

# Determinação das Distorções Harmônicas Através de Estimadores de Estado Baseados na Evolução Diferencial

G. G. Santos<sup>1</sup>, T. L. Oliveira<sup>2</sup>, A. L. Barroso<sup>3</sup>, A. C. Santos<sup>1</sup>, J. C. Oliviera<sup>1</sup>, K. Yamanaka<sup>4</sup>

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Uberlândia-MG, Brasil

<sup>1</sup>Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica, <sup>2</sup>Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos,

<sup>3</sup>Núcleo de Redes de Computadores, <sup>4</sup>Núcleo de Inteligência Artificial

g.gustavo.santos@gmail.com, thaleslima.ufu@gmail.com, natosalb@hotmail.com, andreia.crico@gmail.com, jcoliveira@ufu.br, keiji@ufu.br

**Resumo** — As crescentes preocupações com os denominados indicadores da qualidade da energia elétrica nos sistemas elétricos de potência, conciliada aos requisitos definidos pelos agentes reguladores, têm levado a necessidade da instalação de medidores de qualidade da energia elétrica para avaliar a real situação operacional que se encontram as redes elétricas. Reconhecendo as dificuldades de medições diretas na totalidade dos alimentadores, este artigo encontra-se centrado numa metodologia que visa, através de um número reduzido de medidores, estimar as distorções harmônicas dos complexos. O método utilizado se apoia no algoritmo de evolução diferencial, o qual se apresenta com atributos associados com sua simplicidade de implementação, robustez, eficiência, auto-adaptação e versatilidade. Estudos computacionais são feitos afim de avaliar a eficácia do processo para um sistema elétrico típico.

**Palavras-chaves** — Estimação harmônica, evolução diferencial, fluxo harmônicos, injeção de harmônicos, qualidade da energia elétrica.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia e o crescimento de cargas não-lineares, reconhece-se que estas atuam como fonte de correntes harmônicas e injetam correntes não-senoidais no sistema[1]. Como consequência disto, as tensões disponibilizadas pelas concessionárias se apresentam com distorções harmônicas, as quais, em consonância com seus atributos, podem impactar fortemente na forma de: aquecimento de equipamentos, diminuição da potência disponibilizada por equipamentos, mau funcionamento de dispositivos diversos, impactos sobre o fator de potência, interferência nas linhas de comunicação, etc.[2].

Focando especificamente a questão das distorções harmônicas, vale ressaltar que, os órgãos reguladores e responsáveis pelo estabelecimento dos requisitos a serem atendidos quanto aos indicadores da Qualidade da Energia Elétrica (QEE), estabelecem, dentre outros, limites para as distorções harmônicas de tensão a serem observadas no sistema elétrico de potência. No caso do Brasil, no módulo 8 do documento PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [3].

Isto posto, segue que o cumprimento destas medidas deve ser realizado através de campanhas de medição ou acompanhamentos contínuos das grandezas ora tratadas, as quais são necessariamente feitas por meio de medições diretas em campo. Assim procedendo, torna-se viável a correlação entre os padrões exigidos e aqueles efetivamente praticados pelas empresas do setor elétrico. Diante desta realidade, fica evidenciado que a instalação de medidores de qualidade da energia elétrica, diante do grande número de barramentos e linhas que compõem um sistema elétrico, não é uma solução trivial, visto os custos dos medidores, canais de comunicação, requisitos de armazenamento, tratamento de dados, etc. [4].

À luz desses fatos fica evidenciado que metodologias que visam minimizar o custo total do monitoramento se apresentam como objeto de grande atratividade. Inserido neste cenário, este artigo encontra-se centrado na apresentação e utilização de uma metodologia para a estimação de estado harmônico (EEH) nos distintos pontos do sistema por meio de uma quantidade mínima de medidores.

Diferentemente dos trabalhos [5] e [6] que fazem a EEH utilizando algoritmo genético (AG), este artigo encontra-se centrado no emprego do denominado algoritmo de evolução diferencial (ED), o qual tem recebido merecido destaque nos trabalhos envolvendo otimização [7]. As vantagens do ED são: estrutura simples, facilidade de uso, velocidade e robustez [8].

Em síntese, a metodologia desenvolvida compreende a implementação de um ED para estimar as correntes harmônicas injetadas nas barras do sistema, utilizando como base as medições de tensão feitas em determinados pontos físicos da rede. A partir do conhecimento das correntes harmônicas estimadas e empregando os fundamentos metodológicos tradicionais usados para o cálculo do fluxo harmônico, são determinadas as tensões harmônicas para a totalidade dos barramentos. Estas correspondem pois aos indicadores estimados para as distorções harmônicas.

Para fins ilustrativos são realizados trabalhos de cunho teórico e aplicados ao sistema elétrico padrão do IEEE – 14 barras. Para este arranjo são injetadas correntes harmônicas pré-definidas em distintos barramentos de carga e determinados computacionalmente os valores das distorções de tensão para cada barramento. Estes resultados correspondem aos valores

de referência para posterior avaliação de desempenho do método utilizado. Na sequência, a partir do conhecimento das distorções em barras pré-determinadas (onde supostamente estariam inseridos os medidores) é aplicado o algoritmo de EEH e, por fim, os resultados denominados por referenciais são correlacionados com aqueles advindos do processo de estimação ora tratado.

## II. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

O algoritmo de ED foi proposto como uma nova classe de algoritmos evolutivos em 1997 [9]. Similar a outros algoritmos correlatos, o ED se baseia na ideia da evolução de uma população constituída por possíveis soluções candidatas, as quais são chamadas de indivíduos. Ao longo do processo evolutivo, esses indivíduos sofrem operações de mutação, cruzamento (*crossover*) e seleção e, dessa maneira, novas soluções candidatas são geradas. Cada nova população obtida constitui uma geração melhor que a anterior e, após um determinado número de iterações, um local ótimo global pode ser atingido.

De forma concisa, pode-se dizer que o algoritmo funciona da seguinte maneira: os indivíduos são inicializados aleatoriamente, num espaço D-dimensional e os valores da função objetivo (*fitness*) de cada um deles são calculados. A partir de uma sequência de iterações, o melhor indivíduo pode, então, ser encontrado. Após sua inicialização, a população sofre o processo de evolução característico do algoritmo de ED, o qual é detalhado na sequência.

### A. Mutação

Tendo em mente uma determinada geração  $G$ , para cada indivíduo da população ( $x_{i,G}$ ), definido por um denominado vetor alvo (*target*), gera-se um vetor mutante, conforme (1).

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (1)$$

Onde,

$v_{i,G+1}$  é o vetor mutante;  
 $r1, r2$  e  $r3$  representam as posições de distintos indivíduos;  
 $F$  é o fator de mutação.

A constante real  $F$  é responsável por controlar a amplitude da diferença entre dois indivíduos. Geralmente, é usado um fator de mutação no intervalo de 0 a 2 [9]. Quanto mais alta for essa constante, maior o salto e mais rápido o algoritmo chega ao ótimo global, porém, as chances de não detectar um vale ou um pico na função objetivo são maiores. Por outro lado, um fator de mutação muito pequeno faz com que o algoritmo tenha um tempo maior de convergência e consiga refinar bem o espaço de busca próximo, contudo pode ocasionar a estagnação do indivíduo em um ótimo local. Neste trabalho optou-se por uma variação aleatória de  $F$ .

### B. Cruzamento

Com a finalidade de aumentar a diversidade dos valores dos vetores, o cruzamento é realizado e gera-se um novo vetor chamado teste (*trial*), o qual é formado segundo (2).

$$u_{i,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{se } \text{rand}(j) \leq PC \\ x_{ji,G} & \text{se } \text{rand}(j) > PC \end{cases} \quad (2)$$

Onde,

$u_{i,G+1}$  é o vetor teste;  
 $v_{ji,G+1}$  é o elemento  $j$  do vetor mutante;

$x_{ji,G}$  é o elemento  $j$  do vetor alvo;  
 $\text{rand}(j)$  é um número aleatório entre 0,0 e 1,0;  
 $PC$  é a probabilidade de cruzamento.

A probabilidade de cruzamento é geralmente escolhida em um intervalo entre 0,0 e 1,0 [8]. Deve ser escolhida uma alta taxa para aumentar a diversidade da população e, assim, obter melhores resultados. A Fig. 1 representa o processo de cruzamento aqui referido.

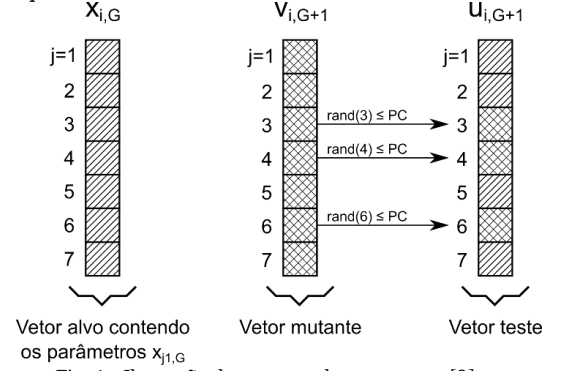


Fig. 1 - Ilustração do processo de cruzamento [9].

### C. Seleção

A operação de seleção seleciona o melhor indivíduo entre o vetor alvo e o vetor teste para compor a nova população da geração  $G+1$  de acordo com o valor da função objetivo.

## III. METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme mostra o fluxograma da Fig. 2, o primeiro passo do programa consiste na leitura dos parâmetros dos componentes da rede (barras e ramos), além das tensões resultantes do fluxo de carga. Define-se a maior ordem harmônica de interesse. Após isto, é realizado o cálculo da distorção individual de tensão (DIT) real, bem como da DIT estimada, advinda do cálculo de EEH detalhada no fluxograma apresentado na Fig. 3. Finalmente, são realizados os cálculos das distorções totais de tensão (DTT) reais e estimadas, e avaliados os erros de estimação.

No que tange especificamente a EEH, o desafio consiste em determinar o nível de tensão para as ordens harmônicas de interesse em todas as barras do SEP, a partir do conhecimento do conteúdo harmônico real presente em alguns locais da rede, informações essas advindas de medidores de qualidade de energia instalados em pontos estratégicos. Quando o algoritmo em questão é utilizado para todas as harmônicas relevantes na rede, a distorção total de tensão pode ser então estimada nas barras do sistema [5]. A operação de seleção elege o melhor indivíduo entre o vetor alvo e o vetor teste para compor a nova população da geração  $G+1$  de acordo com o valor da função objetivo.

De forma geral, conforme ilustra o fluxograma da Fig. 3, o algoritmo implementado para EEH consiste em encontrar soluções para o problema em questão de acordo com os critérios de convergência adotados. Neste algoritmo,  $P(G)$  denota uma população de  $x$  indivíduos na geração  $G$ , cuja inicialização é realizada de forma aleatória (sorteio dos  $x$  indivíduos). Como já comentado, os indivíduos configuram possíveis soluções para o problema em análise e, assim sendo, cada um dos elementos do vetor indivíduo representa a corrente harmônica injetada em cada barra do complexo elétrico investigado.

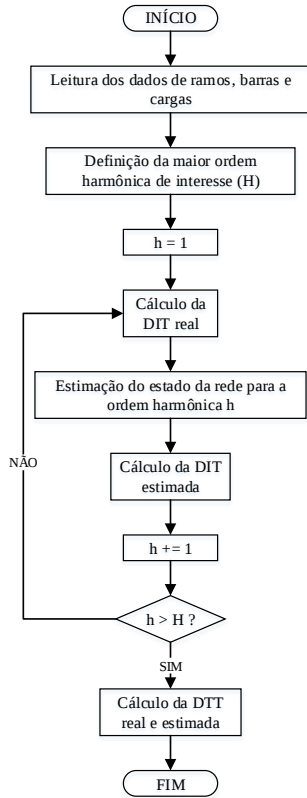


Fig. 2 - Fluxograma geral do programa.

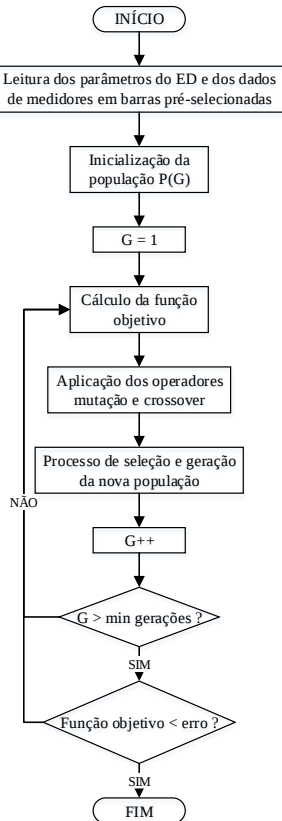


Fig. 3 - Fluxograma da EEH utilizando ED.

Em cada iteração, após determinada a população, é executado o fluxo harmônico para obtenção dos níveis de tensão nas barras do sistema e calculado o valor da função objetivo de cada indivíduo. Nota-se que a função objetivo é constituída

pela soma dos erros quadráticos entre os valores reais e os estimados das tensões, nas barras onde existem medidores, conforme apresenta (3).

$$\begin{aligned}
 \text{função objetivo} &= \sum_{k=1}^{n_{med}} |ee_h^k|^2 \\
 &= \sum_{k=1}^{n_{med}} |V_{hM}^k - V_{hCalc}^k|^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

Onde,

$ee_h^k$  é o erro de estimação na barra k, de ordem harmônica h;

$V_{hCalc}^k$  é a tensão harmônica calculada na barra k;

$V_{hM}^k$  é a tensão harmônica medida (real) na barra k;

$n_{med}$  é o número de barras com medidores.

Uma nova população é gerada por meio dos operadores de mutação, cruzamento e seleção, conforme explicado anteriormente. Até que seja atingido o critério de parada, o processo evolutivo é continuado e são criadas novas gerações. Foram adotados dois critérios de parada, quais sejam: número mínimo de gerações e um valor mínimo da função objetivo aceitável.

#### IV. ESTUDO DE CASO

A fim de verificar a eficácia dos procedimentos discutidos, a metodologia proposta foi aplicada para o estudo de EEH no complexo elétrico padrão IEEE 14 barras. A topologia do sistema é mostrada na Fig. 4 e a parametrização do mesmo foi extraída de [10, 11]. Os trabalhos foram conduzidos com base em programa computacional desenvolvido em linguagem MATLAB®. Ressalta-se que para esse estudo de caso foram considerados tapes unitários para todos os quatro transformadores.

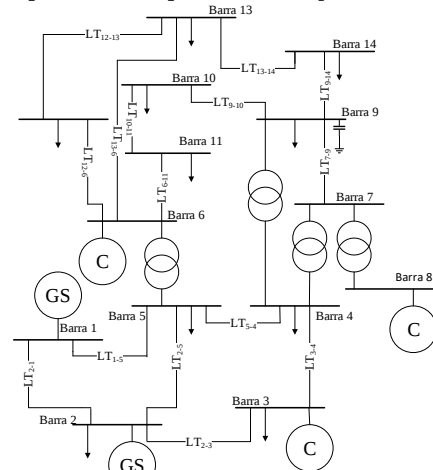


Fig. 4 - Sistema IEEE 14 barras.

As correntes harmônicas injetadas nas barras de carga são apresentadas na Tabela I. Para o presente trabalho, considerou-se que as correntes injetadas estão em fase e com ângulo zero. Também, ressalta-se que para os barramentos junto aos quais foram realizadas as injeções das correntes harmônicas, suas correspondentes potências foram mantidas através da representação por correspondentes impedâncias constantes, nos termos classicamente utilizados. Isto evidencia que os barramentos ora considerados foram admitidos como fontes de correntes harmônicas em paralelo com suas respectivas impedâncias atreladas com os carregamentos  $P + jQ$ .

Tabela I - Correntes harmônicas injetadas no sistema.

| Barra | Correntes (A) |        |        |        |        |        |
|-------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 3h            | 5h     | 7h     | 9h     | 11h    | 13h    |
| 1     | 0,000         | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  |
| 2     | 0,000         | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  |
| 3     | 80,408        | 40,204 | 16,082 | 32,163 | 8,041  | 8,041  |
| 4     | 80,258        | 40,129 | 16,052 | 32,100 | 8,026  | 8,026  |
| 5     | 9,748         | 4,874  | 1,950  | 3,900  | 0,975  | 0,975  |
| 6     | 0,000         | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  |
| 7     | 0,000         | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  | 0,000  |
| 8     | 111,621       | 55,811 | 22,324 | 44,648 | 11,162 | 11,162 |
| 9     | 169,941       | 84,970 | 33,988 | 67,976 | 16,994 | 16,994 |
| 10    | 58,233        | 29,117 | 11,647 | 23,293 | 5,823  | 5,823  |
| 11    | 39,518        | 19,759 | 7,410  | 15,807 | 3,952  | 3,952  |
| 12    | 26,400        | 13,192 | 5,277  | 10,554 | 2,638  | 2,638  |
| 13    | 67,619        | 33,810 | 13,524 | 27,048 | 6,762  | 6,762  |
| 14    | 92,055        | 46,027 | 18,411 | 36,822 | 9,205  | 9,205  |

Foram considerados os seguintes parâmetros do algoritmo de ED: probabilidade de cruzamento igual a 0,8, tamanho da população igual a 200, número mínimo de gerações igual a 35000 e, conforme mencionado anteriormente, foi utilizado um fator de mutação aleatório, para os harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª ordens. Por se tratar de um algoritmo evolutivo, para cada resultado apresentado nesse artigo, o algoritmo de ED implementado para EEH foi executado pelo menos 5 vezes, sendo considerado sempre o pior resultado encontrado, de modo a garantir a eficácia da metodologia independentemente da população inicial.

Por meio de uma metodologia, ainda não sistematizada, buscou-se a definição da alocação dos medidores visando os melhores resultados para a aderência dos valores de referências e os estimados. A utilização do termo “não sistematizada” se apoia no fato que, até o presente momento, não foram estabelecidos princípios sólidos para a escolha do processo de alocação, tema esse a ser explorado ao longo do avanço da presente pesquisa. À luz deste critério foram empregados vários medidores em distintos barramentos, buscando se atingir um número mínimo de registradores, procedimento esse que culminou na instalação de 6 medidores para estimar o estado harmônico do sistema em estudo, sendo estes inseridos nas barras 2, 4, 7, 9, 11 e 14. A adoção de injeções harmônicas apenas para essas barras está fundamentada no fato que tais barramentos correspondem aqueles supridores de cargas, enquanto que os demais são de geração, compensação de reativos ou meramente de transferência. Com essa configuração, o ED implementado apresentou resultados de DIT e DTT estimados idênticos aos reais.

Diante dessa conjuntura, realizaram-se novas simulações com intuito de reduzir o número de medidores. Para tanto, nas simulações com apenas 5 e 4 medidores instalados, utilizaram-se as mesmas configurações do caso anterior.

Para a EEH com 5 medidores, determinou-se empiricamente, a alocação ótima dos medidores nas barras 2, 4, 7, 9 e 14. A Tabela II exhibe os erros relativos de DIT para essa situação. Observa-se que, nas barras que contém medidores, os erros relativos foram nulos. Por outro lado, contemplando as barras sem medição, foi encontrado erro máximo de -19,2308% na barra 12 para a 9ª harmônica.

A análise exclusiva dos erros relativos pode induzir a interpretações equivocadas, uma vez que barras com pouca distorção de tensão e, por esse motivo, menos impactantes na EEH, podem apresentar os maiores erros. A título de esclarecimento, o erro de -19,2308% encontra-se associado com um barramento cuja nível de DIT é de 0,26%.

Tabela II – Erro relativo de DIT em porcentagem usando 5 medidores

| Barra | Ordens Harmônicas |         |         |          |          |         |
|-------|-------------------|---------|---------|----------|----------|---------|
|       | 3h                | 5h      | 7h      | 9h       | 11h      | 13h     |
| 1     | -0,6579           | 0,0000  | 2,3256  | 0,0000   | 0,0000   | -0,5988 |
| 2     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000  |
| 3     | -0,6522           | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | -0,3984 |
| 4     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000  |
| 5     | 1,1928            | 0,1445  | -2,6316 | 0,6098   | 1,5385   | 0,3165  |
| 6     | 0,5017            | -0,2286 | 0,0000  | 6,0000   | -9,3023  | -0,9259 |
| 7     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000  |
| 8     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000  |
| 9     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000  |
| 10    | -2,5200           | -0,8621 | 0,8559  | 0,9634   | 7,5000   | 9,2593  |
| 11    | 2,1053            | 0,1654  | 0,6263  | 5,2000   | -9,0909  | -9,3750 |
| 12    | 3,7879            | 1,1765  | -2,5180 | -19,2308 | -8,1633  | 0,0000  |
| 13    | 0,8721            | -0,2028 | 0,3289  | 7,3171   | -13,6364 | -4,3011 |
| 14    | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000   | 0,0000  |

Objetivando evitar interpretações menos impactantes sobre os resultados, optou-se pela determinação das diferenças percentuais usando uma mera correlação entre os valores esperados e os estimados. Assim sendo, conforme mostra a Tabela III os resultados desta comparação. Como se constata, o erro absoluto constatado para a tensão de ordem 9 e associada com o barramento 12 é de -0,05%. Para os barramentos onde se localizam os medidores, como pode ser visto, a diferença é nula, como seria esperado.

Tabela III – Erro absoluto de DIT em porcentagem usando 5 medidores

| Barra | Ordens Harmônicas |         |         |         |         |         |
|-------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 3h                | 5h      | 7h      | 9h      | 11h     | 13h     |
| 1     | -0,0100           | 0,0000  | 0,0100  | 0,0000  | 0,0000  | -0,0100 |
| 2     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 3     | -0,0300           | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | -0,0100 |
| 4     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 5     | 0,0600            | 0,0100  | -0,0400 | 0,0100  | 0,0200  | 0,0100  |
| 6     | 0,0300            | -0,0200 | 0,0000  | 0,0300  | -0,0400 | -0,0100 |
| 7     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 8     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 9     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 10    | -0,2200           | -0,1300 | 0,0600  | 0,0500  | 0,0600  | 0,0500  |
| 11    | 0,1600            | 0,0200  | 0,0300  | 0,1300  | -0,0100 | -0,0300 |
| 12    | 0,2500            | 0,1100  | -0,0700 | -0,0500 | -0,0400 | 0,0000  |
| 13    | 0,0600            | -0,0200 | 0,0100  | 0,0300  | -0,0600 | -0,0400 |
| 14    | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |

Por fim, a Tabela IV exhibe os resultados para as distorções totais de tensão quanto do emprego de 5 medidores. Como se percebe, a nível de aderência entre os valores esperados e os determinados pelo método de estimação se apresentam com uma boa correlação numérica.

Tabela IV – Resultados de estimação para 5 medidores

| Barra | DTT estimado (%) | DTT real (%) | Erro relativo (%) | Erro absoluto (%) |
|-------|------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| 1     | 3,2618           | 3,2562       | -0,1712           | -0,0056           |
| 2     | 6,1765           | 6,1765       | 0,0000            | 0,0000            |
| 3     | 8,0098           | 7,9931       | -0,2078           | -0,0166           |
| 4     | 10,6062          | 10,6062      | 0,0000            | 0,0000            |
| 5     | 9,4384           | 9,4858       | 0,4994            | 0,0474            |
| 6     | 11,0419          | 11,0300      | -0,1075           | -0,0119           |
| 7     | 15,7694          | 15,7694      | 0,0000            | 0,0000            |
| 8     | 12,6511          | 12,6511      | 0,0000            | 0,0000            |
| 9     | 21,6082          | 21,6082      | 0,0000            | 0,0000            |
| 10    | 19,6723          | 19,5094      | -0,8345           | -0,1628           |
| 11    | 15,1464          | 15,2723      | 0,8243            | 0,1259            |
| 12    | 11,6265          | 11,8363      | 1,7725            | 0,2098            |
| 13    | 12,4347          | 12,4491      | 0,1154            | 0,0144            |
| 14    | 17,0785          | 17,0785      | 0,0000            | 0,0000            |

Para a EEH utilizando 4 medidores, com tais instrumentos alocados nas barras 2, 8, 12 e 14, situação esta que reflete o melhor desempenho quanto a alocação destes, obteve-se os resultados exibidos nas Tabelas V, VI e VII.

A Tabela V mostra que os erros relativos de DIT foram pequenos para as barras de medição, enquanto que para as demais houve uma expressiva perda de exatidão. A título de ilustração, verifica-se erro relativo de até 41,4364% na barra 13, para a 9ª harmônica.

Tabela V – Erro relativo de DIT em porcentagem usando 4 medidores

| Barra | Ordens Harmônicas |         |         |          |         |          |
|-------|-------------------|---------|---------|----------|---------|----------|
|       | 3h                | 5h      | 7h      | 9h       | 11h     | 13h      |
| 1     | 0,0000            | -0,4762 | 2,3256  | -5,4054  | 0,0000  | 0,0000   |
| 2     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000  | 0,0000   |
| 3     | 0,8696            | 0,7968  | 0,0000  | 25,7426  | -0,7092 | -0,7968  |
| 4     | -0,6838           | -0,3802 | 3,0303  | -16,6667 | -0,7634 | 0,0000   |
| 5     | 0,7952            | 0,1445  | 0,6579  | -10,9756 | 1,5385  | 0,3165   |
| 6     | -1,6722           | -0,9143 | 3,2028  | 18,0000  | -2,3256 | -1,8519  |
| 7     | -3,0263           | -2,1669 | 0,1938  | 38,5135  | 23,8095 | -26,6667 |
| 8     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000  | 0,0000   |
| 9     | 0,8899            | 0,3667  | -1,0896 | -4,7896  | -0,8000 | -1,9417  |
| 10    | -4,6964           | -1,3263 | 0,0000  | -6,3584  | 22,5000 | 5,5556   |
| 11    | -7,1053           | -4,0529 | 1,6701  | -15,2000 | 18,1818 | -34,3750 |
| 12    | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000  | 0,0000   |
| 13    | 1,5988            | 0,8114  | -1,3158 | 41,4634  | 4,5455  | 5,3763   |
| 14    | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000   | 0,0000  | 0,0000   |

Pelos motivos já expostos, a Tabela VI exhibe os erros absolutos de DIT. Observa-se que o maior erro constatado é igual a 1,14% na barra 7, para a 9ª harmônica.

Tabela VI – Erro absoluto de DIT em porcentagem usando 4 medidores

| Barra | Ordens Harmônicas |         |         |         |         |         |
|-------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 3h                | 5h      | 7h      | 9h      | 11h     | 13h     |
| 1     | 0,0000            | -0,0100 | 0,0100  | -0,0400 | 0,0000  | 0,0000  |
| 2     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 3     | 0,0400            | 0,0400  | 0,0000  | 0,7800  | -0,0100 | -0,0200 |
| 4     | -0,0400           | -0,0300 | 0,0500  | -0,3000 | -0,0100 | 0,0000  |
| 5     | 0,0400            | 0,0100  | 0,0100  | -0,1800 | 0,0200  | 0,0100  |
| 6     | -0,1000           | -0,0800 | 0,0900  | 0,0900  | -0,0100 | -0,0200 |
| 7     | -0,2300           | -0,2700 | 0,0100  | 1,1400  | 0,0500  | -0,1200 |
| 8     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 9     | 0,0800            | 0,0600  | -0,0900 | -0,3300 | -0,0100 | -0,0200 |
| 10    | -0,4100           | -0,2000 | 0,0000  | -0,3300 | 0,1800  | 0,0300  |
| 11    | -0,5400           | -0,4900 | 0,0800  | -0,3800 | 0,0200  | -0,1100 |
| 12    | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |
| 13    | 0,1100            | 0,0800  | -0,0400 | 0,1700  | 0,0200  | 0,0500  |
| 14    | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000  |

No que tange as distorções totais de tensão, estas encontram-se destacadas na Tabela VII. Portanto, não obstante as divergências encontradas quando da consideração das distorções individuais, os valores obtidos se apresentam com menores discrepâncias.

Tabela VII - Resultado de estimação para 4 medidores

| Barra | DTT estimado (%) | DTT real (%) | Erro relativo (%) | Erro absoluto (%) |
|-------|------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| 1     | 3,2668           | 3,2562       | -0,3260           | -0,0106           |
| 2     | 6,1765           | 6,1765       | 0,0000            | 0,0000            |
| 3     | 7,6903           | 7,9931       | 3,7891            | 0,3029            |
| 4     | 10,6964          | 10,6062      | -0,8503           | -0,0902           |
| 5     | 9,4801           | 9,4858       | 0,0602            | 0,0057            |
| 6     | 11,1362          | 11,0300      | -0,9627           | -0,1062           |
| 7     | 15,9224          | 15,7694      | -0,9704           | -0,1530           |
| 8     | 12,6511          | 12,6511      | 0,0000            | 0,0000            |
| 9     | 21,6658          | 21,6082      | -0,2664           | -0,0576           |
| 10    | 19,9320          | 19,5094      | -2,1660           | -0,4226           |
| 11    | 15,9733          | 15,2723      | -4,5898           | -0,7010           |
| 12    | 11,8363          | 11,8363      | 0,0000            | 0,0000            |
| 13    | 12,3252          | 12,4491      | 0,9951            | 0,1239            |
| 14    | 17,0785          | 17,0785      | 0,0000            | 0,0000            |

## V. OBSERVAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma proposição de estratégia para a estimação das distorções harmônicas presentes num complexo elétrico de potência, utilizando algoritmo de evolução diferencial. A metodologia se apresentou imbuída do propósito de estabelecer um processo de estimativa das distorções para os distintos barramentos a partir de um número mínimo de medidores. Essa solução vai ao encontro de uma necessidade cada vez mais expressiva no setor elétrico, tendo em vista a intensificação da presença de distorções harmônicas, os elevados custos de medidores de qualidade da energia e demais aspectos correlacionados com números elevados de pontos de medição.

A implementação da estratégia foi realizada no software MATLAB, viabilizando, assim, meios para o cálculo do fluxo harmônico e o emprego do algoritmo de ED responsável pela estimação das distorções harmônicas, cuja função objetivo é a minimização dos erros para as distorções harmônicas de tensão nas barras de medição.

A estratégia utilizada para os estudos investigativos sobre a eficácia do processo foi feita tomando por base o sistema padrão do IEEE de 14 barras. Uma vez estabelecida a topologia e parametrização do mesmo, foram injetadas correntes harmônicas pré-definidas em barramentos específicos e determinadas as tensões harmônicas decorrentes destas. Estas grandezas se apresentaram como valores de referência para os estudos comparativos que se seguiram.

Assim procedendo constatou-se que, com 6 medidores alocados, como dito, ainda sem o emprego de metodologias específicas para alocação otimizada, conseguiu-se atingir resultados similares advindos do processo de estimação e aqueles definidos como referência.

Avançando no sentido de reduzir o número de instrumentos alocados, foram conduzidas investigações com 5 e 4 medidores. Como seria esperado, à medida que se reduz o número de instrumentos alocados, há implicações sobre o nível de aderência entre os resultados. Todavia, a perda de qualidade da exatidão dos valores se fazem mais pronunciadas para os indicadores individuais de distorções, enquanto que as denominadas distorções totais se mostraram com razoável nível de coerência, ressalvado o fato que, quanto menor o número de monitores, maior se apresentam as discrepâncias. Os níveis obtidos para as grandezas ora referidas, assim como outras informações de ordem numérica se encontram claramente expostas no corpo do artigo e complementadas no apêndice.

Muito embora a eficácia da metodologia tenha se mostrado evidente para os estudos feitos, vale ressaltar que os trabalhos foram conduzidos à base de premissas que podem impactar nos resultados. Este é, por exemplo, o caso que as correntes harmônicas originalmente injetadas e supostamente produzidas pelas cargas não lineares, se apresentam, todas, com ângulos de fase nulos. Não obstante a essa particularidade, os autores entendem que a adoção de ângulos similares poderá contribuir acentuadamente para o agravamento das distorções harmônicas de tensão para os distintos barramentos. Essa situação é indicativa que, para estudos mais condizentes com a realidade dos sistemas elétricos, há a necessidade de avanços nos estudos visando, sobretudo, avaliar outros fatores de influência que não foram aqui considerados, a exemplo da utilização de diferentes ângulos de fase e tratamentos estatísticos/probabilísticos da matéria.

## VI. APÊNDICE

Tabela A.I – Dados das máquinas síncronas

| Nº da barra da máquina síncrona | S (MVA) | ra (pu) | xd (pu) | x'd(pu) | x''d(pu) |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 1                               | 615     | 0,00    | 0,8979  | 0,2995  | 0,23     |
| 2                               | 60      | 0,0031  | 1,05    | 0,1850  | 0,13     |
| 3                               | 60      | 0,0031  | 1,05    | 0,1850  | 0,13     |
| 6                               | 25      | 0,0014  | 1,25    | 0,232   | 0,12     |
| 8                               | 25      | 0,0041  | 1,25    | 0,232   | 0,12     |

Tabela A.II – Tensão de referência nas barras

| Barra(s)                     | Tensão Base (kV) |
|------------------------------|------------------|
| 1, 2, 3, 4 e 5               | 69               |
| 8                            | 18               |
| 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 | 13,8             |

Tabela A.III – Dados das barras na base de 100 MVA

| Barra | Tensão      |                | Carga |      | Geração |       | Shunt (pu) |
|-------|-------------|----------------|-------|------|---------|-------|------------|
|       | Módulo (pu) | Ângulo (graus) | MW    | Mvar | MW      | Mvar  |            |
| 1     | 1,060       | 0,000          | -     | -    | 232,4   | -16,9 | -          |
| 2     | 1,045       | -4,983         | 21,7  | 12,7 | 40      | 42,4  | -          |
| 3     | 1,010       | -12,725        | 94,2  | 19,0 | -       | 23,4  | -          |
| 4     | 1,018       | -10,313        | 47,8  | -3,9 | -       | -     | -          |
| 5     | 1,020       | -8,774         | 7,6   | 1,6  | -       | -     | -          |
| 6     | 1,070       | -14,221        | 11,2  | 7,5  | -       | 12,2  | -          |
| 7     | 1,062       | -13,360        | -     | -    | -       | -     | -          |
| 8     | 1,090       | -13,360        | -     | -    | -       | 17,4  | -          |
| 9     | 1,056       | -14,939        | 29,5  | 16,6 | -       | -     | 0,19       |
| 10    | 1,051       | -15,097        | 9,0   | 5,8  | -       | -     | -          |
| 11    | 1,057       | -14,791        | 3,5   | 1,8  | -       | -     | -          |
| 12    | 1,055       | -15,076        | 6,1   | 1,6  | -       | -     | -          |
| 13    | 1,050       | -15,156        | 13,5  | 5,8  | -       | -     | -          |
| 14    | 1,036       | -16,034        | 14,9  | 5,0  | -       | -     | -          |

Tabela A.IV – Dados dos ramos na base de 100 MVA

| Ramo | De | Para | R (pu)  | X (pu)  | B (pu) |
|------|----|------|---------|---------|--------|
| 1    | 1  | 2    | 0,01938 | 0,05917 | 0,0528 |
| 2    | 1  | 5    | 0,05403 | 0,22304 | 0,0492 |
| 3    | 2  | 3    | 0,04699 | 0,19797 | 0,0438 |
| 4    | 2  | 4    | 0,05811 | 0,17632 | 0,0340 |
| 5    | 2  | 5    | 0,05695 | 0,17388 | 0,0346 |
| 6    | 3  | 4    | 0,06701 | 0,17103 | -      |
| 7    | 4  | 5    | 0,01335 | 0,04211 | -      |
| 8    | 4  | 7    | -       | 0,20912 | -      |
| 9    | 4  | 9    | -       | 0,55618 | -      |
| 10   | 5  | 6    | -       | 0,25202 | -      |
| 11   | 6  | 11   | 0,09498 | 0,19890 | -      |
| 12   | 6  | 12   | 0,12291 | 0,25581 | -      |
| 13   | 6  | 13   | 0,06615 | 0,13027 | -      |
| 14   | 7  | 8    | -       | 0,17615 | -      |
| 15   | 7  | 9    | -       | 0,11001 | -      |
| 16   | 9  | 10   | 0,03181 | 0,08450 | -      |
| 17   | 9  | 14   | 0,12711 | 0,27038 | -      |
| 18   | 10 | 11   | 0,08205 | 0,19207 | -      |
| 19   | 12 | 13   | 0,22092 | 0,19988 | -      |
| 20   | 13 | 14   | 0,17093 | 0,34802 | -      |

Tabela A.V – DIT real

| Barra | Ordens Harmônicas |        |        |        |        |        |
|-------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 3h                | 5h     | 7h     | 9h     | 11h    | 13h    |
| 1     | 0,0152            | 0,021  | 0,0043 | 0,0074 | 0,0059 | 0,0167 |
| 2     | 0,0295            | 0,04   | 0,0075 | 0,0149 | 0,0112 | 0,0307 |
| 3     | 0,046             | 0,0502 | 0,0025 | 0,0303 | 0,0141 | 0,0251 |
| 4     | 0,0585            | 0,0789 | 0,0165 | 0,018  | 0,0131 | 0,029  |
| 5     | 0,0503            | 0,0692 | 0,0152 | 0,0164 | 0,013  | 0,0316 |
| 6     | 0,0598            | 0,0875 | 0,0281 | 0,005  | 0,0043 | 0,0108 |
| 7     | 0,076             | 0,1246 | 0,0516 | 0,0296 | 0,0021 | 0,0045 |
| 8     | 0,0686            | 0,101  | 0,0318 | 0,0055 | 0,0035 | 0,0067 |
| 9     | 0,0899            | 0,1636 | 0,0826 | 0,0689 | 0,0125 | 0,0103 |
| 10    | 0,0873            | 0,1508 | 0,0701 | 0,0519 | 0,008  | 0,0054 |
| 11    | 0,076             | 0,1209 | 0,0479 | 0,025  | 0,0011 | 0,0032 |
| 12    | 0,066             | 0,0935 | 0,0278 | 0,0026 | 0,0049 | 0,0101 |
| 13    | 0,0688            | 0,0986 | 0,0304 | 0,0041 | 0,0044 | 0,0093 |
| 14    | 0,0869            | 0,1349 | 0,052  | 0,0264 | 0,0015 | 0,0028 |

Tabela A.VI – DIT usando 5 medidores

| Barra | Ordens Harmônicas |        |        |        |        |        |
|-------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 3h                | 5h     | 7h     | 9h     | 11h    | 13h    |
| 1     | 0,0153            | 0,021  | 0,0042 | 0,0074 | 0,0059 | 0,0168 |
| 2     | 0,0295            | 0,04   | 0,0075 | 0,0149 | 0,0112 | 0,0307 |
| 3     | 0,0463            | 0,0502 | 0,0025 | 0,0303 | 0,0141 | 0,0252 |
| 4     | 0,0585            | 0,0789 | 0,0165 | 0,018  | 0,0131 | 0,029  |
| 5     | 0,0497            | 0,0691 | 0,0156 | 0,0163 | 0,0128 | 0,0315 |
| 6     | 0,0595            | 0,0877 | 0,0281 | 0,0047 | 0,0047 | 0,0109 |
| 7     | 0,076             | 0,1246 | 0,0516 | 0,0296 | 0,0021 | 0,0045 |
| 8     | 0,0686            | 0,101  | 0,0318 | 0,0055 | 0,0035 | 0,0067 |
| 9     | 0,0899            | 0,1636 | 0,0826 | 0,0689 | 0,0125 | 0,0103 |
| 10    | 0,0895            | 0,1521 | 0,0695 | 0,0514 | 0,0074 | 0,0049 |
| 11    | 0,0744            | 0,1207 | 0,0476 | 0,0237 | 0,0012 | 0,0035 |
| 12    | 0,0635            | 0,0924 | 0,0285 | 0,0031 | 0,0053 | 0,0101 |
| 13    | 0,0682            | 0,0988 | 0,0303 | 0,0038 | 0,005  | 0,0097 |
| 14    | 0,0869            | 0,1349 | 0,052  | 0,0264 | 0,0015 | 0,0028 |

Tabela A.VII – DIT usando 4 medidores

| Barra | Ordens Harmônicas |        |        |        |        |        |
|-------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 3h                | 5h     | 7h     | 9h     | 11h    | 13h    |
| 1     | 0,0152            | 0,0211 | 0,0042 | 0,0078 | 0,0059 | 0,0167 |
| 2     | 0,0295            | 0,0400 | 0,0075 | 0,0149 | 0,0112 | 0,0307 |
| 3     | 0,0456            | 0,0498 | 0,0025 | 0,0225 | 0,0142 | 0,0253 |
| 4     | 0,0589            | 0,0792 | 0,0160 | 0,0210 | 0,0132 | 0,0290 |
| 5     | 0,0499            | 0,0691 | 0,0151 | 0,0182 | 0,0128 | 0,0315 |
| 6     | 0,0608            | 0,0883 | 0,0272 | 0,0041 | 0,0044 | 0,0110 |
| 7     | 0,0783            | 0,1273 | 0,0515 | 0,0182 | 0,0016 | 0,0057 |
| 8     | 0,0686            | 0,1010 | 0,0318 | 0,0055 | 0,0035 | 0,0067 |
| 9     | 0,0891            | 0,1630 | 0,0835 | 0,0722 | 0,0126 | 0,0105 |
| 10    | 0,0914            | 0,1528 | 0,0701 | 0,0552 | 0,0062 | 0,0051 |
| 11    | 0,0814            | 0,1258 | 0,0471 | 0,0288 | 0,0009 | 0,0043 |
| 12    | 0,0660            | 0,0935 | 0,0278 | 0,0026 | 0,0049 | 0,0101 |
| 13    | 0,0677            | 0,0978 | 0,0308 | 0,0024 | 0,0042 | 0,0088 |
| 14    | 0,0869            | 0,1349 | 0,0520 | 0,0264 | 0,0015 | 0,0028 |

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dungan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, McGraw-Hill, pp. 167-171, 2004.
- [2] M. J. Ghorbani, H. Mokhtari, "Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol.5, No 1, pp. 166-174, 2015.
- [3] Agência Nacional de Engenharia Elétrica – ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional", versão vigente 01 de janeiro de 2017.
- [4] D. Soares, "Um Algoritmo Branch and Bound para o Problema de Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica em Rede de Transmissão", Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2007.
- [5] E. F. Arruda, N. Kagan, P. Ribeiro, "Harmonic Distortion State Estimation Using an Evolutionary Strategy", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, 2010.
- [6] W. N. Sepulchro, L. F. Encarnação, M. Brunoro, "Harmonic Distortion and Power Flow State Estimation for Distribution Systems Based on Evolutionary Strategies", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, 2015.
- [7] R. Storn, K. Price, "Differential evolution – a simple and efficient heuristic from global optimization over continuous space", *Journal of Global Optimization*, vol. 15, no. 4, 1997.
- [8] S. Das, A. Abraham, U. K. Chakraborty, A. Konar, "Differential Evolution Using a Neighborhood-Based Mutation Operator", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, pp. 526-553, 2009.
- [9] S. A. Soliman, A. H. Mantawy, "Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems" *Springer*, pp. 13-14, 2010.
- [10] R. Moraes, "Sincrofasores em sistemas de potência: aplicações na estimação de estado". Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2009.
- [11] S. Kodsí; C. Cañizres, "Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with facts controllers", Acedido em 04 de julho de 2016, em: <https://ece.uwaterloo.ca/~ccanizar/papers/IEEEBenchmarkTFreport.pdf>.