** (coluna 5) foi: população inicial de 24 indivíduos, Seleção pelo método da Roleta, dois indivíduos elitistas, cruzamento de um-ponto com probabilidade de cruzamento de 0,90 e probabilidades de mutação iguais a 0,1.

Para o **AG Real** (coluna 7), a configuração que apresentou menor erro nas estimativas dos parâmetros foi: população inicial de 24 indivíduos, Seleção pelo método da Roleta, dois indivíduos elitistas, cruzamento média aritmética com probabilidade de cruzamento de 0,90 e mutação gaussiana com probabilidades de mutação iguais a 0,05.

Pode-se observar na Tabela 2 que a representação real apresenta resultados melhores (menor erro médio) em comparação com a representação binária, para ambos os casos estudados, onde pode ser observada uma superioridade dos resultados alcançada pelo uso dos Algoritmos Genéticos, especialmente na estimação do componente CC.

TABELA 2  
ERRO MÉDIO APRESENTADO PELO ALGORITMO

	Exato	Fourier	Erro (%)	AG Binário	Erro (%)	AG Real	Erro (%)
$V_0$	<b>0,0800</b>	0,0203	74,625	0,0079 ± 0,0033	90,1250	0,0690 ± 0,0000	13,750
$V_{s,1}$	<b>100,00</b>	100,001	0,0008	100,00 ± 0,0000	0,0000	100,00 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,1}$	<b>0,0000</b>	-0,0073	0,0000	0,0000 ± 0,0000	0,0000	0,0000 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,2}$	<b>0,0920</b>	0,0899	2,2826	0,0943 ± 0,0288	2,5000	0,0920 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,2}$	<b>0,2432</b>	0,2433	0,0411	0,2507 ± 0,0040	3,0839	0,2432 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,3}$	<b>-2,8328</b>	-2,8335	0,0247	-2,8123 ± 0,0078	0,7237	-2,8328 ± 0,0006	0,0000
$V_{s,3}$	<b>1,4668</b>	1,4675	0,0477	1,4712 ± 0,0824	0,3000	1,4668 ± 0,0007	0,0000
$V_{s,4}$	<b>0,1675</b>	0,1667	0,4776	0,1676 ± 0,0000	0,0597	0,1675 ± 0,0008	0,0000
$V_{s,4}$	<b>0,0660</b>	0,0661	0,1515	0,0670 ± 0,0303	1,5152	0,0660 ± 0,0009	0,0000
$V_{s,5}$	<b>-4,5908</b>	-4,5897	0,0240	-4,5894 ± 0,0000	0,0305	-4,5908 ± 0,0010	0,0000
$V_{s,5}$	<b>3,5283</b>	3,5298	0,0425	3,7586 ± 0,1117	6,5272	3,5283 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,6}$	<b>0,0132</b>	0,0134	1,5152	0,0132 ± 0,0070	0,0000	0,0132 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,6}$	<b>-0,1695</b>	-0,1701	0,3540	-0,1696 ± 0,0009	0,0590	-0,1695 ± 0,0013	0,0000
$V_{s,7}$	<b>-0,2352</b>	-0,2355	0,1276	-0,2341 ± 0,0083	0,4677	-0,2352 ± 0,0014	0,0000
$V_{s,7}$	<b>-0,7751</b>	-0,7752	0,0129	-0,5000 ± 0,0000	35,492	-0,7751 ± 0,0015	0,0000
$V_{s,8}$	<b>-0,0360</b>	-0,0359	0,2778	0,0005 ± 0,0180	101,39	-0,0360 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,8}$	<b>0,0346</b>	0,0345	0,2890	0,0347 ± 0,0164	0,2890	0,0346 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,9}$	<b>-0,2186</b>	-0,2187	0,0457	-0,2185 ± 0,0098	0,0457	-0,2186 ± 0,0018	0,0000
$V_{s,9}$	<b>-0,2604</b>	-0,2602	0,0768	-0,2498 ± 0,0055	4,0707	-0,2604 ± 0,0019	0,0000
$V_{s,10}$	<b>-0,0194</b>	-0,0193	0,5155	0,0005 ± 0,0061	102,58	-0,0194 ± 0,0000	0,0000
$V_{s,10}$	<b>0,0049</b>	0,0049	0,0000	0,0054 ± 0,0030	10,204	0,0049 ± 0,0000	0,0000
Erro Total (%)			3,6787		16,3391		0,625

## 8.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um método para identificação de harmônicos em SEP baseado em AGs. Neste estudo, foi levada em conta a variação do número de indivíduos da população inicial, tipo de codificação do AG, tipos de cruzamento e mutação, bem como as taxas de cruzamento e mutação, diferentes tipos de métodos de seleção, e número de indivíduos elitistas. Para tal foi utilizado um programa desenvolvido sob o paradigma da Programação Orientada a Objeto, denominado GOOAL.

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 Sistemas de Potência.

Foi também feito um estudo comparativo com o método baseado na Transformada de *Fourier*, 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 tal ferramenta na estimação de harmônicos se mostra bastante precisa e eficaz, sendo uma alternativa para enfrentamento de problemas desta natureza em SEP.

## 9.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP/EESC) e CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco pelas facilidades proporcionadas quando do desenvolvimento deste trabalho, bem como ao apoio financeiro recebido por parte da CAPES – Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a FAPES – Fundação de Amparo a Pesquisa.

## 10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. A. Girgis, M. C. Clapp, E. B. Makram, J. Qui, J. G. Dalton, R. C. Satoe (1990) "Measurement and characterization of harmonic and high frequency distortion for a large industrial load", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, no. 1, pp. 427-434.
- (2) IEEE Std. 519-1992; IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System. New York, IEEE Publish, 1993.
- (3) IEEE Std. 1159; IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality. New York, IEEE Publish, 1995.
- (4) A. A. Girgis e E. B. Chang (1991) "A Digital Measurement Scheme for Tracking of Power Harmonics". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.6, n.3, p.1152-1160.
- (5) S.A. Solima; K. El-Naggar e A.M. Al-Kandari (1997) "Kalman Filtering Based Algorithm for Low Frequency Power Systems Sub-Harmonics Identification". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. v.17, n1, p.38-42.
- (6) D. D. Shipp; W. Vilcheck; M. E. Swartz; N. H. Woodley (1995) "Expert System for Analysis of Electric Power System Harmonic". *IEEE Industry Applications Magazine*, v.1, n.2, p.34-35, Mar/April.
- (7) P. K. Dash; S. K. Panda; B. Mishra e P. D. Swain (1997) Fast Estimation of Voltage and Current Phasors in Power Networks Using an Adaptive Neural Network. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.12, n. 4, p. 1494-1499.
- (8) S.A. Soliman; M. A. Mostafa e M. E. El-Hawary (2001) Frequency and Harmonics Evaluation in power Networks Using Fuzzy Regression Technique.
- (9) K. M. El-Naggar e K. M. Youssef (2000) A Genetic Based Algorithm for Frequency-Relaying Applications. *Electric Power Systems Research*, v.55, p.173-178.
- (10) SUNDARESWARAN & CHADRA (2002) Evolutionary Approach for Line Current Harmonic Reduction in AC/DC Converters. *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, v. 49, n. 3, pp. 716-719.
- (11) BETTAYEB & QIDWAI (2003) A Hibrid Least Squares-GA-Based Algorithm for Harmonic Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, pp. 377-382.
- (12) W. M. Al-Hasawi e K. M. El-Naggar (2004) A Genetic Based Algorithm for Voltage Flicker Measurement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 26, n. 8, p. 593-596, October.
- (13) R. A. MACÊDO; D. S. FILHO; D. V. Coury e A. P. L. F. CARVALHO (2003). A Genetic Algorithm Based Approach to Track Voltage and Current Harmonics in Electrical Power Systems, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. V. 13, n. 2-4, pp. 167-175. IOS PRESS, ISSN 1064-1246.