

X SEPOPE

21 a 25 de maio de 2006

May – 21st to 25th – 2006
FLORIANÓPOLIS (SC) – BRASIL

**X SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO
E EXPANSÃO ELÉTRICA**

**X SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL
AND EXPANSION PLANNING**

Estimação Harmônica Utilizando Algoritmos Evolutivos

E. F. Arruda, N. Kagan

Enerq – USP

Brasil

RESUMO

Este trabalho propõe a utilização de algoritmos da área de Sistemas Inteligentes, explicitamente Algoritmos Evolutivos (AE's) baseados em Estratégias Evolutivas, para estimação do estado harmônico de uma rede elétrica. Uma das vantagens da técnica utilizada frente a outras técnicas, por exemplo, os métodos de Monte Carlo e busca heurística, é a sua velocidade para encontrar uma solução dentro do espaço amostral de soluções. Além disso, é uma técnica de fácil implementação.

A Estimação Harmônica propriamente dita consiste em um tema de pesquisa amplamente estudado. A maioria das técnicas de solução discutidas na literatura visa a sincronização dos dados de medição, uma vez que buscam a solução do problema em tempo real. A metodologia proposta trata o problema de forma *offline*, podendo ser adaptada para tempo quase real. Neste caso, dados de medição de diversos pontos da rede seriam armazenados em um computador central que se responsabilizaria pela estimação do estado harmônico em outros pontos da rede. Tal meio de tratar o problema se deve ao fato da utilização das informações do fluxo de carga convencional para a correção das fases e sincronização dos dados de medição.

Para aferir, aplicou-se, inicialmente, a metodologia desenvolvida por este estudo a uma rede ilustrativa de pequena dimensão e em seguida aplicada a uma rede teste do IEEE de 14 barras com o intuito de verificar a potencialidade do algoritmo.

KEYWORDS

Qualidade de Energia

Distorção Harmônica

Estimação Harmônica

Algoritmos Evolutivos

E. F. Arruda, fone: +55 11 3091-9927, Endereço: Enerq-ct PEA/EPUSP, Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, trav. 4, 380, CEP 05508-020 – Cidade Universitária – São Paulo – SP

1. Introdução

O impacto de cargas com alto conteúdo harmônico tem sido alvo de grande atenção e discussão quando o assunto é a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Uma vez que correntes harmônicas injetadas por um consumidor degradam a qualidade do produto para outros consumidores da rede de energia elétrica, a monitoração deste fenômeno é essencial para a sua mitigação.

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

Sendo assim, torna-se necessária a utilização de algoritmo capaz de estimar, a partir de um pequeno número de pontos de monitoração, os valores das distorções harmônicas em demais pontos do sistema. Desta forma, o algoritmo de Estimção 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 de corrente harmônica a partir das respostas do sistema elétrico através de medições.

Um caminho para a busca da solução do problema de estimação dos níveis de distorção harmônica é através da técnica de busca exaustiva. Esta técnica consiste em discretizar os valores das correntes (módulo e ângulo) em valores pré-determinados e simular cada uma das combinações possíveis destes valores, comparando assim com os valores de medições disponíveis. No entanto, esta é uma solução que exige enorme esforço computacional, inviabilizando sua implementação para um sistema real em uma estação de trabalho tradicional, mesmo para redes elétricas pequenas.

Uma outra técnica utilizada para a estimação emprega o método estatístico de Monte Carlo, onde são simuladas, aleatoriamente, um grande número de possíveis soluções (valores de correntes injetadas), para então, utilizando um critério de avaliação adequado ao problema, optar pela melhor (ou melhores) solução (ou soluções) que atendam ao critério de avaliação. Ainda assim, o tempo computacional exigido é bastante significativo.

A utilização de algoritmos da área de Sistemas Inteligentes, como o proposto: Algoritmos Evolutivos, 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 supracitadas.

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, 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 [2] que apresenta um método para identificar fontes de sinais harmônicos no Sistema Elétrico de Potência (SEP). A referência [3] ilustra a importância da especificação das medições, bem como dos equipamentos utilizados no processo de estimação e a referência [4] apresenta um método de EEH onde foi utilizado GPS (*Global Positioning System*) para a sincronização dos dados de medição.

Desta forma 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.

2. Algoritmos Evolutivos

Os Algoritmos Evolutivos (AEs), como descrito em [5] foram originalmente concebidos por Lawrence J. Fogel em 1960 como estratégias de otimização estocástica similar aos Algoritmos Genéticos (AGs), mas que enfatizam o relacionamento comportamental entre progenitores e sua descendência, ao invés de tentar emular operadores genéticos específicos observados na natureza. Os AEs são também semelhantes ao campo que investiga Estratégias de Evolução (EE), apesar do desenvolvimento independente das duas abordagens. Assim como EEs e AGs, o AE é um excelente método de otimização quando outras técnicas não podem ser empregadas. Funções de otimização combinatórias e de valor real, nas quais a superfície de otimização (ou plano de adequação) é “enrugada”, possuindo diversas soluções que são ótimos locais, constituem o campo de ação por excelência do AE.

Para o AE, assim como para os AGs, há uma hipótese subjacente de que uma superfície de adequação pode ser caracterizada em termos de variáveis e que há uma solução ótima (ou múltiplas soluções ótimas) em termos dessas variáveis.

O método básico do AE envolve tipicamente três passos que devem ser repetidos até que um determinado número limite de iterações seja excedido ou que uma solução ótima seja obtida:

1. Uma população de possíveis soluções é escolhida aleatoriamente. O número de soluções na população é altamente relevante para a velocidade de otimização, mas não há meios de saber de antemão qual o número apropriado de soluções.
2. Cada solução é replicada em uma nova população. Cada uma das soluções descendentes é modificada de acordo com uma distribuição de tipos de mutação e recombinação. A severidade da mutação é julgada com base na modificação funcional imposta sobre os progenitores.
3. Cada solução descendente é avaliada pela computação de sua adequação. Tipicamente são empregados métodos estocásticos para determinar N soluções que serão mantidas na população de soluções, entretanto isso é ocasionalmente feito de modo determinístico. O tamanho da população não precisa necessariamente ser mantido constante, nem um número fixo de descendentes é determinado para cada progenitor.

Os processos de 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.

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

2.1. 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 σ . Sendo assim, cada porcentagem de módulo e variação de ângulo possui um passo de mutação associado.

O conhecimento prévio dos parâmetros do indivíduo pode ser incorporado ao problema através de restrições nos sorteios da população inicial ou penalização na avaliação. Desta forma, pode-se evitar que uma corrente harmônica de módulo superior à fundamental seja sorteada ou adquira boa pontuação na evolução da população.

2.2. Operador Mutação

Como descrito em [6], em Estratégias Evolutivas, a mutação tem um papel central no direcionamento da evolução de um único indivíduo. É através deste operador que um indivíduo se multiplica e, através de regras definidas (por exemplo: a escolha dos melhores indivíduos), busca-se aperfeiçoar a população.

O número de mutações é definido de forma a se controlar a evolução da população em cada geração. Sendo assim, cada indivíduo gera outros $n_mutacao$ indivíduos. As variações impostas por mutação são de pequeno passo em torno do indivíduo original. Desta forma, a cada geração, a população de indivíduos originais mais filhos caminham para uma configuração melhor através da escolha dos melhores indivíduos da população.

Matematicamente a mutação é descrita pela equação:

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

Onde:

x'_i → variação do parâmetro x de índice i

x_i → parâmetro x de índice i

σ → passo de mutação ou estratégia de evolução

$N_i(0,1)$ → valor sorteado com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1.

A equação (1) garante que cada variação do parâmetro otimizável seja de pequena dimensão e diretamente proporcional ao passo de mutação σ , resultando em variações distintas para cada locus do indivíduo, devido tanto ao sorteio como aos passos de mutação diferentes para cada parâmetro.

Como forma de melhorar os passos de mutação, foi introduzida auto-adaptação de um indivíduo como definida nas referências [6] e [7].

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:

σ'_i → variação do parâmetro σ de índice i

σ_i → passo de mutação

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

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

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

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

2.3. 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, são obtidos através da média aritmética dos parâmetros e dos passos dos indivíduos pais.

Matematicamente, uma forma de proceder à recombinação, consiste em obter a média para cada locus i dos indivíduos:

$$x_i(\text{indiv3}) = \frac{x_i(\text{indiv1}) + x_i(\text{indiv2})}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_i(\text{indiv3}) = \frac{\sigma_i(\text{indiv1}) + \sigma_i(\text{indiv2})}{2} \quad (5)$$

2.4. 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 das 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 Figura 2.1 abaixo ilustra o vetor diferença considerado na avaliação dos indivíduos.

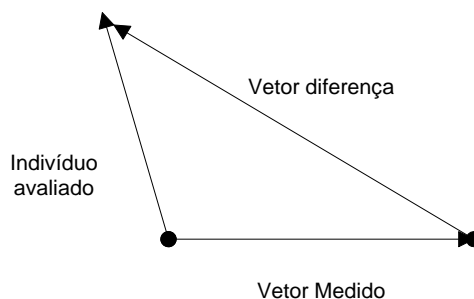


Figura 2.1 – Ilustração do vetor diferença utilizado na avaliação de um indivíduo.

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.

2.5. Seleção

No algoritmo evolutivo proposto a operação de seleção dos indivíduos para a formação de gerações futuras é determinística, pois se limita a selecionar os melhores indivíduos dentre o universo da população inicial somada aos filhos originados por mutação e recombinação.

Denominada $(\mu+\lambda)$, a metodologia de seleção adotada neste trabalho prevê que μ indivíduos pais gerem $\lambda > \mu$ indivíduos filhos. O conjunto união de indivíduos pais e indivíduos filhos é então utilizado, de tal forma que as gerações futuras, mantendo o número de indivíduos da população inicial, os indivíduos da população são necessariamente melhores que as gerações passadas, caracterizando o elitismo [8].

A Figura 2.2 apresenta o modelo de seleção adotado no algoritmo e descrito acima.

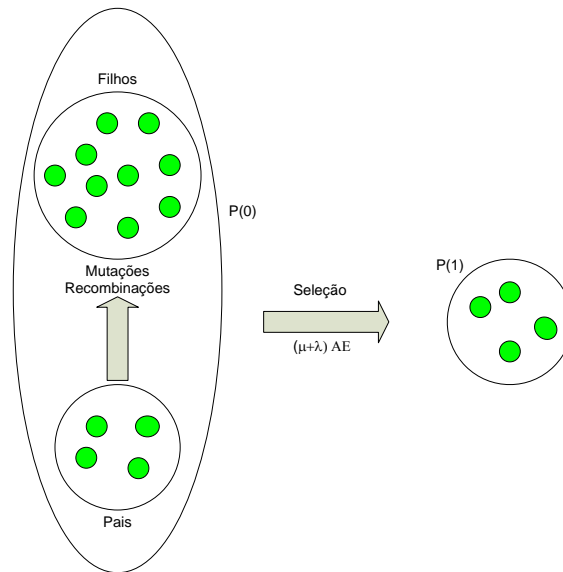


Figura 2.2 – Método de seleção $(\mu+\lambda)$.

3. Formulação do Problema de Estimação Harmônica

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 esse número de variáveis é o mesmo para todas as ordens harmônicas de interesse.

A metodologia proposta neste artigo baseia-se nas seguintes considerações:

1. Os valores das tensões e correntes provenientes do Fluxo de Potência convencional serão as referências de amplitude e ângulo das demais ordens harmônicas;
2. Serão, inicialmente, considerados somente os valores de tensão harmônica na avaliação, ou seja, os dados dos medidores a serem considerados serão os dados de tensão. Futuramente os dados de corrente poderão ser incorporados com facilidade no algoritmo de forma a melhorar o seu desempenho. Da mesma forma, dados relacionados aos tipos de cargas não lineares predominantes no sistema poderão ser incorporados como forma de melhorar os resultados na estimação;
3. O algoritmo evolutivo terá como indivíduo porcentagens dos módulos e variação dos ângulos em relação aos valores de corrente fundamental obtidas do Fluxo de Potência. A partir destas, serão calculados os valores de tensão avaliados segundo a proximidade dos valores de tensão harmônica medidos.

Com as considerações supracitadas, tem-se o fluxograma apresentado na Figura 3.1 que mostra esquematicamente o funcionamento do EEH proposto.

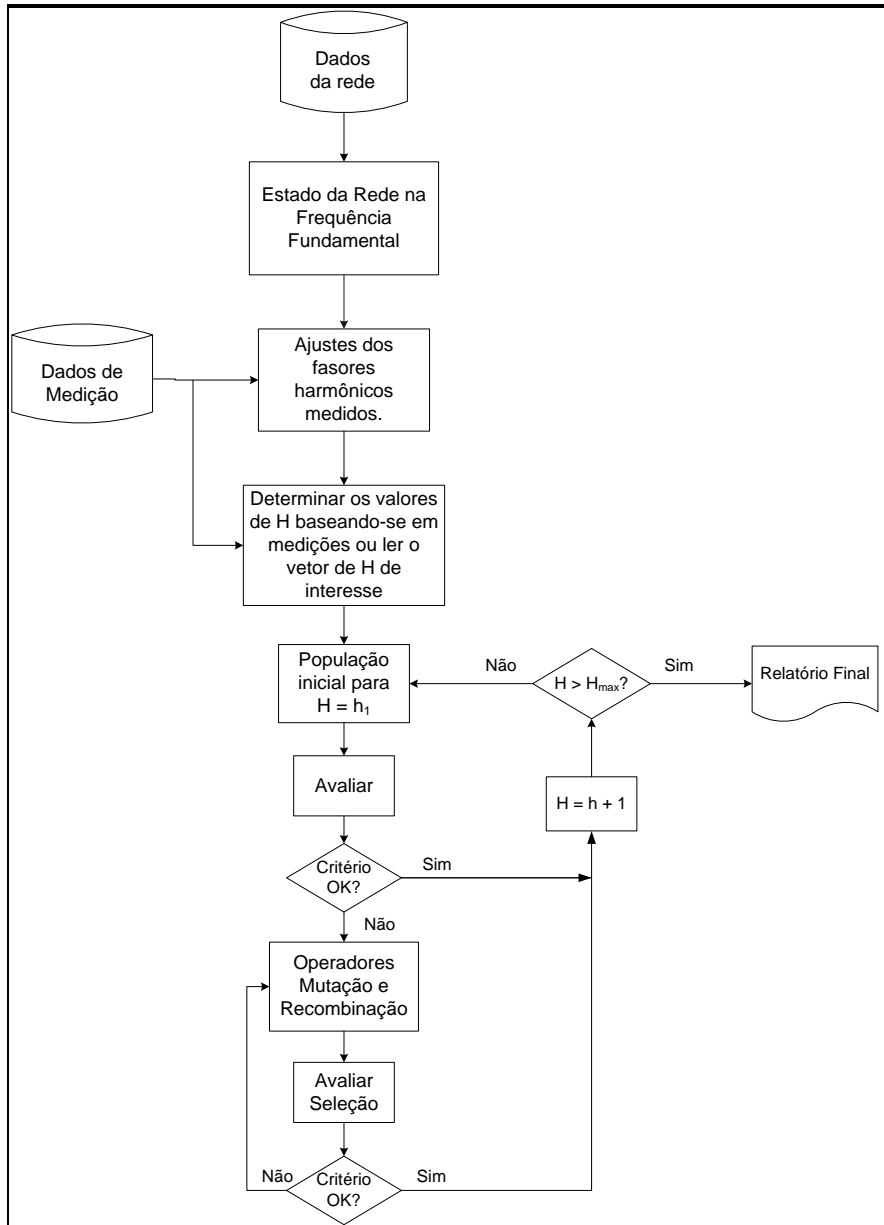


Figura 3.1 – Fluxograma esquemático de funcionamento do EEH proposto.

4. Resultados

Para aferir o algoritmo proposto foi utilizada, inicialmente, a rede elétrica de quatro barras apresentada na Figura 4.1. Foram consideradas cargas não lineares nas barras 3 e 4 do sistema e inicialmente dois medidores nas barras 3 e 4 para a avaliação, tendo-se a barra 2 como barra de interesse para estimação.

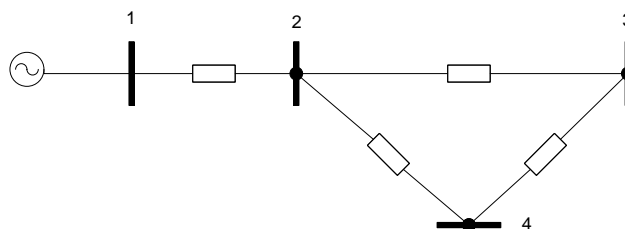


Figura 4.1 – Rede elétrica utilizada para testes.

A Tabela I apresenta os valores de tensão e corrente de referência consideradas para distorção harmônica de terceira ordem. Os valores de referência representam valores lidos dos medidores.

O indivíduo que deve ser encontrado pelo algoritmo evolutivo é apresentado na Tabela II. Os parâmetros k_3 e k_4 representam a porcentagem do módulo das correntes de 3ª harmônica em relação a fundamental e os parâmetros a_3 e a_4 representam as variações de ângulo de corrente, em radianos, em relação à fundamental. Desta forma, o algoritmo deverá “procurar” valores de seus parâmetros que resultam nas tensões medidas.

Tabela I – Valores de tensão e corrente de referência para a terceira harmônica.

Barra	Tensão Referência		Corrente Referência	
	Módulo pu	Ângulo (°)	Módulo pu	Ângulo (°)
2	0,1229	-64,57	0	0
3	0,2650	-63,10	0,0231	-140,70
4	0,2249	-69,47	0,0111	175,60

Tabela II – Parâmetros do indivíduo de referência.

k_3	a_3	k_4	a_4
0,2	1,3	0,12	0,55

O interesse na saída do algoritmo é o valor da tensão harmônica na barra 2 do sistema teste, que, dados valores preestabelecidos de correntes harmônicas nas barras 3 e 4 foi encontrado o valor 0,1229 pu para o módulo e $-64,57^\circ$ para o ângulo da tensão na barra de interesse. Assim, o algoritmo deverá encontrar o valor de tensão descrito para a barra 2 a partir dos valores de corrente obtidos através das populações de indivíduos que serão avaliados.

Considerando uma população inicial de 20 indivíduos, podendo cada indivíduo sofrer cinco mutações por geração e uma taxa de recombinação de 10 %, tem-se a Tabela III que apresenta os valores de módulo e ângulo das tensões encontradas para as barras 2, 3 e 4, bem como os valores dos erros encontrados para cada barra, considerando 100 gerações.

Tabela III – Resultados obtidos usando dois medidores e 100 gerações.

Barra	Módulo pu	Ângulo (°)	Erro (%)
2	0,1210	-63,91	0,24
3	0,2134	-66,48	5,34
4	0,2613	-65,01	4,10

Aumentando-se o número de gerações para 300 foram encontrados os valores apresentados na Tabela IV.

Tabela IV – Resultados obtidos usando dois medidores e 300 gerações.

Barra	Módulo pu	Ângulo (°)	Erro (%)
2	0,1200	-64,97	0,30
3	0,2313	-63,41	3,37
4	0,2431	-69,33	1,82

Pode-se observar que os valores obtidos ficaram mais próximos da referência com erros inferiores a 5%. Outras análises foram realizadas variando outros parâmetros do algoritmo (por exemplo: o número de mutações e a taxa de recombinação) e os resultados foram similares. Salienta-se que os valores obtidos como resultados podem variar de simulação para simulação por se tratar de um método de busca estatística, no entanto os erros não superaram 5% em nenhuma simulação realizada.

Para verificar a robustez da metodologia proposta, valeu-se da rede elétrica apresentada na Figura 4.2. Esta rede possui 14 barras e os dados de linha e barra foram extraídos do sítio do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineering*) apresentado na referência [9]. Foi considerada, nas simulações, a componente harmônica de terceira ordem para ser estimada. Injeções de correntes harmônicas foram especificadas simulando as saídas dos medidores instalados.

Foram selecionados dois casos a serem apresentados, que são:

1. alocação de seis medidores na rede e estimação da tensão nos oito pontos restantes e;
2. alocação de oito medidores na rede e estimação nos seis pontos restantes.

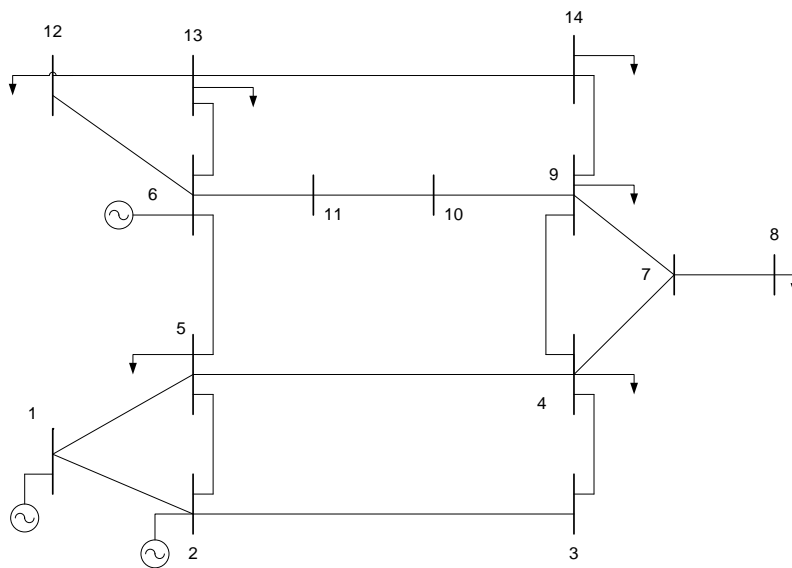


Figura 4.2 – Rede elétrica com 14 barras utilizada para análise.

Tabela V – Resultados obtidos utilizando-se 6 e 8 medidores na rede de 14 barras.

Barra	Valores Estimados				Erro (%) 6 medidores	Erro (%) 8 medidores	Valores de Referência	
	6 medidores		8 medidores				Módulo p.u.	Ângulo (°)
	Módulo p.u.	Ângulo (°)	Módulo p.u.	Ângulo (°)				
1	0,1311	113,57	0,1476	108,00	2,80	1,07	0,1574	109,68
2	0,1286	113,66	0,1465	107,75	2,92	1,09	0,1561	109,73
3	0,1275	114,03	0,1422	108,70	2,88	1,25	0,1543	109,81
4	0,1188	114,89	0,1300	110,22	2,67	1,35	0,1434	110,39
5	0,1214	113,63	0,1323	109,93	2,60	1,37	0,1460	110,04
6	0,1149	102,83	0,1063	111,02	1,87	0,93	0,1154	112,14
7	0,1073	118,98	0,1090	113,52	1,65	1,40	0,1223	115,61
8	0,1084	120,83	0,1106	115,16	1,22	1,25	0,1201	119,15
9	0,1008	120,28	0,0971	114,67	1,39	1,64	0,1131	116,75
10	0,0990	119,67	0,0971	114,73	1,25	1,26	0,1095	115,92
11	0,1040	111,24	0,0994	114,52	0,91	1,06	0,1100	114,87
12	0,1058	107,11	0,0960	113,23	1,07	1,25	0,1085	112,64
13	0,1016	110,62	0,0948	112,39	0,68	1,23	0,1070	112,93
14	0,0871	122,96	0,0829	113,55	1,80	1,71	0,0998	115,12

Para a primeira análise os medidores foram alocados aleatoriamente nas barras de números: 3, 5, 6, 8, 9 e 14 e para a segunda análise foram alocados nas barras 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13 e 14.

A Tabela V apresenta os resultados obtidos para as duas situações analisadas, considerando-se 40 indivíduos na população inicial e 300 gerações de simulação.

Os resultados apresentados ilustram a robustez da metodologia proposta onde os erros de estimação foram inferiores a 3% em ambos os casos. Comparando os valores estimados com os valores de referência pode-se verificar que as diferenças de módulo são inferiores a 0,03 p.u. e as diferenças em ângulo são inferiores a 4°.

Considerando-se 1000 gerações de evolução da população e 40 indivíduos na população inicial, as discrepâncias dos valores estimados em relação aos valores de referência foram ainda menores, como pode ser observado na Tabela VI que apresenta os resultados da simulação considerando 8 medidores alocados.

Tabela VI – Resultados obtidos utilizando-se 8 medidores na rede de 14 barras com 1000 gerações.

Barra	Valores Estimados		Erro (%) 8 medidores	Valores de Referência	
	8 medidores			Módulo p.u.	Ângulo (°)
	Módulo p.u.	Ângulo (°)			
1	0,1561	109,95	0,15	0,1574	109,68
2	0,1551	109,63	0,10	0,1561	109,73
3	0,1492	109,96	0,51	0,1543	109,81
4	0,1352	110,90	0,84	0,1434	110,39
5	0,1382	110,97	0,81	0,1460	110,04
6	0,1156	109,26	0,58	0,1154	112,14
7	0,1181	116,47	0,46	0,1223	115,61
8	0,1232	121,10	0,52	0,1201	119,15
9	0,1065	116,84	0,65	0,1131	116,75
10	0,1028	117,63	0,74	0,1095	115,92
11	0,1066	112,63	0,54	0,1100	114,87
12	0,1048	111,16	0,47	0,1085	112,64
13	0,1028	112,94	0,42	0,1070	112,93
14	0,0883	113,43	1,19	0,0998	115,12

5. Conclusões

Foi apresentada neste artigo uma metodologia promissora para determinar o estado de uma rede elétrica quanto às distorções harmônicas.

A metodologia apresentada utiliza as saídas do fluxo de carga como referências para ajustar os fasores harmônicos medidos, sincronizando assim as medições nos diversos pontos da rede.

O método de busca utilizado para encontrar prováveis soluções para o problema baseou-se em Estratégias Evolutivas, explicitamente Algoritmos Evolutivos.

Os resultados mostraram a potencialidade do algoritmo apresentando erros percentuais inferiores a 5% nas redes estudadas.

Espera-se que, com a incorporação de outras informações da rede (por exemplo, informações de correntes medidas juntamente com os valores de tensões medidas na avaliação), ainda melhores resultados possam ser alcançados.

6. Agradecimentos

A CAPES pelo suporte financeiro, ao Enerq – Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia da Escola Politécnica da USP, aos colegas de trabalho pelos auxílios técnicos e à Érika pelas correções, sugestões e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Arrillaga, N. R. Watson, S Chen, Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, 2000, p. 300.
- [2] G. T. Heydt, “Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, No. 1, January 1989, pp. 569-576.
- [3] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, S. Zelingher, “Hardware and Software Requirements for a Transmission System Harmonic Measurement System”, Harmonics in Power Systems, ICHPSV, Sept. 22-25, 1992, pp. 330-338.
- [4] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, S. Zelingher, “Power System Harmonic State Estimation”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1701-1709.
- [5] T. Back, U. Hammel, H. Schwefel, “Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State”, IEEE Trans. On Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 1, April 1997, pp. 3-17.
- [6] T. Back, H. Schwefel, “Evolutionary Computation: An Overview”, Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996, pp. 20-29.
- [7] H. P. Schwefel, “Numerical optimization of Computer Models”, Chichester: John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1981.
- [8] F. Hage, “Desenvolvimento e Aplicação de um Algoritmo Evolutivo para a Otimização de Unidades de Geração Distribuída em Redes de Distribuição de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- [9] Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation, Task Force on Harmonics Modelling and Simulation, IEEE Power Engineering Society <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/simulate/download.htm>.