

# Estimação de Distorção Harmônica Total Utilizando Estratégias Evolutivas

E. F. Arruda, *Member, IEEE* e N. Kagan, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—O objetivo deste trabalho é estimar a distorção harmônica total em barras de um sistema elétrico a partir de medições em algumas barras. O algoritmo desenvolvido baseia-se em Estratégias Evolutivas. Esta técnica compreende um ramo de desenvolvimento dos Algoritmos Evolutivos no qual se inserem os Algoritmos Genéticos. As vantagens no uso desta técnica está nas facilidades, de modelagem e em encontrar uma solução para problemas complexos. A maioria das técnicas encontradas na literatura para solução deste problema utiliza sincronização das medições através de métodos de alta tecnologia como GPS. O algoritmo proposto visa sincronizar os dados de forma *offline* através das informações do fluxo de carga para a frequência fundamental. O algoritmo foi aplicado em uma rede de 14 barras cujos dados foram extraídos do IEEE.

**Palavras chave**—Estimação Harmônica, Distorções Harmônicas, Algoritmos Evolutivos, Estratégias Evolutivas, Qualidade de Energia.

## I. INTRODUÇÃO

Mensurar o impacto do conteúdo de fontes harmônicas no desempenho de um sistema elétrico consiste num aspecto importante em Qualidade de Energia.

Admitindo-se conhecidos os locais e o conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico, medidas que mitiguem o impacto das distorções em outras barras do sistema podem ser projetadas com a utilização de filtros passivos ou ativos. No entanto, na maioria das vezes, as fontes de distorções não são conhecidas [1].

Embora o custo dos medidores de qualidade de energia tenha atingido valores não tão altos, ainda é inviável a utilização de medidores para monitorar todas as barras de um sistema elétrico real, pois o sistema de monitoramento se tornaria demasiadamente oneroso.

Sendo assim, torna-se necessária a utilização de algoritmo capaz de estimar, a partir de um pequeno número de pontos de medição, os valores das distorções harmônicas em demais pontos do sistema. Desta forma o algoritmo de Estimação de Estado Harmônico (EEH) compreende o processo reverso dos processos de simulação. Os simuladores analisam a resposta de um sistema elétrico dada a injeção de corrente harmônica em um ou mais pontos do sistema, enquanto os estimadores indicam os valores de injeção harmônica a partir das respostas do sistema elétrico através de medições.

A metodologia de EEH consiste em uma ferramenta eficiente e econômica para o monitoramento do conteúdo harmônico em um sistema elétrico de potência. Um sistema estimador harmônico pode ser formulado a partir da topologia da rede elétrica, das matrizes de admitâncias para as frequências harmônicas e da localização de medidores [2].

A utilização de algoritmos da área de Sistemas Inteligentes, como o proposto, Estratégias Evolutivas, torna-se viável por sua facilidade de implementação e sua velocidade em encontrar uma solução dentro do espaço amostral de soluções frente às técnicas tradicionais.

Estimar o estado de uma rede quanto ao nível de distorção harmônica é um problema naturalmente complexo por exigir uma confiança mínima nas informações provenientes de medidores de qualidade de energia. Além da segurança quanto a calibração do medidor, o método de transmissão dos dados, a fidelidade da rede utilizada nas simulações frente à rede real, entre outros fatores capazes de acarretar discrepâncias entre o sistema real e o sistema simulado, tem-se o problema da sincronização das informações provenientes dos medidores.

Em se tratando dos métodos de EEH propriamente ditos, têm-se diversas abordagens na literatura. Uma das primeiras referências encontrada sobre o assunto compreende a referência [3] que apresenta um método para identificar fontes de sinais harmônicos no Sistema Elétrico de Potência (SEP). A referência [4] ilustra a importância da especificação das medições, bem como dos equipamentos utilizados no processo de estimação e a referência [5] apresenta um método de EEH onde foi utilizado GPS (*Global Positioning System*) para a sincronização dos dados de medição.

Propõe-se neste artigo utilizar as formas de onda armazenadas pelos medidores e as informações provenientes do fluxo de carga para a sincronização dos dados de medição. Tal adoção se torna de grande viabilidade por diminuir os custos de um sistema de EEH.

Uma vez que o comportamento do algoritmo para estimar uma ordem harmônica específica tenha sido satisfatório, como apresentado nas referências [6] e [7], este será avaliado na estimação da distorção harmônica total.

## II. ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS

As Estratégias Evolutivas foram desenvolvidas por Rechenberg e Schwefel. Estes iniciaram os estudos neste campo nos anos 60 na *Technical University of Berlin*, na Alemanha.

Esta ferramenta emprega conceitos de evolução aplicados a uma população de indivíduos que representam, cada um, uma possível solução para o problema em estudo. Os processos de

---

Os autores estão no eneq/USP - Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

mutação e recombinação, conhecidos como operadores de mutação e recombinação, não dependem, a priori, da natureza do problema. Já a formulação do indivíduo e o método de avaliação devem ser adaptados ao problema específico.

De uma forma geral um algoritmo de EE pode ser descrito como segue:

```

t = 0;
inicie P(t);
avale P(t);
enquanto (critério não satisfeito) faça
    P'(t) = variação P(t);
    avale P'(t);
    seleccione [P'(t) U Q(t)];
    t = t + 1
fim

```

Neste algoritmo,  $P(t)$  denota uma população de  $\mu$  indivíduos na geração  $t$ .  $Q$  representa um conjunto de indivíduos que podem ser considerados para a seleção, por exemplo,  $Q$  pode ser igual ao conjunto  $P(t)$ , no entanto  $Q$  também pode ser igual à zero. Uma nova geração de indivíduos  $P'(t)$  de tamanho  $\lambda$  é gerada pela variação do conjunto  $P(t)$  através dos operadores recombinação e mutação. Os novos indivíduos  $P'(t)$  são então avaliados medindo-se a “distância” de cada um destes da solução “ótima” do problema considerado. Como produto da avaliação, a cada indivíduo é atribuída uma nota (medida de adaptação). Então, uma nova população é formada na iteração  $t + 1$  pela seleção dos indivíduos mais adaptados.

Após um determinado número de gerações, a condição de parada deve ser atendida, a qual usualmente indica a existência, na população, de um indivíduo que represente uma solução aceitável para o problema, ou quando o número máximo de gerações foi atingido [8] e [9].

Serão definidos, de forma mais detalhada, os operadores e formulações necessários para a utilização dos AE's ao problema de EEH.

#### A. Representação dos Indivíduos

O indivíduo utilizado para a solução do problema em estudo deve representar um possível estado harmônico do sistema. Sendo assim, o indivíduo considerado consistirá em uma porcentagem dos módulos e a variação dos ângulos das correntes injetadas nas barras em relação à fundamental. Ou seja, para  $n$  barras de estimação consideradas tem-se que a dimensão do indivíduo deve ser de  $2n$ , correspondendo às  $n$  variações de módulo e às  $n$  porcentagens de ângulos.

Além das informações citadas, cada parâmetro de estimação do indivíduo possui também um fator que estabelece o seu passo de mutação  $\sigma$ . Sendo assim, cada porcentagem de módulo e cada variação de ângulo possui um passo de mutação associado.

#### B. Operador Mutação

Como descrito em [9], em Estratégias Evolutivas, a mutação tem um papel central no direcionamento da evolução de um único indivíduo. Sendo assim, cada indivíduo gera outros  $n\_mutacao$  indivíduos. As variações impostas por mutação são de pequeno passo em torno do indivíduo original. Para melhorar os passos de mutação foi introduzida auto-adaptação como definida nas referências [10, 11].

Matematicamente pode-se definir a mutação com auto-adaptação como:

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1)) \quad (2)$$

$$x'_i = x_i + \sigma'_i \cdot N_i(0,1) \quad (3)$$

Onde:

$\sigma'_i \rightarrow$  variação do parâmetro  $\sigma$  de índice  $i$

$\sigma_i \rightarrow$  passo de mutação

$N_i(0,1) \rightarrow$  valor sorteado a cada geração com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1.

$N(0,1) \rightarrow$  valor sorteado a cada geração com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1. Este se mantém constante para cada indivíduo.

$\tau' \rightarrow$  taxa de aprendizado ( $\propto (\sqrt{2n})^{-1}$ )

$\tau \rightarrow$  taxa de aprendizado ( $\propto (\sqrt{2\sqrt{n}})^{-1}$ )

Nesta modelagem, os parâmetros  $n$  e  $\sigma$  devem ser ajustados para cada aplicação, onde  $n$  é uma constante que visa controlar a variabilidade da mutação.

#### C. Recombinação

O operador recombinação, aliado à mutação, tem por objetivo introduzir variabilidade à busca aleatória da solução do problema. Parte-se do princípio que a troca de informações “genéticas” entre indivíduos de uma mesma espécie pode resultar em indivíduos melhores, ou também, evitar que o algoritmo convirja para “ótimos” locais.

O cruzamento consiste em criar um novo indivíduo que contenha informação genética resultante da combinação das informações genéticas de seus pais.

Os parâmetros de cada indivíduo gerado por um processo de reprodução, assim como seus passos de mutação, podem ser obtidos através, por exemplo, da média aritmética dos parâmetros e dos passos dos indivíduos pais ou troca das informações, porcentagem de ângulo de um indivíduo com variação de ângulo de outro indivíduo.

#### D. Avaliação

A avaliação dos indivíduos da população deve indicar o quão perto da melhor solução está um indivíduo, considerando que cada indivíduo representa uma solução para o problema.

Uma vez que se pretende estimar valores de distorções harmônicas em pontos de uma rede elétrica tendo-se em mãos os valores das distorções em pontos de medições, o procedimento de avaliação dos indivíduos da população medirá a proximidade dos valores (tensão ou corrente) propostos nos indivíduos dos valores medidos.

Para o problema em estudo, foi considerado o vetor diferença entre o fasor de tensão harmônica medida e o fasor de tensão resultante do impacto devido as correntes harmônicas injetadas quantificadas pelo indivíduo considerado. Desta forma, quanto menor a magnitude do vetor diferença, melhor será o indivíduo que está sendo avaliado.

A Fig. 1 abaixo ilustra o vetor diferença considerado na avaliação dos indivíduos.

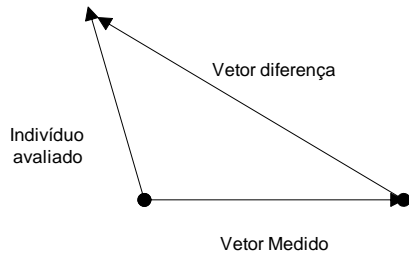


Fig. 1 – Ilustração do vetor diferença utilizado na avaliação de um indivíduo.

Foram também considerados na avaliação valores que se situam fora do intervalo admitido para um indivíduo. Sendo assim, indivíduos que possuam módulo de tensão superior à tensão fundamental serão penalizados obtendo notas baixas.

### E. Seleção

No algoritmo de estratégia evolutiva proposto a operação de seleção dos indivíduos para a formação de gerações futuras é determinística, pois se limita a selecionar os melhores indivíduos no universo “população inicial” mais “filhos” ( $\mu+\lambda$ ) [8] como apresentado na figura 2.

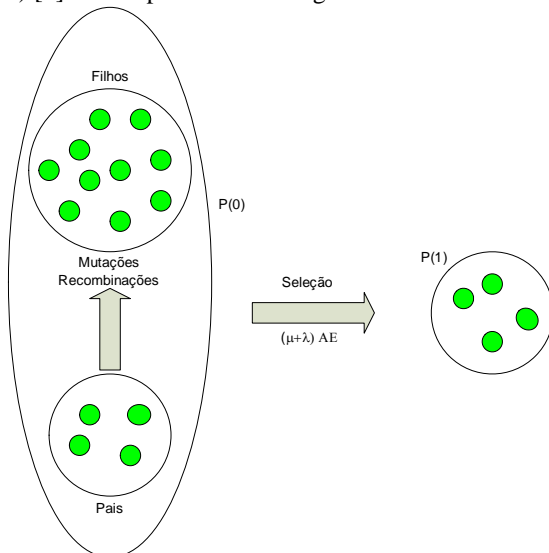


Fig. 2 – Método de seleção ( $\mu+\lambda$ ).

## III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO HARMÔNICO UTILIZANDO ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS

O presente trabalho propõe o uso do Fluxo de Potência (FP) convencional para sincronizar os dados de tensões e correntes harmônicas provenientes dos medidores. Desta forma, o ponto inicial da metodologia proposta é calcular o FP e determinar o estado do sistema para a frequência fundamental.

A rede elétrica é modelada pela matriz de admitâncias nodais nas três seqüências (positiva, negativa e zero). Para a solução do FP na frequência fundamental foi utilizado o método de Gauss sobre a rede de seqüência positiva, pois admite-se não haver desequilíbrio de tensão e corrente nesta frequência.

Os dados de saída do FP são dados de entrada no algoritmo de estimação. Assim, devem ser preestabelecidas as ordens harmônicas de interesse na estimação. Após o estabelecimento

das ordens harmônicas, o FP calcula, além do estado do sistema para a frequência fundamental, os modelos da rede elétrica para cada frequência de interesse.

Em seguida, os módulos do AE são acionados buscando, de forma independente, o estado harmônico para cada frequência. O problema de estimação harmônica possui, nesta formulação,  $2n$  variáveis provenientes dos módulos e ângulos das  $n$  barras de estimação e  $2n$  passos de mutação associados às variáveis de módulos e ângulos.

O fluxograma apresentado na Fig. 3 representa a metodologia proposta.

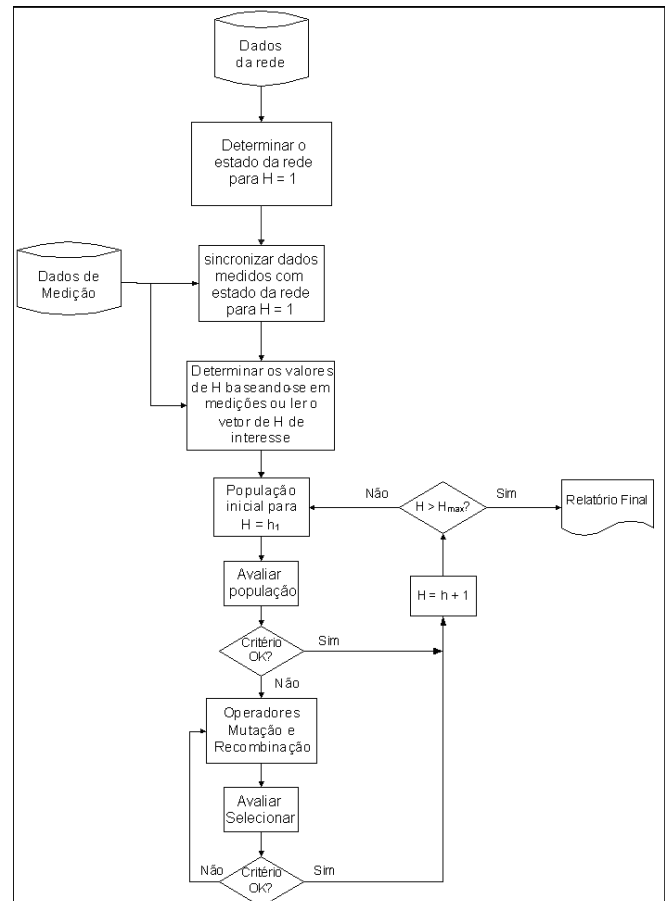


Fig. 3 – Fluxograma do método de estimação proposto.

## IV. RESULTADOS

A rede elétrica apresentada na Fig. 4 foi utilizada na avaliação do algoritmo proposto neste trabalho. Os dados desta rede foram obtidos no sítio do *Institute of Electrical and Electronical Engineering (IEEE)* [12].

Com medidores instalados nas barras 2, 4, 8, 9, 12 e 14, foram consideradas as ordens harmônicas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 na composição da Distorção Harmônica Total (DHT) em cada barra do sistema.

Como mencionado, o algoritmo proposto efetua a estimação de cada componente harmônica de forma independente. Em seguida o cálculo da distorção harmônica total é efetuado.

Como configurações do algoritmo foram consideradas:

- Número de gerações igual 500;

- Número de indivíduos na população inicial igual a 40;
- Número de mutações por indivíduo igual a 5;
- Taxa de recombinação por geração igual a 10%;
- Passo de mutação inicial igual a 1 para módulos e pi para ângulos;
- $n$  referente à auto-adaptação igual a 2;
- Evolução  $(\mu+\lambda)$ ;
- Método de recombinação igual a média;

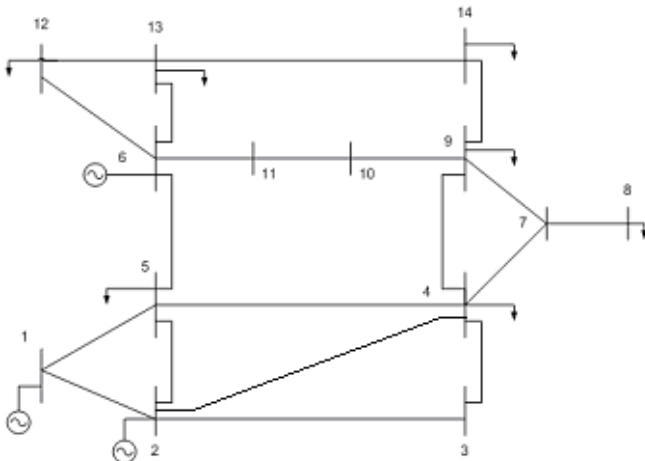


Fig. 4 – Rede elétrica utilizada nas avaliações.

A Tabela I apresenta os erros de estimação para as ordens harmônicas consideradas individualmente. Esses resultados representam uma média dos erros para os 30 casos rodados para cada ordem harmônica. Resultados semelhantes foram publicados na referência [7], porém com o foco na estimação de uma ordem harmônica específica. Pode-se verificar nesta tabela que os valores de erros de estimação para as ordens harmônicas individualmente são muito pequenos. As linhas em destaque na tabela representam as barras com medição.

TABELA I – ERRO DE ESTIMAÇÃO (%) PARA AS ORDENS HARMÔNICAS CONSIDERADAS INDIVIDUALMENTE.

Barra	Ordens Harmônicas					
	3	5	7	9	11	13
1	0,3011	1,4361	0,9143	0,2239	0,0416	0,5515
2	0,2087	1,4178	0,2884	0,0352	0,0265	0,4715
3	0,1155	1,3434	0,1728	0,0205	0,0213	0,4600
4	0,2059	1,0616	0,0411	0,0053	0,0017	0,0734
5	0,3408	1,1694	0,2054	0,2230	0,0404	0,4252
6	0,9816	0,7969	0,1441	0,6052	0,5011	0,5294
7	0,0782	0,6707	0,0535	0,0125	0,0875	0,2008
8	0,1786	1,1199	0,1492	0,0124	0,0810	0,1084
9	0,2241	0,5227	0,1913	0,0304	0,1671	0,4033
10	0,1606	0,5286	0,5390	0,2800	0,5236	1,0011
11	0,8894	0,5185	0,2987	0,3013	0,4648	0,7420
12	0,0750	0,2000	0,0556	0,0250	0,0414	0,2551
13	0,7392	0,2835	0,1388	0,2131	0,1332	0,7624
14	0,0842	0,3115	0,3637	0,0717	0,1189	0,6046

A Fig. 5 apresenta a nota média dos melhores indivíduos para cada ordem harmônica. Esta nota é obtida através do inverso da soma dos desvios quadrados em todas as barras com medição e é computada a cada geração do algoritmo e indica a velocidade de evolução no espaço de resultados. Embora em algumas ordens harmônicas os melhores indivíduos tenham obtido notas superiores a outras ordens, os erros de estimação foram satisfatórios como pode ser observado na Tabela I apresentada.

O crescimento continuado das notas dos indivíduos em todas as ordens harmônicas confirma o elitismo do algoritmo proposto e sua capacidade de encontrar uma solução para o problema. O crescimento monótono das notas dos melhores indivíduos em alguns casos pode representar uma dificuldade do operador recombinação em imputar uma variabilidade aos indivíduos que os leve mais rapidamente à região de melhor solução do problema, o que está ligado à complexidade do espaço de soluções.

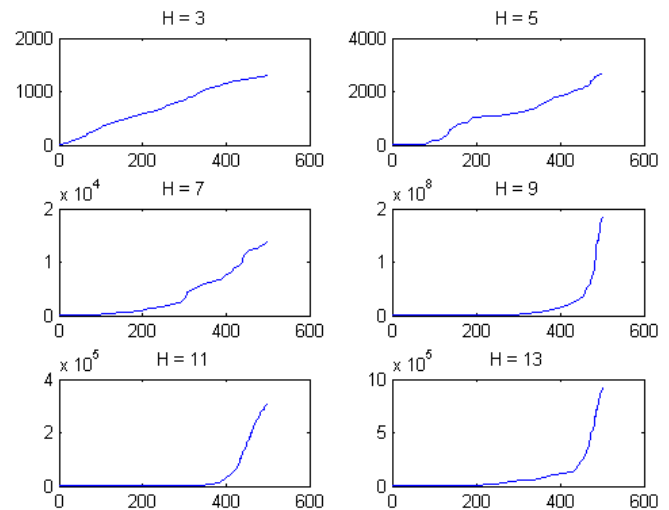


Fig. 5 – Nota média dos melhores indivíduos para cada ordem harmônica em função das gerações.

A Fig. 6 apresenta a evolução dos passos de mutação para cada ordem harmônica considerada. Pode-se perceber que apesar de variações avulsas nos passos de mutação dos indivíduos em determinadas gerações, estes evoluem para valores próximos de zero.

As variações encontradas na evolução dos passos de mutação representam a escolha de indivíduos frutos de recombinações inserindo variabilidade à evolução.

Uma vez obtidos os valores de tensão para cada ordem harmônica considerada em cada barra do sistema, a DHT é obtida.

Desta forma têm-se os valores apresentados na Tabela II, onde pode-se observar os valores de DHT, de referência e estimados, para cada barra do sistema teste, bem como os erros de estimação, relativo e absoluto.

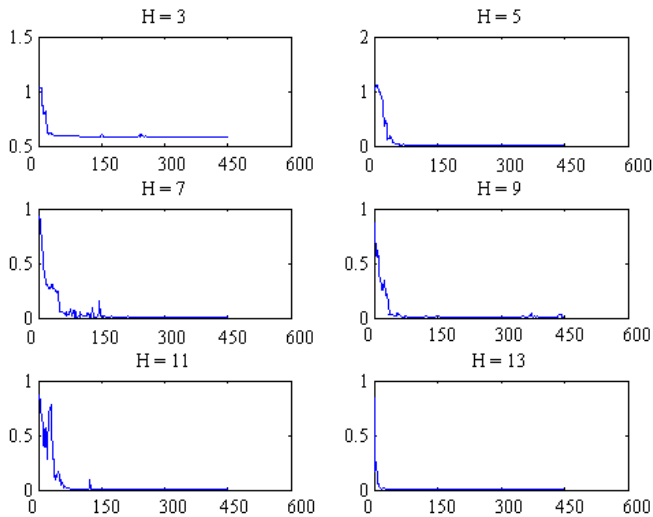


Fig. 6 – Evolução dos passos de mutação para cada ordem harmônica (H) considerada.

O erro absoluto apresentado na Tabela II representa o desvio obtido em relação à tensão nominal do sistema em estudo. Porém é esperado que os erros em relação aos valores de THD (erros relativos) sejam muito superiores. Pode-se perceber na quarta coluna da tabela em análise que esses erros ainda assim são pequenos, tendo um valor máximo inferior a 5%.

Como forma de verificar a robustez da metodologia proposta, foram considerados medidores somente nas barras 2, 8 e 12 do sistema.

A Tabela III apresenta os valores obtidos de THD e erros de estimação considerando os três medidores instalados no sistema. Os elevados erros em algumas barras sem medição no sistema são decorrentes da pouca visibilidade dos medidores. Por outro lado, ainda com pouca visibilidade por parte do sistema de medição, os resultados podem ser considerados satisfatórios tomando-se o erro absoluto como parâmetro. Este resultado se deve à topologia da rede.

TABELA II – VALORES DE THD DE REFERÊNCIA E CALCULADOS E ERROS RELATIVOS E ABSOLUTOS DE ESTIMAÇÃO.

Barra	THD (%)		Erro (%)	
	referência	calculados	relativo	absoluto
1	0,0545	0,0548	0,5468	0,0298
2	0,0528	0,0529	0,1370	0,0072
3	0,0502	0,0496	1,1816	0,0593
4	0,0405	0,0395	2,4706	0,1001
5	0,0421	0,0410	2,7515	0,1159
6	0,0378	0,0379	0,3151	0,0119
7	0,0394	0,0391	0,7450	0,0294
8	0,0426	0,0424	0,2744	0,0117
9	0,0409	0,0407	0,6056	0,0248
10	0,0407	0,0425	4,4646	0,1818
11	0,0398	0,0406	1,8083	0,0721
12	0,0387	0,0388	0,2835	0,0110
13	0,1952	0,2009	2,8884	0,5639
14	0,2082	0,2085	0,1322	0,0275

TABELA III - VALORES DE THD DE REFERÊNCIA E CALCULADOS E ERROS RELATIVOS E ABSOLUTOS DE ESTIMAÇÃO, CONSIDERANDO APENAS 3 MEDIDORES INSTALADOS NO SISTEMA.

Barra	THD		Erro (%)	
	referência	calculados	relativo	absoluto
1	0,0545	0,0560	2,7401	0,1493
2	0,0528	0,0532	0,6888	0,0364
3	0,0502	0,0481	4,0441	0,2028
4	0,0405	0,0390	3,8868	0,1576
5	0,0421	0,0431	2,2602	0,0952
6	0,0378	0,0428	13,3189	0,5035
7	0,0394	0,0396	0,4340	0,0171
8	0,0426	0,0408	4,1465	0,1765
9	0,0409	0,0438	7,1387	0,2921
10	0,0407	0,0461	13,1931	0,5372
11	0,0398	0,0449	12,5873	0,5016
12	0,0387	0,0370	4,4007	0,1705
13	0,0390	0,0401	2,5793	0,1007
14	0,0416	0,0573	37,6589	1,5682

Uma forma de melhorar os resultados de estimação é inserir no algoritmo outros dados conhecidos ou medidos do sistema em estudo como, por exemplo, dados de medição de corrente. Como a metodologia proposta considera as variações de ângulos e porcentagens de módulos da corrente como indivíduos das populações da estratégia evolutiva, a inserção desta informação garantiria a região de solução ótima para o algoritmo ou para algumas barras do sistema.

A Tabela IV apresenta os erros de estimação considerando 3 medidores de tensão, como no exemplo anterior, e um medidor de corrente harmônica na barra 8 do sistema. Verifica-se a redução considerável dos erros de estimação na maioria das barras do sistema.

TABELA IV - VALORES DE THD DE REFERÊNCIA E CALCULADOS E ERROS RELATIVOS E ABSOLUTOS DE ESTIMAÇÃO, CONSIDERANDO 3 MEDIDORES DE TENSÃO E UM DE CORRENTE.

Barra	THD (%)		Erro (%)	
	referência	calculados	relativo	absoluto
1	0,0545	0,0542	0,4897	0,0267
2	0,0528	0,0527	0,2176	0,0115
3	0,0502	0,0486	3,1340	0,1572
4	0,0405	0,0384	5,3272	0,2159
5	0,0421	0,0403	4,3416	0,1830
6	0,0378	0,0381	0,7013	0,0265
7	0,0394	0,0380	3,4948	0,1378
8	0,0426	0,0426	0,0602	0,0026
9	0,0409	0,0404	1,2209	0,0500
10	0,0407	0,0404	0,7511	0,0306
11	0,0398	0,0386	3,1834	0,1268
12	0,0387	0,0390	0,7811	0,0303
13	0,0390	0,0443	13,5514	0,5291
14	0,0416	0,0499	19,8447	0,8264

Outra forma de melhorar os resultados seria através do conhecimento de algumas cargas harmônicas na rede. Tais informações indicariam um caminho de evolução ao algoritmo rumo a soluções ainda mais confiáveis.

#### V. CONCLUSÕES

Foi apresentada neste trabalho a estimação da distorção harmônica total em barras de um sistema elétrico a partir de medições em algumas barras. A técnica de Estratégias Evolutivas foi utilizada como ferramenta de otimização do problema.

O algoritmo proposto partiu de dados de medição de tensões harmônicas em algumas barras do sistema para estimar o conteúdo de DHT nas demais barras do sistema.

Os indivíduos considerados nesta metodologia são compostos por fatores (porcentagem do módulo e variação de ângulo) que representam a corrente harmônica em uma barra em função da corrente fundamental na própria barra. A partir destes indivíduos, correntes harmônicas injetadas nas barras do sistema, os valores das tensões harmônicas são calculados utilizando-se a matriz de admitâncias da rede para a ordem harmônica considerada. A melhor solução para o problema consiste na distribuição de tensões calculadas que minimizem o erro quadrático entre os valores calculados e os valores medidos. Este procedimento é repetido para cada ordem harmônica de interesse e finalmente o valor da DHT é calculado.

Uma rede de 14 barras, cujos dados foram obtidos no sítio do IEEE apresentado na referência [12], foi utilizada nas simulações.

Foram apresentados os resultados da estimação individual das tensões harmônicas tendo sido consideradas as ordens 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>. Foram simulados 30 casos para cada ordem e o algoritmo mostrou-se robusto e com excelentes resultados de estimação.

As distorções estimadas individualmente foram utilizadas para obter a DHT em cada barra. Os resultados obtidos apresentaram erros inferiores a 1% em todas as simulações.

Foram também abordadas formas de diminuição dos erros de estimação em situações de pouca visibilidade por parte do sistema de medição, sendo estas, o conhecimento de cargas harmônicas em pontos da rede em estudo ou informações extras de medição.

Utilizando apenas 3 medidores de tensões harmônicas instalados na rede e os valores de correntes harmônicas em uma das barras, o algoritmo foi capaz de diminuir os erros de estimação em mais de 50% em barras próximas a essas medições quando comparado com a análise desconsiderando as medições de corrente.

Salienta-se que os resultados obtidos neste trabalho, embora tenham focado uma pequena rede elétrica, indicam um vasto campo de análise quanto à EEH.

#### VI. AGRADECIMENTOS

Ao Enerq – Centro de Estudos em Regulação e Qualidade

de Energia da Escola Politécnica da USP e aos colegas de trabalho pelos auxílios técnicos.

#### VII. REFERÊNCIAS

- [1] Z. P. Du, J. Arrilaga, N. Watson, and S. chen, "Identification of Harmonic Sources of Power systems Using State Estimation," *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, pp. 7-12, 1999.
- [2] Z. P. Du, J. Arrilaga, N. Watson, and S. chen, "Implementation of Harmonic State Estimation," *Proceedings, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 1, pp. 273-278, 1998.
- [3] G. T. Heydt, "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 8, 1989.
- [4] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, and S. Zelingher, "Hardware and Software Requirements for a Transmission System Harmonic Measurement System," *Harmonics in Power Systems, ICHPSV*, pp. 330-338, 1992.
- [5] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, and S. Zelingher, "Power System Harmonic State Estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 1701-1709, 1994.
- [6] E. F. Arruda and N. Kagan, "Estimação Harmônica Utilizando Algoritmos Evolutivos," presented at X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - X SEPOPE, Florianópolis, 2006.
- [7] N. Kagan and E. F. Arruda, "Harmonic Estimation Using Evolutionary Algorithms," presented at ICHQP - International Conference on Harmonics and Quality of Power, Cascais, 2006.
- [8] T. Back and H.-P. Schwefel, "Evolutionary Computation: An Overview," presented at Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996.
- [9] T. Back, U. Hammel, and H.-P. Schwefel, "Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 3-17, 1997.
- [10] D. B. Fogel, *Evolutionary computation : toward a new philosophy of machine intelligence*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.
- [11] H.-P. Schwefel, *Numerical optimization of computer models*. Chichester ; New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [12] "Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation," in *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, IEEE Power Engineering Society*, <http://groupier.ieee.org/groups/harmonic/simulate/download.htm>, Ed.

#### VIII. BIOGRAFIAS

**Elcio F. de Arruda** nasceu em Minas Gerais, Brasil, em 1976. Graduiu-se na Universidade Federal de Juiz de Fora em 2000. Obteve o título de mestre em 2003 pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Trabalha como Engenheiro de Desenvolvimento de Geradores na Alstom desde 2006 e desenvolve sua tese de doutorado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Suas principais áreas de interesse são Qualidade de Energia, Sistemas Inteligentes, Transformada Wavelet e projeto de geradores. (elcio.arruda@gmail.com)

**Nelson Kagan** nasceu em São Paulo, Brasil, no dia 8 de outubro de 1960. Graduiu-se na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1982. Obteve o título de mestre em 1988, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e o título de Ph.D em 1993 pela Universidade de Londres. Leciona na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1983, na qual é Professor Associado. Suas principais áreas de interesse são Planejamento de Sistemas de Potência e Qualidade de Energia