

o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), a Transformada Discreta de Fourier (TDF) e a Transformada Rápida de Fourier (FFT). O Filtro de Kalman é um exemplo de uma estimação dinâmica.

O MMQ é baseado na minimização do erro médio quadrático entre os valores calculados e os valores medidos da amplitude da tensão, corrente e ângulo de fase do sistema. Para um modelo não-linear do sistema, esta técnica resulta em estimações de parâmetro razoáveis (7). A TDF é baseada na ortogonalidade das funções. A forma de onda ruidosa consiste em um componente fundamental acrescido de um número infinito de harmônicos. O custo computacional deste algoritmo é muito baixo, mas seu desempenho pode ser afetado pela presença da componente CC presente no sinal.

O algoritmo da FFT é uma versão otimizada da TDF. Porém, a aplicação do FFT pode conduzir a resultados imprecisos devido ao efeito *aliasing* (8). A aplicação do filtro de Kalman, que é um filtro ótimo, identifica, analisa e localiza o conteúdo harmônico de um sinal trifásico não estacionário, porém, sua desvantagem reside no custo computacional da análise estatística prévia necessária (9).

Técnicas de Inteligência artificial (IA) também possuem aplicabilidade na avaliação harmônica de um sistema de potência, podendo ser citada a aplicação de Redes de Neurais Artificiais (RNAs) na avaliação em tempo real de parâmetros harmônicos de sinais elétricos (10).

Outra técnica baseada nos conceitos de IA, os Algoritmos Genéticos (AGs), obteve atenção especial como um algoritmo de busca estocástica robusta. Existe uma variedade de implementação específicas dos AGs em Sistemas de Potência na literatura (11). O presente trabalho propõe um método para análise de distorção harmônica em um sistema de potência baseados em AGs. Os resultados obtidos apontam que o algoritmo proposto pode identificar a componente harmônica precisamente para qualquer forma de onda distorcida. O método proposto é comparado ao método clássico da Transformada de Fourier para sua validação.

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 expressas como uma Série de Fourier. Cada componente harmônio 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. Deste ponto de vista, a Série de Fourier estabelece uma relação entre o domínio do tempo e da frequência (6). Por exemplo, uma forma de onda variante no tempo, $x(t)$, pode ser escrita como:

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

onde x_0 é a componente constante de $x(t)$ e φ é a constante de tempo; $A_{c,i}$, $A_{s,i}$, $\varphi_{c,i}$ e $\varphi_{s,i}$ são as amplitudes e os ângulos de fase dos termos co-seno e seno do $i^{ésimo}$ harmônico, respectivamente; ω_0 é a frequência fundamental do sistema e N é o número de harmônicos presente em $x(t)$.

Para obter os parâmetros da Série de Fourier, são empregados algoritmos matemáticos. Assumindo que o sinal $x(t)$ é amostrado a uma taxa amostral pré-definida de Δt , após $(m-1) \cdot \Delta t$ segundos, haverá m amostras, $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_m)$, para t_1, t_2, \dots, t_m , onde t_1 é uma referência de tempo arbitrária. Assim, pode-se escrever 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 ω_0 é a frequência do sistema, que no Brasil é 377 rad/sec (60Hz).

Resolvendo o sistema de Equações 2 para encontrar $\varphi, x_0, A_{c,i}$ 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 após a inserção de uma falta em um sistema elétrico.

3.0 – ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs são algoritmos de busca e otimização. Empregam estratégias de busca paralela e estruturada, porém aleatória, em direção a uma solução ótima ou aproximadamente ótima (alta aptidão do indivíduo), direcionando a busca de pontos no espaço de busca com alta aptidão (12).

$$\begin{bmatrix} x(t_1) \\ x(t_2) \\ \vdots \\ x(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\omega_0 t_1} \\ e^{j\omega_0 t_2} \\ \vdots \\ e^{j\omega_0 t_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_{c,1}) & \sin(\omega_0 t_1 + \varphi_{s,1}) \\ \cos(\omega_0 t_2 + \varphi_{c,1}) & \sin(\omega_0 t_2 + \varphi_{s,1}) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\omega_0 t_m + \varphi_{c,1}) & \sin(\omega_0 t_m + \varphi_{s,1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ L \\ \vdots \\ L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(N\omega_0 t_1 + \varphi_{c,N}) & \sin(N\omega_0 t_1 + \varphi_{s,N}) \\ \cos(N\omega_0 t_2 + \varphi_{c,N}) & \sin(N\omega_0 t_2 + \varphi_{s,N}) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(N\omega_0 t_m + \varphi_{c,N}) & \sin(N\omega_0 t_m + \varphi_{s,N}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ M \\ \vdots \\ M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ A_{c,1} \\ A_{s,1} \\ \vdots \\ A_{c,N} \\ A_{s,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha(t_1) \\ \alpha(t_2) \\ \vdots \\ \alpha(t_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tais algoritmos operam como um procedimento interativo em um conjunto de possíveis soluções para o problema proposto (população). Inicialmente, é gerada uma população aleatória. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada por meio de uma função de avaliação (função de aptidão). Essa função recebe como entrada os valores dos parâmetros do AG e fornece como resultado a sua aptidão, que mede quão boa é a solução.

A cada interação, é observado um comportamento evolutivo no algoritmo através de duas características básicas: competição e cooperação, onde os princípios de seleção e reprodução são aplicados. A Figura 1 apresenta a estrutura de um AG simples.

A competição, ou seleção, mantém os melhores indivíduos (soluções com melhor índice) e descarta os indivíduos ineficazes. Após a seleção, são aplicados os operadores genéticos: cruzamento e mutação.

O operador de cruzamento é responsável pela recombinação das características dos indivíduos durante a reprodução. O operador de mutação muda aleatoriamente o valor do parâmetro, alterando a posição de um indivíduo no espaço de busca. Após as modificações em suas características, a população é novamente avaliada. Esse processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Para evitar que os melhores indivíduos desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, eles podem ser automaticamente colocados na próxima geração após a seleção, através da reprodução elitista.

A implementação utilizada neste trabalho foi denominada **GOOAL** – *Genetic Object Oriented Algorithm* e está sendo desenvolvida pelo grupo de pesquisa da EESC-USP.

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

A representação binária dos parâmetros é considerada clássica. Porém, tal representação possui alguns problemas quando o vetor de parâmetros é muito longo, fazendo com que o algoritmo convirja lentamente. A representação real, por outro lado, otimiza a codificação.

Na literatura atual não há nenhuma diretriz rigorosa que prediga qual a melhor codificação. Portanto, foram utilizadas no trabalho ambas as representações com o propósito de comparação. A Figura 2 ilustra a codificação utilizada onde os parâmetros estimados são a componente CC e a magnitude da frequência fundamental e das componentes harmônicas seno e co-seno do sistema proposto dado pela Equação 2.

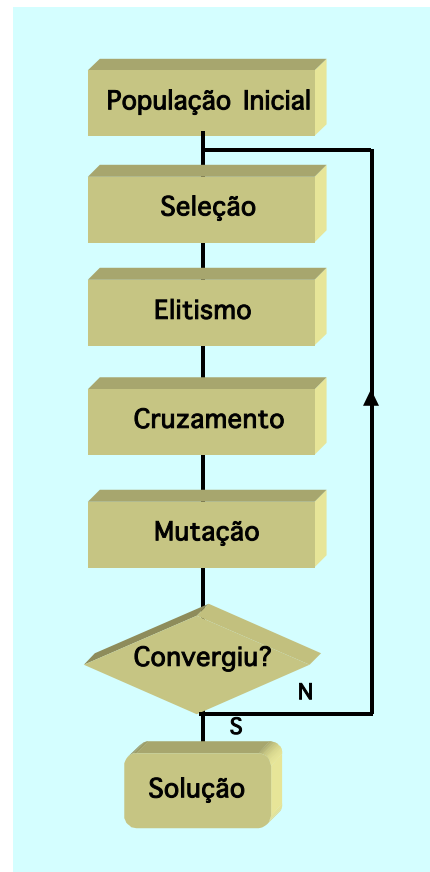


FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO PROPOSTO

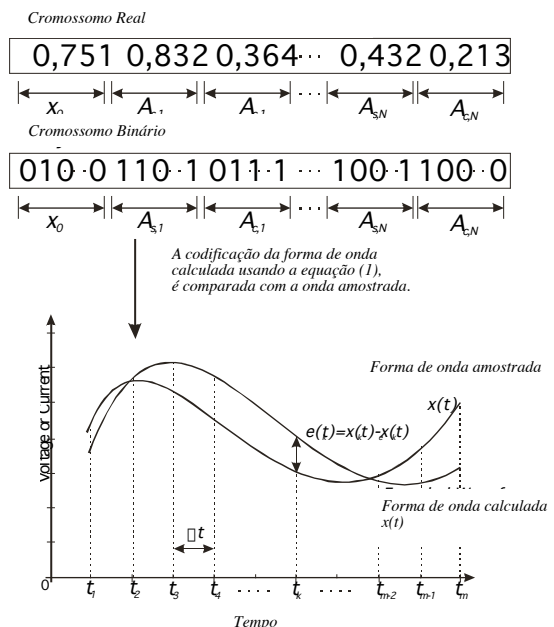


FIGURA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CODIFICAÇÕES DOS PARÂMETROS E A FORMA DE ONDA ANALISADA

3.1 A função de avaliação

No uso de AGs para identificação de componentes harmônicas em sistemas de potência, a onda ruidosa $x(t)$ é amostrada de acordo com uma taxa amostral pré-estabelecida Δt , que neste trabalho foi de 2.4 kHz, em uma janela de dados de 1 ciclo, resultando nos valores $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_m)$, onde t_1 é uma referência arbitrária e $t_{k+1} - t_k = \Delta t$, para $k = 1, 2, \dots, m-1$.

De acordo com a Figura 2, o erro de estimação $e(t_k)$ é calculado a partir da diferença entre a forma de onda amostrada e a forma de onda codificada:

$$e(t_k) = x(t_k) - x_e(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

O erro quadrático total E_T , é calculado a partir da equação:

$$E_T = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m e(t_k)^2}{m}} \quad (4)$$

Analisando E_T , quanto mais próxima for a forma de onda amostrada, menor será o erro E_T em uma função de aptidão F , determinado pela Equação 5, onde α é uma constante positiva de valor pequeno (0.00001) utilizada para evitar problemas de arredondamento.

$$F = \frac{1}{E_T + \alpha} \quad (5)$$

4.0 – AS FORMAS DE ONDA SIMULADAS

A avaliação das distorções harmônicas deve prover medidas precisas do conteúdo harmônico em um sistema de potência e as características exatas das tensões e correntes. A dificuldade na medição das harmônicas vem do fato que fontes geradoras harmônicas são de natureza dinâmica.

Como enfatizado anteriormente, o propósito principal deste trabalho é identificar as várias frequências harmônicas presentes no sinal. Levando isso em conta, uma falta em uma linha de transmissão foi simulada utilizando o *software* ATP (13).

Quando da ocorrência de uma falta 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 (decaindo exponencialmente) e também componentes de frequência fundamental e superiores a 60 Hz.

Para verificação do algoritmo proposto, foi utilizado um modelo de linha de transmissão de 440 KV, com 150km de comprimento, considerando-se uma linha típica da CESP com parâmetros distribuídos e totalmente transposta. A topologia do sistema elétrico analisado em todo o processo é mostrado na Figura 3.

As Figuras 4 e 5 caracterizam uma situação típica de uma falta *fase-terra* entre os pontos P e T da linha. As Equações 6 e 7 descrevem a expressão matemática para a tensão e a corrente de falta aplicada, considerando que os dados foram normalizados.

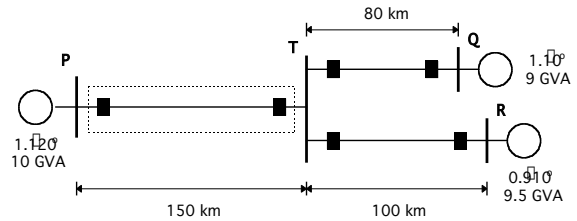


FIGURA 3 - SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

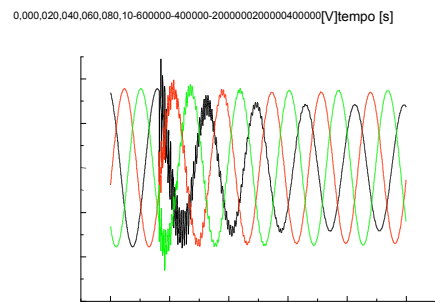


FIGURA 4 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SOB FALTA

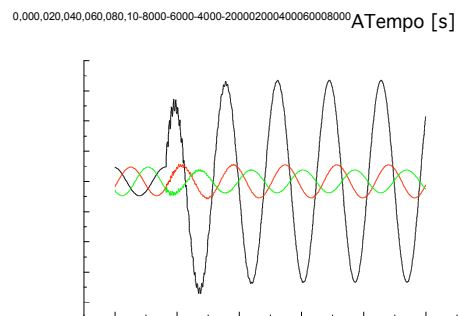


FIGURA 5 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE DO SISTEMA ELÉTRICO SOB FALTA

$$V(t) = 0.0550 \exp(-0.4t) + 0.9829 \cos(\omega t) + 0.1842 \sin(\omega t) + 0.0141 \cos(2\omega t) + 0.0245 \sin(2\omega t) + 0.0077 \cos(3\omega t) + 0.0197 \sin(3\omega t) + 0.0050 \cos(4\omega t) + 0.0168 \sin(4\omega t) + 0.0039 \cos(5\omega t) + 0.0154 \sin(5\omega t) + 0.0033 \cos(6\omega t) + 0.0161 \sin(6\omega t) + 0.0033 \cos(7\omega t) + 0.0230 \sin(7\omega t) \quad (6)$$

$$I(t) = 0.2491 \exp(-0.4t) + 0.95872 \cos(\omega t) + 0.2841 \sin(\omega t) + 0.0619 \cos(2\omega t) + 0.1054 \sin(2\omega t) + 0.0329 \cos(3\omega t) + 0.0811 \sin(3\omega t) + 0.0206 \cos(4\omega t) + 0.0643 \sin(4\omega t) + 0.0146 \cos(5\omega t) + 0.0528 \sin(5\omega t) + 0.0116 \cos(6\omega t) + 0.0448 \sin(6\omega t) + 0.0052 \cos(7\omega t) + 0.0401 \sin(7\omega t) \quad (7)$$

5.0 – OS AGs NA ANÁLISE HARMÔNICA

Inicialmente, foi determinada a representação binária de um indivíduo como sendo um vetor composto por 10 *bits* por parâmetro. 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, como mostra a Tabela 1, onde:

Escalonamento	0 – Sem Escalonamento 1 – Escalonamento Linear, $M = 2$
Seleção	0 – Método da Roleta 1 – Método do Torneio com 2 repetições
Cruzamento	0 – Cruzamento Uniforme Binário 1 – Cruzamento de Um Ponto Binário 2 – Cruzamento de Dois Ponto Binário 3 – Cruzamento Média Aritmética real 4 – Cruzamento Média Geométrica Real
Mutação	0 – Mutação Binária 1 – Mutação Uniforme Real 2 – Mutação Gaussiana Real, com $\sigma = 0,05$

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

TABELA 1 – CONJUNTO DE TESTE DAS CONFIGURAÇÃO

	Testes	Pop	Escal.	Seleção	Elitismo	Cruzamento	P_c	Mutação	P_m	Melhor Result.	Erro (%)
Binário	B ₀₁ – B ₀₂₄	12	0, 1	0, 1	1	0, 1, 2	0,90, 0,97	0	0,03, 0,05	Test B18	9,4289
	B ₀₂₅ – B ₀₄₈	12	0, 1	0, 1	2	0, 1, 2	0,90, 0,97	0	0,03, 0,05	Test B34	13,130
	B ₀₄₉ – B ₀₇₂	24	0, 1	0, 1	1	0, 1, 2	0,90, 0,97	0	0,03, 0,05	Test B50	5,9435
	B ₀₇₃ – B ₀₉₆	24	0, 1	0, 1	2	0, 1, 2	0,90, 0,97	0	0,03, 0,05	Test B88	8,3012
	B ₀₉₇ – B ₁₂₀	36	0, 1	0, 1	1	0, 1, 2	0,90, 0,97	0	0,03, 0,05	Test B114	5,1794
	B ₁₂₁ – B ₁₄₄	36	0, 1	0, 1	2	0, 1, 2	0,90, 0,97	0	0,03, 0,05	Test B136	8,4521
Real	R ₀₀₁ – R ₀₆₄	12	0, 1	0, 1	1	3, 4	0,90, 0,97	1, 2	0,03, 0,05	Test R39	0,0516
	R ₆₅ – R ₁₂₈	12	0, 1	0, 1	2	3, 4	0,90, 0,97	1, 2	0,03, 0,05	Test R118	0,0208
	R ₁₂₉ – R ₁₉₂	24	0, 1	0, 1	1	3, 4	0,90, 0,97	1, 2	0,03, 0,05	Test R135	0,0121
	R ₁₉₃ – R ₂₅₆	24	0, 1	0, 1	2	3, 4	0,90, 0,97	1, 2	0,03, 0,05	Test R199	0,0151
	R ₂₅₇ – R ₃₂₀	36	0, 1	0, 1	1	3, 4	0,90, 0,97	1, 2	0,03, 0,05	Test R261	0,0046
	R ₃₂₁ – R ₃₈₄	36	0, 1	0, 1	2	3, 4	0,90, 0,97	1, 2	0,03, 0,05	Test R325	0,0065

TABELA 2 – ERRO MÉDIO APRESENTADO PARA O MELHOR CASO DA TENSÃO

	Exato	Fourier	Erro (%)	AG Binário	Erro (%)	AG Real	Erro (%)
V ₀	0,0550	0,1102	100,3636	0,05376 ± 0,00417	2,2545	0,0550 ± 0,0000	0,0000
V _{cs,1}	0,9829	0,9832	0,0305	0,98338 ± 0,00103	0,0488	0,9829 ± 0,0000	0,0000
V _{ss,1}	0,1842	0,1834	0,4343	0,18768 ± 0,02605	1,8893	0,1842 ± 0,0000	0,0000
V _{cs,2}	0,0141	0,0139	1,4184	0,01564 ± 0,00099	10,922	0,0141 ± 0,0000	0,0000
V _{ss,2}	0,0245	0,0245	0,0000	0,02444 ± 0,00204	0,2449	0,0245 ± 0,0000	0,0000
V _{cs,3}	0,0077	0,0077	0,0000	0,00684 ± 0,00050	11,168	0,0077 ± 0,0000	0,0000
V _{ss,3}	0,0197	0,0197	0,0000	0,01955 ± 0,00554	0,7614	0,0197 ± 0,0000	0,0000
V _{cs,4}	0,0050	0,0050	0,0000	0,00489 ± 0,00088	2,2000	0,0053 ± 0,0001	6,0000
V _{ss,4}	0,0168	0,0168	0,0000	0,01466 ± 0,00126	12,738	0,0168 ± 0,0000	0,0000
V _{cs,5}	0,0039	0,0039	0,0000	0,00391 ± 0,00051	0,2564	0,0039 ± 0,0001	0,0000
V _{ss,5}	0,0154	0,0154	0,0000	0,01466 ± 0,00050	4,8052	0,0154 ± 0,0001	0,0000
V _{cs,6}	0,0033	0,0033	0,0000	0,00293 ± 0,00048	11,212	0,0033 ± 0,0006	0,0000
V _{ss,6}	0,0161	0,0161	0,0000	0,01466 ± 0,00057	8,9441	0,0161 ± 0,0000	0,0000
V _{cs,7}	0,0033	0,0034	3,0303	0,00293 ± 0,00048	11,212	0,0036 ± 0,0001	9,0909
V _{ss,7}	0,0230	0,0229	0,4348	0,02248 ± 0,00256	2,2609	0,0230 ± 0,0000	0,0000
Erro Médio Total			7,0475		5,3946		1,0061

TABELA 3 – ERROS MÉDIOS APRESENTADOS PARA O MELHOR CASO DA CORRENTE

A melhor configuração para o problema proposto, foi obtido no teste B114 para a codificação binária e R261 para a codificação real. 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.

Para todos os testes, foi adotado o número de gerações de 15.000 como critério de parada.

As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos utilizando o método tradicional de Fourier, bem como o método proposto baseado em AGs. 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.

Como a técnica baseada em AGs é um método aleatório e probabilístico, um estudo estatístico se faz necessário. Foi calculado a média e o desvio padrão de 20 repetições para cada caso testado. As Tabelas 2 e 3 apresentam a média e o desvio padrão de cada parâmetro estimado pelo algoritmo, para as Equações 6 e 7, respectivamente.

	Exato	Fourier	Erro (%)	AG Binário	Erro (%)	AG Real	Erro (%)
I_0	0,2491	0,4911	97,149	0,2502 ± 0,00050	0,4576	0,2492 ± 0,0001	0,0401
$I_{c,1}$	0,9587	0,9592	0,0522	0,9589 ± 0,00890	0,0250	0,9587 ± 0,0000	0,0000
$I_{s,1}$	0,2841	0,2838	0,1056	0,2845 ± 0,07446	0,1267	0,2841 ± 0,0000	0,0000
$I_{c,2}$	0,0619	0,0619	0,0000	0,0626 ± 0,00051	1,0662	0,0619 ± 0,0000	0,0000
$I_{s,2}$	0,1054	0,1055	0,0949	0,1251 ± 0,01052	18,7097	0,1054 ± 0,0000	0,0000
$I_{c,3}$	0,0329	0,033	0,3040	0,0303 ± 0,00124	7,9027	0,0330 ± 0,0000	0,3040
$I_{s,3}$	0,0811	0,0812	0,1233	0,0811 ± 0,00912	0,0370	0,0811 ± 0,0000	0,0000
$I_{c,4}$	0,0206	0,0208	0,9709	0,0205 ± 0,00257	0,3398	0,0206 ± 0,0000	0,0000
$I_{s,4}$	0,0643	0,0643	0,0000	0,0616 ± 0,00140	4,2302	0,0643 ± 0,0000	0,0000
$I_{c,5}$	0,0146	0,0148	1,3699	0,0147 ± 0,00051	0,4110	0,0146 ± 0,0000	0,0000
$I_{s,5}$	0,0528	0,0527	0,1894	0,0547 ± 0,00439	3,6742	0,0528 ± 0,0000	0,0000
$I_{c,6}$	0,0116	0,0118	1,7241	0,0117 ± 0,00124	1,1207	0,0116 ± 0,0001	0,0000
$I_{s,6}$	0,0448	0,0447	0,2232	0,0469 ± 0,00730	4,7321	0,0450 ± 0,0001	0,4464
$I_{c,7}$	0,0052	0,0054	3,8462	0,0059 ± 0,00031	12,8846	0,0052 ± 0,0002	0,0000
$I_{s,7}$	0,0401	0,0399	0,4988	0,0401 ± 0,00499	0,0499	0,0401 ± 0,0000	0,0000
Erro Médio Total			7,1101		5,7866		0,1291

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um novo método para análise harmônica em um Sistema Elétrico de Potência. Este método, baseado em AGs, utiliza amostras de tensão e corrente provenientes do sistema proposto, simulado utilizando-se o *software* ATP. Os resultados foram comparados ao método tradicional de Fourier para sua validação. Os resultados mostraram que a estimação da componente CC gerada pelo AG apresentou menor erro, comparado com o método tradicional. Além disso, o desempenho final do método proposto mostrou-se superior a estimação de Fourier.

O problema estudado propõe um modelo de um sistema real, devendo ser apontado as vantagens e limitações do método proposto. Sendo assim, quanto mais realístico o modelo, maior o esforço computacional do algoritmo, sendo necessário um equilíbrio entre simplicidade e generalidade a fim de assegurar que os resultados apresentados sejam significativos.

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

Neste estudo, foi levada em conta a variação do número de indivíduos da população inicial, os tipos de cruzamento e mutação, bem como as taxas de cruzamento e mutação, diferentes tipos de seleção, e número de indivíduos elitistas. Foi também feito um estudo comparativo com o método da Transformada de Fourier, que se caracteriza como um método tradicional de análise harmônica.

Testes adicionais estão sendo realizados em sistemas mais complexos e os resultados iniciais demonstram que o uso da técnica baseada em AGs para análise harmônica é uma alternativa vantajosa para tal fim.

7.0 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro recebido por parte da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Arrillaga, A., Bradley, D.A., Bodger, P.S., Power System Harmonics. John Wiley & Sons, 1985.
- (2) Densen, T. J., Bodger, P. S., J. Arrillaga, "Three Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 1984, Vol. PAS-103, pp. 310-317.
- (3) Emanuel, A.E. Harmonic in the early years of electrical engineering: a brief review of events, people and documents. IX International Conference on Harmonic and Quality of Power. 2000. Orlando, Florida, USA.
- (4) Arrillaga, A., B. C. Smith, N. R. Watson, A. R. Wood. *Power System Harmonic Analysis*, New Zealand, John Wiley & Sons, 2000.
- (5) IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, IEEE Std. 519-1992. 1993, IEEE: New York, NY, USA.
- (6) Dugan, R.C., M.F., *Electrical Power Systems Quality*, McGranaghan & H.W. Beaty, McGraw-Hill, United States, 1996.
- (7) Kamwa, I., R. Grondin, Fast adaptive schemes for tracking voltage phasor and local frequency in power transmission and distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, n. 2, pp. 789-794, 1992.
- (8) Zhang, F., Z. Geng & W. Yuan, The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, n. 2, pp. 160-168, 2001.
- (9) Girgis, A.A., W.B. Chang, E.B. Markram, A digital measurement scheme for on-line tracking of power harmonics. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, n. 3, pp. 1152-1160, 1991.
- (10) Dash, P.K., S. K. Panda, A. C. Liew, B. Mishra, R. K. Jena., A new approach to monitoring electric power quality. Electric Power Systems Research, vol. 46: p. 11-20, 1998.
- (11) El-Naggar, K.M. & K.M. Youssef, A genetic based algorithm for frequency-relaying applications. Electric Power Systems Research, vol. 55, pp. 173-178, 2000.
- (12) Goldberg, D.E., Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley Pub. Co. xiii, 412, 1989.
- (13) Alternative Transient Program, Leuven EMTP Center – Rule Book, 1987.