

Caracterização de Componentes Harmônicas em um Sistema Elétrico via Algoritmos Genéticos

S. A. Souza, M. Oleskovicz, D. V. Coury,

Resumo – Em um sistema elétrico ideal, a energia é suprida a uma frequência constante com níveis de tensão específicos. No entanto, formas de onda reais encontradas em sistemas de potência são caracterizadas como a combinação de formas de onda senoidais com outras de frequências múltiplas a da fundamental, compondo assim, formas de onda não desejadas. Esse artigo propõe o uso dos Algoritmos Genéticos na extração de componentes harmônicas em sistemas de potência. O objetivo é identificar as amplitudes das várias frequências harmônicas presentes em formas de onda de um sistema elétrico. Para avaliar o AG proposto, duas formas de onda são consideradas. A primeira considera um chaveamento de um banco de capacitores e, a última, leva em conta uma forma de onda característica de uma energização de um transformador de potência. Ambas as simulações foram realizadas através do software ATP. Os resultados obtidos da representação real do AG mostraram um desempenho superior comparado à representação binária, como também, ao método tradicional da Transformada de *Fourier*.

Palavras Chave – Algoritmos Genéticos, Harmônicas, Energização e Oscilações Transitórias.

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é uma das ferramentas utilizadas para a conversão e transporte da energia. Uma de suas funções é prever a demanda futura de energia de tal modo que, centrais geradoras adequadamente situadas e sistemas de transmissão bem coordenados, flexíveis e eficazes, possam atender a uma determinada região por meio de sistemas de distribuição sempre prontos a fornecer a potência requerida pela carga. À medida que o sistema cresce, novas fontes de energia devem ser procuradas para satisfazer à crescente demanda; também novas linhas de transmissão devem ser construídas para interligar unidades geradoras entre si, a um número cada vez maior de pontos de distribuição e a outros SEPs.

Para avaliarmos o quanto um SEP está operando fora de suas condições normais, duas grandezas elétricas básicas podem ser empregadas: a tensão e a frequência. A frequência em um sistema interligado situa-se na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$. Em relação à tensão, devem ser observados a forma de onda, a

qual deve ser o mais próximo possível à forma senoidal; simetria do sistema elétrico e magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

As formas de onda (tensões e/ou correntes trifásicas) que retratam a operação real de um sistema de potência são sinais tipicamente não periódicos, contendo oscilações de frequência superpostas aos sinais de frequência fundamental que distorcem a forma de onda senoidal fornecida pelos geradores [1].

Dentre os diversos tipos de distúrbios que podem vir a se manifestar em um sistema elétrico, destacam-se as distorções harmônicas. As distorções harmônicas, por definição, ocorrem em um estado estacionário, e são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema, estando presentes continuamente ou, no mínimo, por alguns segundos. Tais distúrbios estão associados à operação contínua de cargas com características não-lineares ligadas às redes elétricas, como por exemplo, o uso de inversores, conversores CA\CC, fornos elétricos, lâmpadas fluorescentes e computadores, dentre outros.

Da norma do IEEE Std. 519 [2], destacam-se alguns efeitos, em virtude das distorções harmônicas em formas de onda de tensão e corrente, os quais podem alterar a operação de alguns dispositivos e/ou equipamentos como motores elétricos de indução, transformadores, condutores elétricos, banco de capacitores, equipamentos eletrônicos, dispositivos de proteção e aparelhos de medição, comumente conectados às redes elétricas.

Segundo Emanuel *et al.* [3], atualmente os equipamentos e maquinários estão mais sensíveis às variações da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) fornecida pelas concessionárias, uma vez que a grande maioria dos aparelhos modernos possui controles microprocessados. Tal característica os torna mais sensíveis a certos tipos de distúrbios, resultando em falhas de operação, controle e proteção dos mesmos.

No contexto delineado, fica claro que o uso de técnicas que objetivem uma melhor estimação das distorções harmônicas presentes em um SEP, passa a ser imprescindível para a operação correta do mesmo.

Tradicionalmente, para o objetivo anteriormente mencionado, as teorias de estimação estática ou dinâmica podem ser utilizadas. 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.

Este trabalho foi financiado pela FAPESP.

S. A. Souza, M. Oleskovicz e D. V. Coury desenvolvem atividades acadêmicas e profissionais junto ao Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos – SP, Brasil (e-mails: {silvios, olesk, coury}@sel.eesc.sc.usp.br).

Em sistemas de potência, as variáveis de estimação de estado são as magnitudes da tensão e seu ângulo de fase associado. Kamwa e Grondlin [4] mostraram que, para um modelo não linear de tensão do sistema, a técnica baseada no ajuste dos MQ oferece uma estimativa razoável do fasor de tensão. O mesmo pode ser dito do método de ajuste por Mínimos Quadrados Recursivos.

Girgis *et al.* [5] constaram que a técnica baseada na TDF apresenta erros no processo de ruídos randômicos, geralmente no processo de medição do sinal. O custo computacional do algoritmo é muito baixo, mas sua execução pode ser afetada pela componente CC presente no sinal. O algoritmo da TRF diferencia-se da TDF apenas pelo seu método de processamento das informações, já que o primeiro é mais otimizado.

O Filtro de *Kalman* é baseado em uma estimativa dinâmica e possui a capacidade de identificar, analisar e localizar as harmônicas contidas em um sinal trifásico não estacionário. Apesar de apresentar resultados bastante razoáveis, uma análise estatística preliminar do sinal se faz necessária.

Em ambos os métodos, estático ou dinâmico, a presença de dados incorretos no conjunto de medição tem um efeito significativo no desempenho da estimação das harmônicas.

No intuito de tentar melhorar o problema de estimação das harmônicas em sistemas de potência, técnicas baseadas no uso de Inteligência Computacional também têm sido aplicadas ao problema em questão. Como por exemplo, Redes Neurais Artificiais (RNAs) que podem ser empregadas como sistemas digitais *on-line* para receber determinados sinais e atualizar os parâmetros harmônicos para cada ponto amostrado. Observa-se que bons resultados são obtidos da aplicação de RNAs à ambientes ruidosos. Para ilustrar tais situações, Dash *et al.* [6] apresentam uma proposta baseada na utilização de RNAs na estimação de distorções harmônicas em um SEP. Os parâmetros aprendidos pelo algoritmo proposto foram apropriadamente ajustados para promover uma convergência rápida e a rejeição de ruídos na identificação de sinais distorcidos no SEP. Outro método, o dos Algoritmos Genéticos (AGs), vêm recebendo atenção devido a sua robustez na busca estocástica aplicada a problemas de otimização, com evidências da sua aplicação em diversos problemas, como afirmado em Goldberg [7].

Este trabalho visa mostrar a potencialidade dos Algoritmos Genéticos na estimação de parâmetros que correspondem às componentes harmônicas de até a 25ª ordem, considerando duas situações distintas. A primeira oriunda de um chaveamento de banco de capacitores, ocorrido em um dado sistema de distribuição. A segunda é proveniente de uma forma de onda característica de uma situação de energização de um transformador de potência. Os resultados obtidos demonstram alta eficiência dos AGs, na sua forma de representação real, quando comparado tanto a representação binária quanto a técnica tradicional da Transformada de *Fourier*.

II. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS PARA OS SINAIS EM ANÁLISE

A. O Modelo Harmônico

Matematicamente, um sinal periódico e distorcido pode ser representado adequadamente em termos de sua frequência fundamental e suas componentes harmônicas, através da Série de *Fourier*. Cada componente do sinal possui uma amplitude associada a uma determinada frequência. Assim, um sinal variante no tempo $x(t)$ pode ser matematicamente escrito como em (1) [8]:

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

Em (1), tem-se que x_0 é a componente contínua do sinal $x(t)$ e λ é a constante de tempo do sistema. $A_{c,i}$ e $A_{s,i}$ são as amplitudes co-seno e seno das i -ésimas harmônicas; ω_0 é a frequência fundamental, em radianos; i é a ordem da componente harmônica evidenciada e N é o número de harmônicas presente no sinal utilizado para representar $x(t)$.

A fim de obter os parâmetros da forma de onda, assume-se que o sinal $x(t)$ é amostrado a uma taxa predefinida Δt . Após $(m-1)\Delta t$ segundos, haverá m amostras, $x(t_1)$, $x(t_2)$, ..., $x(t_m)$, para os tempos t_1 , t_2 , ..., t_m . Sendo t_1 uma referência arbitrária de tempo.

Mediante a formulação apresentada, podemos inferir o sistema de equações dado em (2), onde $e(t_k)$, $k = 1, \dots, m$, é o erro estimado no tempo t_k . Em um sistema elétrico de potência, um sinal $x(t)$ é normalmente considerado como sendo um sinal de tensão ou corrente, onde $\omega_0 = 2\pi f$. Considerando uma frequência fundamental de 60 Hz, a frequência em radianos será de 377 rad/s.

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

Contudo, o que normalmente ocorre é o número de amostras (m) ser maior que o número de parâmetros ($N+1$), fazendo o sistema dado por (2) ser superestimado. Então, resolver o sistema de equações dado em (2), para encontrar x_0 , $A_{c,i}$ e $A_{s,i}$, $i = 1, \dots, N$, não é uma tarefa simples.

No presente trabalho, tal sistema de equações será resolvido dispondo-se da teoria referente aos Algoritmos Genéticos. Logo, o objetivo de todo o processo resultante é, como já comentado, encontrar um sinal estimado, sendo este composto pelas componentes CC, fundamental e demais harmônicas presentes no sinal. A idéia de minimização do vetor de erro $[e]$ é inserida no processo para que o sinal estimado seja o mais próximo possível daquele amostrado, dado como entrada do algoritmo. A Fig. 1 ilustra a idéia apresentada.

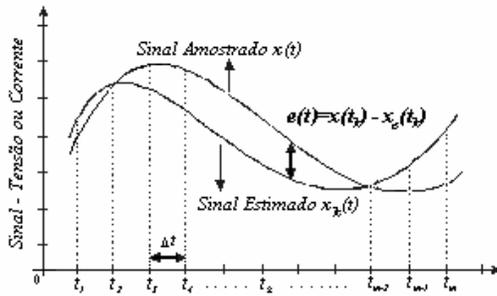


Fig. 1. Representação do erro (e) a ser minimizado.

O conjunto de equações em (2) pode ser representado de forma sucinta por:

$$[S] = [f(x)] + [e] \quad (3)$$

Nesta, $[S]$ e $[f(x)]$ continuam com as mesmas dimensões; x são os parâmetros a serem estimados (amplitudes das harmônicas) e $[e]$ é o vetor de erros associado às medidas desconhecidas.

Como visto, quanto melhor a minimização do vetor de erros, maior será a semelhança entre o sinal amostrado e aquele estimado (Fig. 1). Portanto, a aplicação dos AGs busca, através da minimização do erro (e), a obtenção das componentes harmônicas que melhor representem o sinal em análise.

III. ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Os AGs são algoritmos de busca e otimização. Pertencem às classes dos algoritmos probabilísticos que utilizam procedimentos randômicos na busca por soluções ótimas ou próximas destas por um paradigma baseado na evolução natural.

Como todo método de otimização, os AGs são compostos por processos comuns para encontrar a solução ótima. A função objetivo caracteriza o problema em termos dos parâmetros envolvidos a serem estimados. O espaço de busca considera todas as possibilidades de soluções do problema. A função de aptidão 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, relacionado ao indivíduo que foi dado como entrada. Essencialmente, um AG tenta minimizar ou maximizar o valor retornado pela função de aptidão.

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 composta por indivíduos. Cada indivíduo representa uma possível solução para o problema proposto. Após a avaliação da solução e da população, os AGs selecionam um subconjunto da população (espaço de busca) que irá produzir a nova população por meio da seleção dos indivíduos mais aptos. A seleção é baseada no custo relativo do candidato na população julgada pela função de aptidão.

Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais por meio da aplicação de operadores genéticos como cruzamento (recombinação genética) e mutação, gerando descendentes para a próxima geração, Goldberg [7]. O elitismo também pode ser aplicado para garantir que a melhor solução seja repassada para a próxima geração sem alterar suas características.

Após um número predeterminado de iterações, o algoritmo converge e é esperado que o melhor indivíduo venha a representar uma solução factível ótima ou próxima a esta.

IV. FORMAS DE ONDAS UTILIZADAS NA ANÁLISE HARMÔNICA

As duas situações a serem consideradas neste trabalho, chaveamento de banco de capacitores e energização de um transformador de potência, serviram de base para o estudo da estimação das componentes harmônicas presentes em tais sinais.

Para a caracterização de um chaveamento de um banco de capacitores, comenta-se que foi modelado um sistema de distribuição composto de um transformador principal (138/13,8 kV) e de outros transformadores de distribuição da concessionária e de particulares alocados sobre um determinado sistema real. Em SOUZA [9], é ilustrado e comentado com mais detalhe a elaboração de tal sistema, bem como certas peculiaridades do mesmo. A Fig. 2 retrata uma situação de oscilação transitória sobre o sistema comentado.

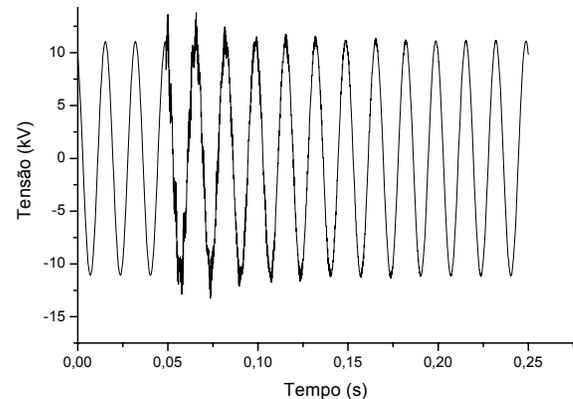


Fig. 2. Oscilação transitória de um chaveamento de um banco de capacitores.

Na situação de energização de um transformador de potência, dispôs-se de outra modelagem de um sistema de distribuição real conforme orientações e valores observados em campo, sendo que estes foram repassados pela concessionária de energia local. Tal sistema consiste de uma fonte equivalente de 138 kV, 30 MVA, conectada a um transformador de potência de 25 MVA, relação de transformação de 138 kV para 13,8 kV, dois transformadores de corrente para medição das magnitudes de corrente (alta e baixa tensão). Somando-se a estes, uma linha de distribuição com 5 km de extensão com a conexão de uma carga de 10 MVA. Desta configuração, decorre a situação de energização de um transformador de potência, Fig. 3, conforme apresentado por BERNARDES, [10].

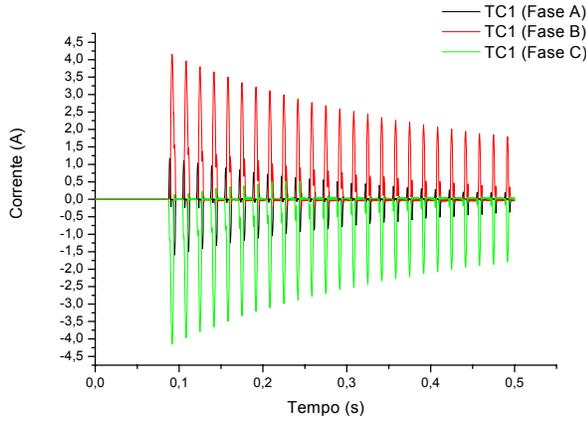


Fig. 3. Forma de onda representativa de uma energização de transformador .

Para a utilização destes sinais, necessita-se de um pré-processamento para que os mesmos possam representar da melhor forma possível, àqueles sinais encontrados na prática. Essa adequação passa pelos processos de filtragem, fazendo uso de um filtro passa-baixa *Butterworth*, como também do processo de digitalização, sendo utilizado um conversor de 12 *bits*, tipicamente encontrado em relés digitais. Outro fato importante, é que as equações que seguem, descrevem matematicamente apenas 1 ciclo das formas de ondas de tensão e corrente simuladas. Tal ciclo em análise foi tomado logo após o início de alterações abruptas nas formas de onda analisadas. Para aplicações práticas, as componentes harmônicas de ordens elevadas (entre a 25^a e a 50^a ordem, dependendo do sistema) podem ser geralmente desprezadas da análise em sistemas de potência [11].

Utilizando-se de uma frequência de corte de 2 kHz e do processo de digitalização, conforme já comentado, obtem-se a representação matemática da Fig.2 que é dada pela equação (4) que segue:

$$\begin{aligned}
 V(t) = & 0,0038e^{-0,02t} + 0,7769 \cos(\omega t) - 0,2335 \sin(\omega t) + 0,0082 \cos(2\omega t) - 0,0004 \sin(2\omega t) \\
 & + 0,0087 \cos(3\omega t) - 0,0002 \sin(3\omega t) + 0,0102 \cos(4\omega t) + 0,0001 \sin(4\omega t) + 0,0135 \cos(5\omega t) \\
 & + 0,0004 \sin(5\omega t) + 0,0220 \cos(6\omega t) + 0,0012 \sin(6\omega t) + 0,0708 \cos(7\omega t) + 0,0170 \sin(7\omega t) \\
 & - 0,0451 \cos(8\omega t) + 0,0084 \sin(8\omega t) - 0,0172 \cos(9\omega t) + 0,0015 \sin(9\omega t) - 0,0105 \cos(10\omega t) \\
 & + 0,0007 \sin(10\omega t) - 0,0075 \cos(11\omega t) + 0,0004 \sin(11\omega t) - 0,0059 \cos(12\omega t) + 0,0004 \sin(12\omega t) \\
 & - 0,0048 \cos(13\omega t) + 0,0004 \sin(13\omega t) - 0,0041 \cos(14\omega t) + 0,0004 \sin(14\omega t) - 0,0037 \cos(15\omega t) \\
 & + 0,0003 \sin(15\omega t) - 0,0033 \cos(16\omega t) + 0,0004 \sin(16\omega t) - 0,0030 \cos(17\omega t) + 0,0003 \sin(17\omega t) \\
 & - 0,0028 \cos(18\omega t) + 0,0004 \sin(18\omega t) - 0,0026 \cos(19\omega t) + 0,0004 \sin(19\omega t) - 0,0025 \cos(20\omega t) \\
 & + 0,0004 \sin(20\omega t) - 0,0024 \cos(21\omega t) + 0,0004 \sin(21\omega t) - 0,0024 \cos(22\omega t) + 0,0004 \sin(22\omega t) \\
 & - 0,0023 \cos(23\omega t) + 0,0003 \sin(23\omega t) - 0,0024 \cos(24\omega t) + 0,0003 \sin(24\omega t) - 0,0025 \cos(25\omega t) \\
 & + 0,0002 \sin(25\omega t)
 \end{aligned} \quad (4)$$

Por (5) obtemos matematicamente a representação da segunda situação, que é a de energização do transformador de potência. Para esta caracterização (Fig. 3), foi considerada uma frequência de corte de 1,5 kHz.

$$\begin{aligned}
 I(t) = & -0,0311 e^{-0,02t} + 0,0879 \cos(\omega t) + 0,0829 \sin(\omega t) - 0,1018 \cos(2\omega t) - 0,0351 \sin(2\omega t) \\
 & + 0,0039 \cos(3\omega t) + 0,0215 \sin(3\omega t) + 0,0280 \cos(4\omega t) - 0,0785 \sin(4\omega t) + 0,0111 \cos(5\omega t) \\
 & + 0,0581 \sin(5\omega t) + 0,0028 \cos(6\omega t) + 0,0013 \sin(6\omega t) - 0,0264 \cos(7\omega t) - 0,0014 \sin(7\omega t) \\
 & - 0,0078 \cos(8\omega t) - 0,0105 \sin(8\omega t) + 0,0052 \cos(9\omega t) + 0,0046 \sin(9\omega t) - 0,0044 \cos(10\omega t) \\
 & - 0,0069 \sin(10\omega t) + 0,0054 \cos(11\omega t) + 0,0064 \sin(11\omega t) + 0,0025 \cos(12\omega t) - 0,0013 \sin(12\omega t) \\
 & - 0,0077 \cos(13\omega t) + 0,0055 \sin(13\omega t) + 0,0003 \cos(14\omega t) - 0,0059 \sin(14\omega t) + 0,0029 \cos(15\omega t) \\
 & - 0,0003 \sin(15\omega t) - 0,0012 \cos(16\omega t) + 0,0001 \sin(16\omega t) + 0,0017 \cos(17\omega t) + 0,0018 \sin(17\omega t) \\
 & + 0,0002 \cos(18\omega t) - 0,0017 \sin(18\omega t) - 0,0016 \cos(19\omega t) + 0,0035 \sin(19\omega t) - 0,0009 \cos(20\omega t) \\
 & - 0,0025 \sin(20\omega t) + 0,0010 \cos(21\omega t) - 0,0008 \sin(21\omega t) + 0,0002 \cos(22\omega t) + 0,0004 \sin(22\omega t) \\
 & + 0,0005 \cos(23\omega t) + 0,0009 \sin(23\omega t) - 0,0004 \cos(24\omega t) - 0,0009 \sin(24\omega t) + 0,0001 \cos(25\omega t) \\
 & + 0,0013 \sin(25\omega t)
 \end{aligned} \quad (5)$$

V. A METODOLOGIA UTILIZADA

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

Devem ser escolhidos 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 representam a configuração do problema.

A. A Função de Avaliação

A partir de cada amostra i do sinal, onde $i = 1, 2, \dots, m$, o m -ésimo erro deve ser calculado. Assim, para o número total de m amostras, atribui-se um valor ao erro total (E_T) conforme a equação (6), relacionado ao indivíduo da população em análise.

$$E_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m e_i^2}{m}} \quad (6)$$

Para o problema proposto, o AG irá maximizar a função de aptidão, dado por (7), o que implica na minimização do E_T .

$$F_A = \frac{1}{E_T + \Delta} \quad (7)$$

Nesta equação, Δ assume um valor pequeno (neste trabalho, 0,00001) para garantir o valor associado à F_A .

B. 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 um número de indivíduos elitistas para cada codificação (binária ou real), especificados na Tabela I.

Com respeito à análise binária, testes indicaram um número de 10 *bits* para uma melhor representação dos parâmetros a serem estimados. Salienta-se que o AG foi executado para cada configuração, 20 vezes, sendo de 15,000 gerações o critério de parada estabelecido.

TABELA I
PARÂMETROS DO AG PROPOSTO PARA ANÁLISE HARMÔNICA

Parâmetros	Características
População Inicial	30 indivíduos
Método de Seleção	Roleta, Seleção por Torneio (com duas repetições)
Elitismo	2 Indivíduos Elitistas
Cruzamento	Binário: Uniforme, de 1-Ponto e 2-Pontos Real: Média Aritmética, média e BLX- α , com α igual a 0,5
P_c	Probabilidade de Cruzamento de 90%
Mutação	Binária: Mutação Binária Real: Mutação Uniforme e Gaussiana, com $\alpha = 0,5$
P_m	Probabilidade de Mutação de 5%

TABELA II
ERROS MÉDIOS APRESENTADOS PELOS AGS
PARA A SITUAÇÃO DE OSCILAÇÃO TRANSITÓRIA

	Real	Fourier	Erro (%)	AG Real	Erro (%)	AG Binário	Erro (%)
V_0	0,0038	0,0051	34,2105	0,0038	0,0000	0,0017	55,2632
$V_{c,1}$	0,7769	0,7774	0,0644	0,7769	0,0000	0,7614	1,9951
$V_{s,1}$	-0,2335	-0,2298	1,5846	-0,2335	0,0000	-0,1561	33,1478
$V_{c,2}$	0,0082	0,0090	9,7561	0,0082	0,0000	0,0036	56,0976
$V_{s,2}$	-0,0004	-0,0008	100,0000	-0,0003	25,0000	-0,0001	75,0000
$V_{c,3}$	0,0087	0,0089	2,2989	0,0087	0,0000	0,0040	54,0230
$V_{s,3}$	-0,0002	-0,0004	100,0000	-0,0002	0,0000	-0,0002	0,0000
$V_{c,4}$	0,0102	0,0103	0,9804	0,0102	0,0000	0,0050	50,9804
$V_{s,4}$	0,0001	0,0000	100,0000	0,0001	0,0000	0,0000	100,0000
$V_{c,5}$	0,0135	0,0135	0,0000	0,0135	0,0000	0,0105	22,2222
$V_{s,5}$	0,0004	0,0005	25,0000	0,0004	0,0000	0,0001	75,0000
$V_{c,6}$	0,0220	0,0220	0,0000	0,0220	0,0000	0,0106	51,8182
$V_{s,6}$	0,0012	0,0015	25,0000	0,0012	0,0000	0,0002	83,3333
$V_{c,7}$	0,0708	0,0714	0,8475	0,0708	0,0000	0,0462	34,7458
$V_{s,7}$	0,0170	0,0193	13,5294	0,0170	0,0000	0,0092	45,8824
$V_{c,8}$	-0,0451	-0,0439	2,6608	-0,0451	0,0000	-0,0294	34,8115
$V_{s,8}$	0,0084	0,0067	20,2381	0,0084	0,0000	0,0061	27,3810
$V_{c,9}$	-0,0172	-0,0168	2,3256	-0,0172	0,0000	-0,0080	53,4884
$V_{s,9}$	0,0015	0,0009	40,0000	0,0015	0,0000	-0,0002	113,3333
$V_{c,10}$	-0,0105	-0,0103	1,9048	-0,0105	0,0000	-0,0071	32,3810
$V_{s,10}$	0,0007	0,0003	57,1429	0,0007	0,0000	0,0003	57,1429
$V_{c,11}$	-0,0075	-0,0074	1,3333	-0,0075	0,0000	-0,0027	64,0000
$V_{s,11}$	0,0004	0,0000	100,0000	0,0004	0,0000	0,0002	50,0000
$V_{c,12}$	-0,0059	-0,0058	1,6949	-0,0059	0,0000	-0,0027	54,2373
$V_{s,12}$	0,0004	0,0001	75,0000	0,0004	0,0000	0,0001	75,0000
$V_{c,13}$	-0,0048	-0,0047	2,0833	-0,0048	0,0000	-0,0009	81,2500
$V_{s,13}$	0,0004	0,0001	75,0000	0,0004	0,0000	0,0001	75,0000
$V_{c,14}$	-0,0041	-0,0040	2,4390	-0,0041	0,0000	-0,0007	82,9268
$V_{s,14}$	0,0004	0,0001	75,0000	0,0004	0,0000	0,0002	50,0000
$V_{c,15}$	-0,0037	-0,0037	0,0000	-0,0037	0,0000	-0,0023	37,8378
$V_{s,15}$	0,0003	0,0000	100,0000	0,0003	0,0000	0,0001	66,6667
$V_{c,16}$	-0,0033	-0,0033	0,0000	-0,0033	0,0000	-0,0024	27,2727
$V_{s,16}$	0,0004	0,0001	75,0000	0,0004	0,0000	0,0002	50,0000
$V_{c,17}$	-0,0030	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0011	63,3333
$V_{s,17}$	0,0003	0,0000	100,0000	0,0003	0,0000	0,0002	33,3333
$V_{c,18}$	-0,0028	-0,0028	0,0000	-0,0028	0,0000	-0,0006	78,5714
$V_{s,18}$	0,0004	0,0001	75,0000	0,0004	0,0000	-0,0003	175,0000
$V_{c,19}$	-0,0026	-0,0026	0,0000	-0,0026	0,0000	-0,0010	61,5385
$V_{s,19}$	0,0004	0,0002	50,0000	0,0004	0,0000	0,0004	0,0000
$V_{c,20}$	-0,0025	-0,0025	0,0000	-0,0025	0,0000	-0,0012	52,0000
$V_{s,20}$	0,0004	0,0002	50,0000	0,0004	0,0000	0,0002	50,0000
$V_{c,21}$	-0,0024	-0,0025	4,1667	-0,0024	0,0000	-0,0018	25,0000
$V_{s,21}$	0,0004	0,0002	50,0000	0,0004	0,0000	0,0000	100,0000
$V_{c,22}$	-0,0024	-0,0025	4,1667	-0,0024	0,0000	-0,0012	50,0000
$V_{s,22}$	0,0004	0,0001	75,0000	0,0004	0,0000	0,0001	75,0000
$V_{c,23}$	-0,0023	-0,0024	4,3478	-0,0023	0,0000	-0,0006	73,9130
$V_{s,23}$	0,0003	0,0001	66,6667	0,0003	0,0000	0,0001	66,6667
$V_{c,24}$	-0,0024	-0,0026	8,3333	-0,0024	0,0000	-0,0012	50,0000
$V_{s,24}$	0,0003	0,0000	100,0000	0,0003	0,0000	-0,0001	133,3333
$V_{c,25}$	-0,0025	-0,0028	12,0000	-0,0025	0,0000	-0,0016	36,0000
$V_{s,25}$	0,0002	-0,0001	150,0000	0,0002	0,0000	0,0001	50,0000
Erro Médio		35,1917		0,4902			57,7633

VI. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS AGS NA ANÁLISE HARMÔNICA

Nesta seção serão apresentados os resultados da implementação de um AG para identificar as várias frequências harmônicas presentes em determinado sinal (Tabelas II e III). Neste sentido, um sinal característico de uma oscilação transitória, situação oriunda de um chaveamento de banco de capacitores e outro, referente a uma situação de energização de um transformador de potência, foram utilizados para análise e validação do algoritmo proposto.

Nas Tabelas II e III, os dados **Reais**, coluna 2, são aqueles oriundos do ATP e, conseqüentemente, referem-se à formulação matemática das equações (4) e (5) para as formas de ondas tomadas para análise de seus respectivos conteúdos

harmônico. Os dados da coluna 3, **Fourier**, representam a estimação das componentes harmônicas de até a 25ª ordem, mediante a aplicação do método clássico da Transformada de **Fourier** nas equações (4) e (5) para efeito de comparação com os Algoritmos Genéticos. Nas colunas 5 e 7, **AG Real** e **AG Binário**, respectivamente, estão os resultados da estimação de tais componentes harmônicas, através dos algoritmos genéticos, de acordo com o critério de parada considerado. O **Erro Médio**, referente à estimação das componentes harmônicas das colunas 3, 5 e 7, comparados à coluna 2, são evidenciados pelas colunas 4, 6 e 8, respectivamente.

TABELA III
ERROS MÉDIOS APRESENTADOS PELOS AGS
NA ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR

	Real	Fourier	Erro (%)	AG Real	Erro (%)	AG Binário	Erro (%)
I_0	-0,0331	-0,0662	100,0000	-0,0331	0,0000	-0,0232	29,9094
$I_{c,1}$	0,0879	0,0877	0,2275	0,0879	0,0000	0,0458	47,8953
$I_{s,1}$	0,0829	0,0835	0,7238	0,0829	0,0000	0,0588	29,0712
$I_{c,2}$	-0,1018	-0,1014	0,3929	-0,1018	0,0000	-0,0497	51,1788
$I_{s,2}$	-0,0351	-0,0360	2,5641	-0,0351	0,0000	-0,0172	50,9972
$I_{c,3}$	0,0039	0,0031	20,5128	0,0039	0,0000	0,0008	79,4872
$I_{s,3}$	0,0215	0,0218	1,3953	0,0215	0,0000	0,0138	35,8140
$I_{c,4}$	0,0280	0,0294	5,0000	0,0280	0,0000	0,0094	66,4286
$I_{s,4}$	-0,0785	-0,0783	0,2548	-0,0785	0,0000	-0,0376	52,1019
$I_{c,5}$	0,0111	0,0099	10,8108	0,0111	0,0000	0,0058	47,7477
$I_{s,5}$	0,0581	0,0579	0,3442	0,0581	0,0000	0,0300	48,3649
$I_{c,6}$	0,0028	0,0031	10,7143	0,0028	0,0000	0,0014	50,0000
$I_{s,6}$	0,0013	0,0017	30,7692	0,0013	0,0000	-0,0005	138,4615
$I_{c,7}$	-0,0264	-0,0264	0,0000	-0,0264	0,0000	-0,0152	42,4242
$I_{s,7}$	-0,0014	-0,0021	50,0000	-0,0014	0,0000	-0,0003	78,5714
$I_{c,8}$	0,0078	0,0079	1,2821	0,0078	0,0000	0,0051	34,6154
$I_{s,8}$	-0,0105	-0,0102	2,8571	-0,0105	0,0000	-0,0066	37,1429
$I_{c,9}$	0,0052	0,0050	3,8462	0,0052	0,0000	0,0033	36,5385
$I_{s,9}$	0,0046	0,0048	4,3478	0,0046	0,0000	0,0024	47,8261
$I_{c,10}$	-0,0044	-0,0041	6,8182	-0,0044	0,0000	-0,0013	70,4545
$I_{s,10}$	-0,0069	-0,0072	4,3478	-0,0069	0,0000	-0,0025	63,7681
$I_{c,11}$	0,0054	0,0050	7,4074	0,0054	0,0000	0,0046	14,8148
$I_{s,11}$	0,0064	0,0066	3,1250	0,0064	0,0000	0,0037	42,1875
$I_{c,12}$	0,0025	0,0028	12,0000	0,0025	0,0000	0,0002	92,0000
$I_{s,12}$	-0,0013	-0,0011	15,3846	-0,0013	0,0000	-0,0002	84,6154
$I_{c,13}$	-0,0077	-0,0080	3,8961	-0,0077	0,0000	-0,0054	29,8701
$I_{s,13}$	0,0055	0,0051	7,2727	0,0055	0,0000	0,0021	61,8182
$I_{c,14}$	0,0003	0,0005	66,6667	0,0003	0,0000	0,0002	33,3333
$I_{s,14}$	-0,0059	-0,0058	1,6949	-0,0059	0,0000	-0,0028	52,5424
$I_{c,15}$	0,0029	0,0029	0,0000	0,0029	0,0000	0,0018	37,9310
$I_{s,15}$	-0,0003	-0,0002	33,3333	-0,0003	0,0000	-0,0001	66,6667
$I_{c,16}$	-0,0012	-0,0012	0,0000	-0,0012	0,0000	-0,0002	83,3333
$I_{s,16}$	0,0001	-0,0001	200,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000
$I_{c,17}$	0,0017	0,0015	11,7647	0,0017	0,0000	0,0009	47,0588
$I_{s,17}$	0,0018	0,0019	5,5556	0,0018	0,0000	0,0003	83,3333
$I_{c,18}$	0,0002	0,0004	100,0000	0,0002	0,0000	-0,0001	150,0000
$I_{s,18}$	-0,0017	-0,0017	0,0000	-0,0017	0,0000	-0,0001	94,1176
$I_{c,19}$	-0,0016	-0,0019	18,7500	-0,0016	0,0000	0,0002	112,5000
$I_{s,19}$	0,0035	0,0034	2,8571	0,0035	0,0000	0,0009	74,2857
$I_{c,20}$	-0,0009	-0,0007	22,2222	-0,0009	0,0000	0,0000	100,0000
$I_{s,20}$	-0,0025	-0,0025	0,0000	-0,0025	0,0000	-0,0005	80,0000
$I_{c,21}$	0,0010	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0002	80,0000
$I_{s,21}$	-0,0008	-0,0008	0,0000	-0,0008	0,0000	0,0000	100,0000
$I_{c,22}$	0,0002	0,0002	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	50,0000
$I_{s,22}$	0,0004	0,0003	25,0000	0,0004	0,0000	0,0001	75,0000
$I_{c,23}$	0,0005	0,0004	20,0000	0,0005	0,0000	-0,0001	120,0000
$I_{s,23}$	0,0009	0,0010	11,1111	0,0009	0,0000	0,0000	100,0000
$I_{c,24}$	-0,0004	-0,0003	25,0000	-0,0004	0,0000	-0,0001	75,0000
$I_{s,24}$	-0,0009	-0,0010	11,1111	-0,0009	0,0000	0,0000	100,0000
$I_{c,25}$	0,0001	-0,0001	200,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000
$I_{s,25}$	0,0013	0,0013	0,0000	0,0013	0,0000	0,0000	100,0000
Erro Médio		20,8110		0,0000			64,2982

Pode-se observar nas Tabelas II e III que a representação real apresenta melhores resultados (menor erro médio) em comparação com a representação binária, para ambos os casos estudados, observando-se a superioridade dos AGs, principalmente na estimação da componente CC.

A seguir, a Tabela IV descreve as melhores configurações dos AGs para os resultados apresentados.

TABELA IV
CONFIGURAÇÕES OBTIDAS PELOS AGS PARA
OS RESULTADOS APRESENTADOS.

AG	Tabela II		Tabela II	
	Real	Binário	Real	Binário
População	30	30	30	30
Seleção - Métodos	Roleta	Torneio	Roleta	Roleta
Nº de Ind.Elitistas	2	2	2	2
Cruzamento - Operadores	Média Real	Uniforme	Média Real	Uniforme
Cruzamento - Prob. - %	90	90	90	95
Mutação - Operadores	Gaussiana	Binário	Gaussiana	Binário
Mutação - Prob. - %	5	5	3	5
Nº de Gerações	15.000	15.000	15.000	15.000

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método para identificação de componentes harmônicas em SEP baseados em Algoritmos Genéticos. Neste estudo, foram utilizadas 25 componentes harmônicas, tanto para análise de um sinal representativo de um chaveamento de banco de capacitores, como também, de outro característico de uma energização de um transformador de potência. Cabe comentar que para o momento, o tempo de processamento não fora objeto avaliado, uma vez que a idéia principal deste trabalho foi a de verificar a utilização e a resposta proveniente dos algoritmos genéticos nas abordagens apresentadas.

Os testes, com as diferentes codificações para os AGs, mostraram que a configuração real é a mais indicada para ambas as aplicações, quando comparado ao método da Transformada de *Fourier* e à representação binária. Assim, fica evidente que o método proposto pode ser uma ótima alternativa de estimação ao problema em questão, sobretudo quando da estimação da componente CC quando comparada com o método tradicional da Transformada de *Fourier*.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, bem como ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) pelas facilidades proporcionadas quando do desenvolvimento deste trabalho.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, Power System Harmonics. John Wiley & Sons Ltd. 1985, p. 336.
- [2] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System. IEEE Standard. 519-1992. April 1993.
- [3] Emanuel, A. A.; ORR, J. A., Cyganski, D. Gulachenski, E. M. (1991). A Survey of Harmonic Voltages and Currents at Distribution Substations. IEEE Transactions on Power Delivery, v.6, n.4, p.1883-1890, October.
- [4] Kamwa, I.; Grondin, R. (1992). Fast Adaptive Schemes for Tracking Voltage Phasor and Local Frequency in Power Transmission and

Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.7, n. 2, p. 789-794.

- [5] Girgis, A.A. and Ham, F.M. (1982). A new FFT-base digital frequency relay for load shedding, *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* (PAS-101): 433-439.
- [6] Dash, P. K.; Panda, S. K.; Liew A. C.; Mishara, B.; Jena, R. K. (1998). A New Approach to Monitoring Electric Power Quality. *Electric Power Systems Research*. v.16, p.11-20.
- [7] Goldberge, D. (1989). Genetic algorithms in search, in: Optimization and Machine Learning. Addison-Wesely.
- [8] 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*, vol. 13, n. 2-4, p. 167-175. IOS PRESS, ISSN 1064-1246.
- [9] Souza, S. A. (2004). *Utilização da Transformada de Fourier Janelada para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica*. São Carlos. 124p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo.
- [10] Bernardes, A. P. (2006). *Um Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital*. São Carlos. 90p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo.
- [11] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F. Beaty, H. W. (2002). *Electrical Power Systems Quality*. 2nd Edition, McGraw-Hill.

X. BIOGRAFIA

Silvio Aparecido de Souza é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Campus de Cuiabá em Setembro de 2001. Recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica em março de 2004 pela Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. Atualmente é doutorando na mesma instituição. Suas principais áreas de pesquisa incluem proteção e controle de sistemas de potência, qualidade da energia elétrica e computação evolutiva.

Mário Oleskovicz é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP) em 1997 e 2001, respectivamente. Atualmente encontra-se como professor doutor junto ao Departamento de Engenharia Elétrica (EESC-USP). Dentre as áreas de interesse destacam-se a proteção digital de sistemas elétricos de potência, técnicas de inteligência artificial aplicadas a sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.

Denis Vinicius Coury é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. Mestre em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP e Ph.D. pela Universidade de Bath, Inglaterra. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil. Suas áreas de interesse incluem proteção de sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.