

## Estudo Comparativo de Estimação de Estado Harmônico e Fluxo de Potência: Estratégias Evolutivas versus Algoritmo Jaya<sup>\*</sup>

Walace do Nascimento Sepulchro<sup>\*</sup> Lucas Frizzera Encarnacao<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: walace.sepulchro@gmail.com).

<sup>\*\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: lucas.encarnacao@ufes.br).

---

**Abstract:** The increasing use of nonlinear loads in distribution networks directly impacts the levels of harmonic distortion in electrical systems. Concurrently, the high cost of power quality meters presents challenges in identifying and reducing sources of harmonic pollution. In this context, a new approach is proposed to estimate the harmonic state and power flow, based on the Jaya algorithm, known for its simplicity of adjustment. This methodology is implemented and applied to the IEEE 14-bus system, and the results are compared with those obtained by the methodology based on the Evolutionary Strategies algorithm, which has the disadvantage of requiring a series of parameters. The simulation results using Jaya algorithm has a lower average error and computational effort using fewer input parameters when compared to the Evolutionary Strategies algorithm.

**Resumo:** O crescente uso de cargas não lineares nas redes de distribuição impacta diretamente os níveis de distorção harmônica nos sistemas elétricos. Paralelamente, o alto custo dos medidores de qualidade de energia apresenta desafios na identificação e redução das fontes de poluição harmônica. Nesse contexto, uma nova abordagem é proposta para estimar o estado harmônico e o fluxo de potência, baseada no algoritmo Jaya, conhecido por sua simplicidade de ajuste. Essa metodologia é implementada e aplicada à rede IEEE 14-bus, e os resultados são comparados com aqueles obtidos pela metodologia baseada no algoritmo de Estratégias Evolutivas (EE), que possui como desvantagem uma série de parâmetros. Os resultados da simulação utilizando o algoritmo Jaya têm um erro médio menor e exigem menos esforço computacional, utilizando menos parâmetros de entrada quando comparados com o algoritmo de EE.

**Keywords:** harmonic state estimation; power quality; power flow; evolutionary Strategies; Jaya algorithm.

**Palavras-chaves:** estimação do estado harmônico; qualidade de energia; fluxo de potência; estratégias evolutivas; algoritmo Jaya.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas em sistemas elétricos de potência que tem recebido atenção nas últimas décadas é o nível de distorção harmônica em redes de distribuição, devido à proliferação de conversores de energia e outras cargas não lineares, que degradam as formas de onda de tensão e corrente, trazendo, por exemplo, impactos negativos à operação, desempenho e vida útil dos equipamentos (Jain and Singh, 2011). Diante dessa realidade, um desafio significativo é localizar as fontes de harmônicos, visto que o alto custo dos medidores de qualidade de energia impede que todas as barras dentro de uma rede de distribuição sejam equipadas com dispositivos de medição. Além disso, outro desafio importante é distribuir os medidores de qualidade de energia de tal modo que eles sejam instalados

somente em barras onde há injeção de harmônicas, tendo em vista que esta informação ainda não é conhecida. (Sepulchro et al., 2015).

A elevação dos níveis de distorção harmônica devido ao uso de cargas não lineares e os desafios associados à medição dos níveis harmônicos nas redes elétricas impulsionaram o desenvolvimento de técnicas de Estimação de Estado Harmônico (EEH), com o objetivo de identificar as fontes de poluição harmônica na rede.

O início da modelagem e aplicação de métodos para EEH foi documentado na década de 1980, utilizando o método dos mínimos quadrados para calcular o espectro de injeção harmônica em barras suspeitas de serem fontes de sinais harmônicos (Schweppe et al., 1970). A abordagem de EEH evoluiu para o uso do método dos mínimos quadrados ponderados em conjunto com técnicas de programação não linear (Heydt, 1989). Com o intuito de minimizar o erro quadrático esperado entre os valores estimados e os valores reais do sistema, a metodologia do filtro de Kalman foi

---

<sup>\*</sup> Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (404857/2023-0 e 311848/2021-4) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo - FAPES (1024/2022).

introduzida (Beides and Heydt, 1991). Além disso, outras técnicas modernas foram aplicadas à EEH. Por exemplo, foi apresentado um algoritmo baseado em técnicas de redes neurais (Hartana and Richards, 1990), partindo do pressuposto de que uma rede neural poderia ser treinada para determinar o comportamento de uma fonte harmônica em um sistema elétrico de potência. Em Arruda et al. (2010), EE foram utilizadas como base para desenvolver um algoritmo de estimação do estado harmônico para identificar as fontes de harmônicos. Adicionalmente, em Sepulchro et al. (2015), além da estimação do estado harmônico, foi introduzido um algoritmo baseado em EE para a estimação do estado da frequência fundamental da rede.

Em 2018, uma abordagem utilizando a metodologia Jaya, denominada Jaya quase-oposicional modificada (QOM-Jaya), foi aplicada com sucesso ao fluxo de potência de frequência fundamental num sistema de potência, demonstrando desempenho superior em comparação com outras técnicas conhecidas, abrindo caminho para sua aplicação potencial em EEH (Rao and Saroj, 2017).

Em 2021, Santos et al. (2021) propuseram um algoritmo híbrido para estimação de estado harmônico em um SEP a partir de um número reduzido de medidores. Eles usaram a estratégia chamada "HA", que combina os algoritmos EE com o SADE, um tipo de algoritmo de Evolução Diferencial modificado. O objetivo é combinar a alta velocidade de convergência de EE com a excelente acurácia esperada de SADE. A técnica foi aplicada aos sistemas IEEE 14-bus e IEEE 57-bus, e os resultados obtidos foram satisfatórios; entretanto, a técnica enfrenta desafios devido à quantidade de parâmetros envolvidos na combinação dos dois algoritmos.

De modo geral, apesar de obter bons resultados, a metodologia baseada em EE requer a afinação de uma série de parâmetros, o que representa um desafio para sistemas de energia maiores. Por outro lado, o algoritmo Jaya possui poucos parâmetros para ajustar (Rao, 2016), o que poderia simplificar a obtenção de bons resultados para sistemas maiores e potencialmente reduzir os custos de processamento. Assim, o presente estudo propõe uma metodologia de EEH baseada no algoritmo Jaya, que também será aplicada para estimar o fluxo de potência na rede IEEE 14-bus num cenário com diversas fontes harmônicas. Os resultados serão comparados com aqueles obtidos para a rede sob as mesmas condições usando a metodologia baseada em EE, conforme apresentado em Sepulchro et al. (2015). O objetivo desta comparação é avaliar o esforço computacional e a eficácia dessas duas metodologias para avaliar comparativamente a eficácia do algoritmo Jaya na EEH e do fluxo de potência.

## 2. ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS

As Estratégias Evolutivas (EE) constituem uma técnica de otimização inspirada em princípios evolutivos. Desenvolvidas por Rechenberg e Schwefel na década de 1990 Back and Schwefel (1996), essa abordagem envolve uma população de indivíduos, onde cada um representa uma solução potencial para o problema em questão. Os indivíduos da população geram novos descendentes através de mutações genéticas, que modificam suas informações que os constituem. Além disso, podem também produzir novos

indivíduos mediante o intercâmbio de informações em um processo conhecido como recombinação. A qualidade de cada solução é avaliada por meio de sua aptidão, que corresponde à proximidade da solução em relação ao ótimo desejado. Ao final de cada geração, um processo de seleção é realizado, no qual os indivíduos mais aptos, aqueles com maior aptidão, são escolhidos para compor a próxima geração. Esse ciclo de mutação, recombinação e seleção continua até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Neste algoritmo,  $P(t)$  representa uma população composta por  $\mu$  indivíduos. O conjunto  $P'(t)$ , de tamanho  $\lambda$ , consiste em indivíduos gerados a partir da recombinação e mutação de  $P(t)$ . A função  $Q(t)$ , derivada de  $P(t)$ , pode ser nula ou igual a  $P(t)$ . Durante a avaliação dos indivíduos, cada um recebe uma pontuação baseada em sua proximidade com a solução ótima do problema. Em seguida, ocorre a seleção dos indivíduos mais aptos, que formarão a população inicial da próxima geração. Esse processo se repete até que uma condição de parada seja alcançada, que pode ser um número máximo de gerações ou a presença de pelo menos um indivíduo que represente uma solução aceitável para o problema. O fluxograma básico do algoritmo de Estratégias Evolutivas (EE) é apresentado na Figura 1.

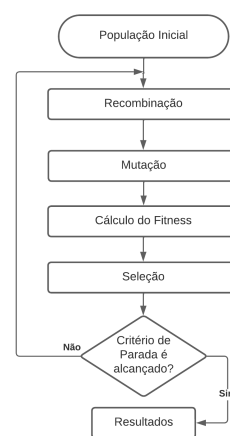


Figura 1. Fluxograma do algoritmo EE.

## 3. ALGORITMO JAYA

### 3.1 Considera es Iniciais

Apresentado por Rao (2016), o Jaya   um algoritmo de otimiza o baseado em conceitos de melhoria cont nua, onde as solu es candidatas tendem a se aproximar da solu o ideal ou  tima e, simultaneamente, se afastar da pior solu o. Diferente das EE, o Jaya possui poucos par metros, podendo ter apenas dois par metros b sicos de ajuste, nomeadamente, o tamanho da popula o e o crit rio de parada, e apenas um, como no caso da variante chamada Jaya Baseado em M ltiplas Popula es Autoadaptativo (SAMP-Jaya) (Rao and Saroj, 2017)

### 3.2 Equa o e Fluxograma

A equa o a seguir rege a cria o de novas solu es candidatas ao longo das itera es, considerando as melhores e piores solu es encontradas at  o momento (Rao, 2016):

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + [r1_{j,i}(X_{j,melhor,i} - |X_{j,k,i}|) - r2_{j,i}(X_{j,pior,i} - |X_{j,k,i}|)], \quad (1)$$

onde  $X_{j,k,i}$  é o valor da  $j$ -ésima variável para o  $k$ -ésimo candidato durante a  $i$ -ésima iteração e  $r1_{j,i}$  e  $r2_{j,i}$  são pesos gerados aleatoriamente em uma distribuição uniforme no intervalo  $[0, 1]$ . A nova solução gerada correspondente a  $X'_{j,k,i}$  é descartada se sua aptidão for pior do que a correspondente ao  $X_{j,k,i}$  original. O fluxograma do algoritmo Jaya é mostrado na Figura 2.

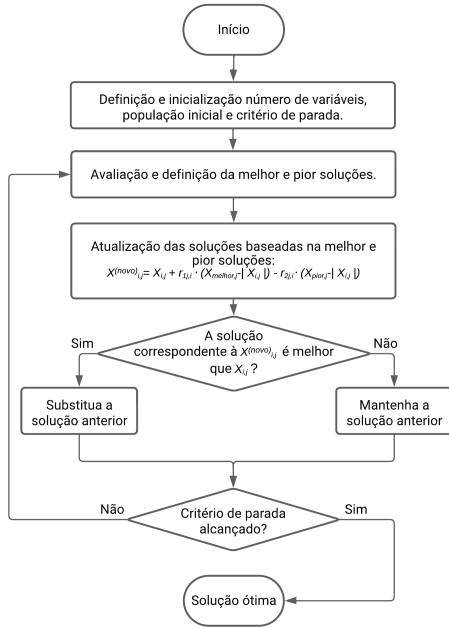


Figura 2. Fluxograma do algoritmo Jaya.

#### 4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

##### 4.1 Esquema Geral

Primeiramente, pressupõe-se que apenas algumas barras da rede em análise estão equipadas com medidores de qualidade de energia. Portanto, o objetivo é estimar os componentes, tanto em frequências fundamentais quanto harmônicas, das tensões nas barras não contempladas com medição. A metodologia proposta é ilustrada pelo diagrama de fluxo da Figura 3. A partir dos resultados alcançados, uma vez que os valores medidos e estimados abrangem todas as barras do sistema, a Distorsão Harmônica Total de Tensão (DTT) é calculada.

##### 4.2 Alocação dos Medidores

O passo inicial e essencial numa metodologia de EEH consiste determinar a quantidade mínima e a localização das barras que precisam ser monitoradas para garantir a observabilidade da rede. Um dos critérios adotados para selecionar os pontos de medição envolve o número de segmentos de linha conectados a cada barra, de tal forma que as barras com maior número de conexões são priorizadas no processo de seleção para inclusão de medição. Além disso, é importante evitar escolher barras adjacentes. Isso se baseia na premissa de que é possível estimar as tensões nas barras vizinhas àquela que já possui uma medição, minimizando assim o número total de medidores de qualidade de energia necessários.

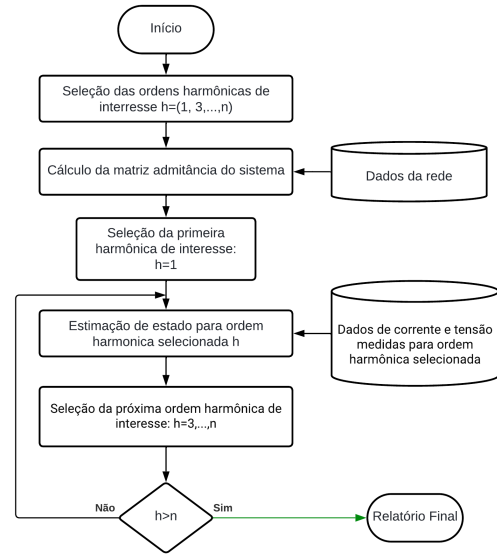


Figura 3. Fluxograma da metodologia proposta.

Para efetivamente fazer essa seleção, foi desenvolvida uma estratégia baseada no fluxograma da Figura 4, que mapeia todas as barras, o número de segmentos de linha que partem delas e as barras com as quais se conectam, listando as barras em ordem decrescente pelo número de ramificações.

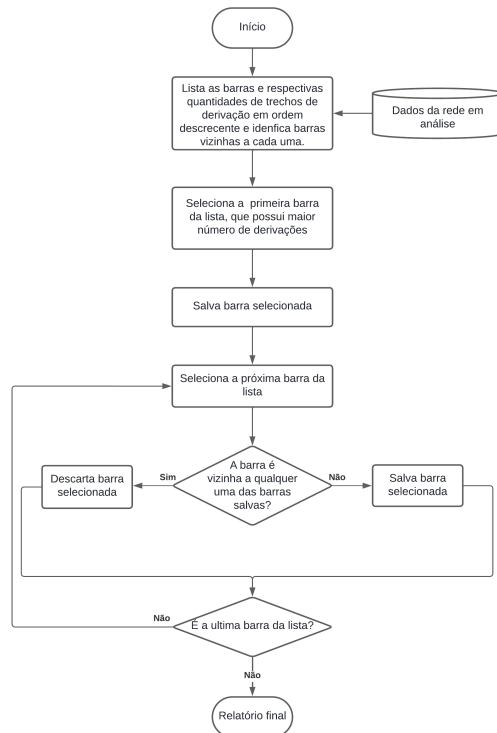


Figura 4. Diagrama da estratégia adotada para alocação dos medidores.

O resultado desse mapeamento para a rede IEEE 14-bus resulta na Tabela 1, e a estratégia adotada indicou a necessidade de monitoramento de 6 barras, especificamente as barras 1, 4, 6, 8, 10 e 14.

#### 4.3 Valores de Referência

Os dados de referência são obtidos a partir de medidores de qualidade de energia instalados nas barras selecionadas, fornecendo os valores de módulo e fase das tensões e correntes em frequências fundamentais e harmônicas especificadas.

#### 4.4 Ordens Harmônicas de Interesse

A seleção das ordens harmônicas de interesse é baseada na disponibilidade de medidores de qualidade de energia ou nos objetivos do estudo. No caso presente, o foco está em analisar os harmônicos mais prevalentes em redes de distribuição, especificamente, as ordens harmônicas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 (Francisco, 2017), assim como a DTT, definida por (2) em (Arrillaga and Watson, 2003).

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (2)$$

#### 4.5 Estimação de Estado para Ordem Harmônica

Após a seleção das ordens harmônicas de interesse, o algoritmo de estimação de estado harmônico é aplicado à frequência fundamental e a cada ordem harmônica de forma independente, que é baseado em EE ou Jaya. Além das ordens harmônicas, os dados de entrada incluem os valores das tensões e correntes medidas, bem como a matriz de admitância da rede. A execução do algoritmo para cada harmônica de interesse produz um relatório final com todos os valores estimados de tensão.

#### 4.6 Representação do Indivíduo

No contexto de EE, a consideração de passos de mutação, alinhados com as magnitudes e fases das tensões, é imperativa. Como exemplo ilustrativo, a representação de um indivíduo para a rede IEEE de 14 barras é feita conforme (3), em que a medição ocorre somente nas barras 1, 4, 6, 8, 10 e 14. A primeira e a terceira colunas representam as magnitudes e fases da tensão em cada barra e ordem harmônica  $h$ , enquanto a segunda e a quarta colunas significam os passos de mutação. No entanto, na segunda e quarta colunas são inexistentes no algoritmo

Tabela 1. Lista de barras, conexões e barras adjacentes para a rede IEEE 14-bus.

Barra	Número de conexões	Barras adjacentes
4	5	2, 3, 5, 7, 9
2	4	1, 3, 4, 5
5	4	1, 2, 4, 6
6	4	5, 11, 12, 13
9	4	4, 7, 10, 14
7	3	4, 8, 9
13	3	6, 12, 14
1	2	2, 5
3	2	2, 4
10	2	9, 11
11	2	6, 10
12	2	6, 13
14	2	9, 13
8	1	7

Jaya, limitando-se a representação de um indivíduo apenas às colunas de magnitude e fase da tensão em cada barra.

$$Individual_h = \begin{bmatrix} V_h^2 & \sigma_{V,h}^2 & \theta_h^2 & \sigma_{\theta,h}^2 \\ V_h^3 & \sigma_{V,h}^3 & \theta_h^3 & \sigma_{\theta,h}^3 \\ V_h^5 & \sigma_{V,h}^5 & \theta_h^5 & \sigma_{\theta,h}^5 \\ V_h^7 & \sigma_{V,h}^7 & \theta_h^7 & \sigma_{\theta,h}^7 \\ V_h^9 & \sigma_{V,h}^9 & \theta_h^9 & \sigma_{\theta,h}^9 \\ V_h^{11} & \sigma_{V,h}^{11} & \theta_h^{11} & \sigma_{\theta,h}^{11} \\ V_h^{12} & \sigma_{V,h}^{12} & \theta_h^{12} & \sigma_{\theta,h}^{12} \\ V_h^{13} & \sigma_{V,h}^{13} & \theta_h^{13} & \sigma_{\theta,h}^{13} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

onde  $V_h^i$  representa a tensão absoluta na barra  $i$ , na ordem harmônica  $h$ ;  $\theta_h^i$  indica a fase da tensão na barra  $i$ , na ordem harmônica  $h$ ;  $\sigma_{V,h}^i$  é o passo de mutação para o parâmetro  $v$ , na barra  $i$ , na ordem harmônica  $h$  (não aplicável ao algoritmo Jaya) e  $\sigma_{\theta,h}^i$  é o passo de mutação para o parâmetro  $\theta$ , na barra  $i$ , na ordem harmônica  $h$  (não aplicável ao algoritmo Jaya).

#### 4.7 Avaliação

O objetivo da avaliação é atribuir uma nota a cada indivíduo, medindo sua distância ou erro em relação aos valores de referência. Cada indivíduo representa uma solução potencial para o problema. Assim, para cada ordem harmônica  $h$  sob análise, o vetor de tensão de cada indivíduo e a matriz de admitância da rede resultam em um vetor de corrente estimado ( $\tilde{I}_h^i$ ), conforme apresentado por:

$$I_h^i = \sum_{j=1}^{nb} Y_h^{ij} V_h^j, \quad (4)$$

onde  $V_h^j$  é o valor da tensão na barra  $j$ , ordem harmônica  $h$ ;  $Y_h^{ij}$  é o elemento  $(ij)$  da matriz de admitância na frequência correspondente à ordem harmônica  $h$  e  $nb$  é o número de barras monitoradas.

Ao calcular a diferença entre este vetor e o vetor de corrente medido ( $\tilde{I}_{hM}^i$ ), obtém-se o vetor de erro ( $ee_h^i$ ), como mostrado por:

$$ee_h^i = |I_h^i - \tilde{I}_{hM}^i|, \quad (5)$$

onde  $ee_h^i$  é o erro de estimação na barra  $i$ , ordem harmônica  $h$ ;  $I_h^i$  é a corrente calculada na barra  $i$  a partir de um indivíduo que representa as tensões nas barras para ordens harmônicas selecionadas e  $\tilde{I}_{hM}^i$  é a corrente medida, ordem harmônica  $h$  na barra  $i$ .

Uma vez que os erros são calculados para todas as barras monitoradas, a aptidão de cada indivíduo para a ordem harmônica em análise é determinada pelo inverso da soma dos quadrados do vetor de erro, conforme definido por (6).

$$Nota_h = \frac{1}{\sum_{i=1}^{nb} (ee_h^i)^2}, \quad (6)$$

onde  $Nota_h$  é a nota do indivíduo na ordem harmônica  $h$ .

#### 4.8 Seleção

No caso da metodologia de EE, a seleção é determinística, garantindo que apenas os indivíduos mais aptos, ou seja, aqueles com a maior nota, sejam escolhidos enquanto se mantém um tamanho de população constante de geração

para geração. A seleção inclui tanto pais quanto descendentes para permitir o elitismo, assegurando que os melhores indivíduos pais sejam preservados ao longo das gerações.

Por outro lado, na metodologia do algoritmo Jaya, como ilustrado na Figura 2, a seleção ocorre automaticamente durante o processo de geração dos indivíduos a partir de (1). Cada indivíduo gera um novo que o substitui na população se a sua nota for maior do que a do indivíduo que o originou; caso contrário, o indivíduo gerado é descartado. Além disso, os melhores e piores indivíduos são aqueles que, respectivamente, mantêm os valores mais altos e mais baixos de nota ao longo das iterações.

## 5. APLICAÇÃO

### 5.1 Considerações Iniciais

A Figura 5 mostra a rede IEEE 14-bus adaptada (Gonzalez-Longatt, 2024), cujos dados foram retirados de PSTCA (2024), com a indicação das barras contempladas com medidores de qualidade de energia: as barras 1, 4, 6, 8, 10 e 14.

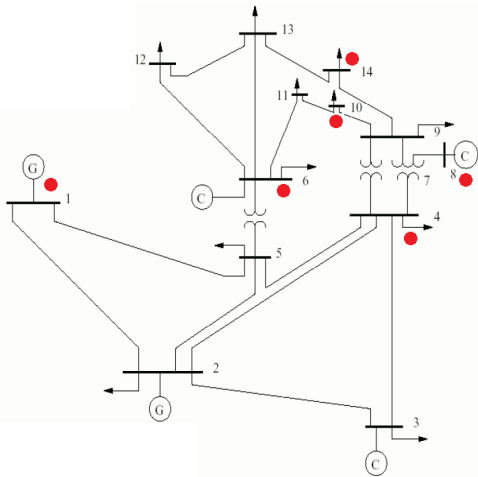


Figura 5. Rede IEEE 14-bus com a indicação das barras monitoradas.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros considerados no algoritmo de EE.

Tabela 2. Parâmetros considerados no algoritmo de EE.

Parâmetro	Valor
Número máximo de gerações	2000
Número de indivíduos da população inicial	40
Operações de mutação por indivíduo	5
Taxa de recombinação	10%
Passo de mutação inicial para magnitudes de tensão	1
Passo de mutação inicial para fase de tensão	$2\pi/3$
Parâmetro de auto-adaptação $\beta$	5

Contrastando com os numerosos parâmetros necessários ao algoritmo EE, para o algoritmo Jaya há apenas dois parâmetros a ajustar: o número máximo de gerações e o número de indivíduos da população inicial. Neste estudo, esses parâmetros foram definidos como 2000 e 50, respectivamente.

### 5.2 Resultados da simulação

O fluxo de potência na frequência fundamental e o estado harmônico para a rede IEEE 14-bus, incluindo os valores das ordens harmônicas de corrente e tensão de interesse, foram obtidos a partir do software PSCAD X4. A análise envolveu a injeção de componentes harmônicas de corrente de ordens 3, 5, 7, 9, 11 e 13 em barras escolhidas de acordo com a estratégia de alocação apresentada. Tais ordens harmônicas foram escolhidas neste estudo por serem as mais significativas em redes de distribuição de energia. As metodologias de EE e Jaya incorporam os valores tensão e corrente nas barras medidas como dados de entrada. No entanto, os valores de corrente referentes a outras barras são empregadas para calcular erros de estimação e as notas individuais, objetivando, por fim, encontrar os valores de tensão estimados.

Todos códigos para a metodologia proposta foram desenvolvidos num computador com processador Intel Core I5 1035G1, memória RAM DDR4 de 32 GB, placa de vídeo NVIDIA GeForce MX330 e armazenamento de 1 TB HDD e 256 GB SSD, usando a linguagem de programação Python no software JupyterLab, incorporando rotinas para calcular a matriz de admitância para cada ordem harmônica, ler valores de referência e realizar a estimação de estado usando tanto EE quanto o algoritmo Jaya. O algoritmo realiza a estimação de magnitude e de fase para as tensões harmônicas em cada frequência harmônica selecionada, culminando na geração de um relatório final com todos os valores estimados, conforme ilustrado na Figura 3. Para demonstrar que os erros de estimação de tensão são consistentemente mantidos dentro de uma faixa de valores mínimos para cada ordem harmônica, o processo de estimação foi repetido 30 vezes. Conseqüentemente, os erros médios entre os valores de amplitude de referência e estimados são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Destaca-se que as barras monitoradas são excluídas do cálculo de erros de estimação e de DTT, uma vez que as tensões não são estimadas para aquelas barras.

Tabela 3. Erro absoluto de estimação (p.u.) para a metodologia EE.

Barra	Ordem Harmônica						
	1	3	5	7	9	11	13
2	0,012	0,009	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
3	0,029	0,007	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,063	0,007	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001
7	0,019	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000	0,002
9	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
11	0,024	0,001	0,002	0,001	0,003	0,000	0,001
12	0,021	0,007	0,004	0,007	0,009	0,001	0,001
13	0,018	0,006	0,002	0,002	0,000	0,000	0,001

Observa-se que, em ambas as metodologias empregadas, os erros obtidos são predominantemente pequenos e inferiores a 0,063 para EE p.u. e 0,034 p.u. para Jaya, o que demonstra a eficácia de ambas as técnicas tanto para a estimação do fluxo de potência quanto do estado harmônico. Para algumas componentes harmônicas, devido às pequenas ordens de grandezas envolvidas, os erros absolutos podem refletir em erros relativos consideráveis, de modo que o algoritmo não pode estimar adequadamente. Nesses casos, como componentes de valores de tensão negligenciáveis

Tabela 4. Erro absoluto de estimação (p.u.) para a metodologia Jaya.

Barra	Ordem Harmônica						
	1	3	5	7	9	11	13
2	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,034	0,002	0,001	0,002	0,006	0,000	0,000
5	0,005	0,004	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000
7	0,020	0,005	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
9	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,002	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000
12	0,010	0,005	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000
13	0,004	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000

têm pouca influência no cálculo do DTT, é possível desconsiderar seus erros de estimação.

Utilizando as estimativas e medições obtidas das tensões harmônicas e fundamentais, a DTT pode ser determinada para cada barra da rede. Os valores calculados para ambas as metodologias adotadas são apresentados nas Tabelas 5 e 6. Observa-se que, pequenos erros foram obtidos em todos os casos. Adicionalmente, observa-se que o erro médio alcançado com o algoritmo Jaya é inferior ao obtido com EE. O erro médio alcançado com o algoritmo Jaya foi de 0,134% enquanto o erro médio com EE foi de 0,255%.

A Tabela 7 exhibe o tempo médio de convergência para a estimativa de tensão na frequência fundamental e nas frequências harmônicas de interesse durante as 30 execuções do código EEH proposto usando EE e Jaya. Observa-se que o algoritmo Jaya alcançou resultados igualmente satisfatórios em EEH a partir dos mesmos dados de entrada e exibiu um tempo de processamento menor. Nestes casos, o algoritmo Jaya conseguiu reduzir o tempo de processamento em  $(575s - 282s)/575s = 50,95\%$ .

A eficiência em convergir rapidamente para o resultado desejado pode ser atribuída aos parâmetros de ajuste limitados do algoritmo Jaya em comparação com EE. Esta característica destaca a agilidade do algoritmo Jaya em obter soluções, o que pode ser vantajoso para EEH em redes de potência maiores.

Tabela 5. Comparação de DTT (%) entre valores de referência e estimados para metodologia EE.

Barra	DTT (%)		Erro (%)
	Referência	Estimado	
2	2,421	3,308	0,887
3	1,844	2,579	0,735
5	4,592	4,113	0,479
7	3,556	3,477	0,079
9	2,753	2,768	0,014
11	2,474	2,669	0,194
12	2,657	2,771	0,114
13	2,259	2,815	0,555
Erro Médio			0,255

## 6. CONCLUSÃO

A metodologia EE é uma técnica bem estabelecida na literatura para otimizar uma ampla gama de problemas, incluindo EEH. Ela produz excelentes resultados quando os numerosos parâmetros de entrada exigidos pelo algoritmo são adequadamente ajustados. No entanto, alcançar esse ajuste é um desafio devido à sua natureza empírica,

Tabela 6. Comparação de DTT (%) entre valores de referência e estimados para metodologia Jaya.

Barra	DTT (%)		Erro (%)
	Referência	Estimado	
2	2,421	2,555	0,133
3	1,844	1,959	0,115
5	4,592	4,243	0,349
7	3,556	3,941	0,385
9	2,753	2,791	0,038
11	2,474	2,637	0,163
12	2,657	3,029	0,372
13	2,259	2,310	0,051
Erro Médio			0,134

Tabela 7. Tempo médio de execução por ordem harmônica e metodologia

Metodologia	Ordem Harmônica(s)							Total(s)
	1	3	5	7	9	11	13	
ES	88	87	66	86	83	86	78	575
JAYA	19	46	44	67	38	39	28	282

requerendo tempo e múltiplas simulações. Além disso, pode tornar-se menos adequada quando há alterações na configuração da rede ou nos dados de entrada.

Em contrapartida, o algoritmo Jaya requer menos parâmetros, tornando-o mais simples de aplicar com resultados excepcionais e convergência mais rápida, como evidenciado neste estudo. A utilização de dados de tensão e corrente em frequências fundamentais e harmônicas, precisamente sincronizados no tempo em barras monitoradas, é crucial nas metodologias de EEH propostas. Obter esses dados não apresenta dificuldades, considerando que os atuais medidores de qualidade de energia fornecem informações precisas e sincronizadas por GPS.

A metodologia que emprega o algoritmo Jaya, assim como a que usa EE, também permite a estimativa de fluxo de potência em barras não monitoradas com um tempo de processamento mais curto, o que é desejável dada a impraticabilidade de obter o fluxo de potência para toda a rede em alguns casos. O algoritmo Jaya mostrou um erro médio de DTT de 0,134 %, enquanto o erro médio obtido com EE foi de 0,255 %. Assim, além de ter um menor número de parâmetros e aproximadamente 50% menos esforço computacional, o algoritmo Jaya também demonstrou maior precisão nos resultados.

A alocação adequada de medidores de qualidade de energia é crucial a fim de obter um número mínimo de barras monitoradas. Neste sentido, a técnica de alocação de medidores apresentada neste trabalho permitiu a obtenção de resultados de estimação promissores com apenas 6 barras na rede IEEE 14-bus. Para redes maiores, espera-se que esta estratégia seja igualmente eficaz, permitindo uma redução significativa no número de barras monitoradas sem comprometer a precisão da estimação.

Com base nos resultados alcançados e a partir de uma estratégia adequada de alocação de medidores, o algoritmo Jaya emerge como uma técnica promissora não apenas para estimação do fluxo de potência, mas também para EEH em sistemas de potência de maior porte, em comparação com outras metodologias como o EE, exigindo menos parâmetros de ajuste.

REFERÊNCIAS

Arrillaga, J. and Watson, N.R. (2003). *Power System Harmonics*. John Wiley and Sons.

Arruda, E.F., Kagan, N., and Ribeiro, P.F. (2010). Harmonic distortion state estimation using an evolutionary strategy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2), 831–842.

Back, T. and Schwefel, H.P. (1996). Evolutionary computation: An overview. In *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*.

Beides, H.M. and Heydt, G.T. (1991). Dynamic state estimation of power system harmonics using kalman filter methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4), 1663–1670.

Francisco, C. (2017). *Harmonics, power systems, and smart grids*. CRC press.

Gonzalez-Longatt, F. (2024). IEEE 14 bus Test: Power system test case archive. Available: [http://fglongatt.org/OLD/Test\\_Case\\_IEEE\\_14.html](http://fglongatt.org/OLD/Test_Case_IEEE_14.html).

Hartana, R. and Richards, G. (1990). Harmonic source monitoring and identification using neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4), 1098–1104.

Heydt, G.T. (1989). Identification of harmonic sources by a state estimation technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1), 569–576.

Jain, S.K. and Singh, S.N. (2011). Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges. *Electric Power Systems Research*, 81(9), 1754–1766.

PSTCA (2024). IEEE 14-bus test system data. Disponível em: [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm).

Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19–34.

Rao, R.V. and Saroj, A. (2017). A self-adaptive multi-population based jaya algorithm for engineering optimization. *Swarm and Evolutionary computation*, 37, 1–26.

Santos, G.G., Oliveira, T.L., Oliveira, J.C., and Vieira, J.C.M. (2021). A hybrid method for harmonic state estimation in partially observable systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(3), e12763.

Schweppe, F.C., Wildes, J.C., and Rom, D. (1970). Power system static-state estimation, part i, ii and iii. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 89(1), 120–135.

Sepulchro, W.N., Encarnação, L.F., and Brunoro, M. (2015). Harmonic distortion and power flow state estimation for distribution systems based on evolutionary strategies. *IEEE Latin America Transactions*, 13(9), 3066–3071.

Apêndice A. VALORES DE REFERÊNCIA

As Tabela A.1, A.2 e A.3 listam os valores das componentes fundamentais e harmônicas de tensão considerados neste estudo, obtidos do fluxo de potência e do estado harmônico da rede IEEE 14-bus por meio do software de transitórios eletromagnéticos PSCAD, a partir da injeção de correntes harmônicas em algumas barras aleatoriamente escolhidas.

Tabela A.1. Valores de referência de magnitude em p.u. e fase em graus para a tensão fundamental e as harmônicas de ordem 3ª e 5ª para a rede IEEE de 14 barras.

Barra	V1h		V3h		V5h	
	Magnitude	Fase	Magnitude	Fase	Magnitude	Fase
1	1,039	0,000	0,020	49,738	0,001	54,535
2	1,025	-2,232	0,024	51,659	0,001	54,665
3	1,047	-5,671	0,018	33,099	0,002	84,714
4	0,992	-9,362	0,029	23,370	0,001	2,536
5	1,073	-8,434	0,048	27,225	0,012	-79,702
6	1,048	-8,431	0,037	27,225	0,005	-79,090
7	1,036	-9,419	0,036	24,600	0,003	-84,293
8	1,014	-5,126	0,025	37,493	0,001	51,832
9	1,008	-6,558	0,027	33,543	0,001	35,123
10	1,030	-9,050	0,032	24,231	0,002	-84,074
11	1,034	0,485	0,025	26,697	0,000	21,359
12	1,033	-6,734	0,020	35,310	0,007	87,792
13	1,028	-7,035	0,021	32,270	0,003	86,197
14	1,014	-9,387	0,032	33,045	0,001	68,370

Tabela A.2. Valores de referência de magnitude em p.u. e fase em graus para as harmônicas de ordem 7ª e 9ª para a rede IEEE de 14 barras.

Barra	V7h		V9h	
	Magnitude	Fase	Magnitude	Fase
1	0,001	4,134	0,004	54,399
2	0,001	-5,095	0,004	55,708
3	0,004	61,236	0,004	66,670
4	0,002	-80,697	0,004	-78,434
5	0,006	-158,364	0,002	123,948
6	0,001	18,036	0,002	-57,455
7	0,005	20,717	0,007	-75,005
8	0,002	24,776	0,005	50,115
9	0,002	17,519	0,004	47,121
10	0,005	24,001	0,005	-72,890
11	0,004	40,095	0,002	-20,497
12	0,011	76,269	0,013	81,729
13	0,006	63,633	0,006	70,974
14	0,006	41,786	0,002	-10,149

Tabela A.3. Valores de referência de magnitude em p.u. e fase em graus para as harmônicas de ordem 11ª e 13ª para a rede IEEE de 14 barras.

Barra	V11h		V13h	
	Magnitude	Fase	Magnitude	Fase
1	0,001	14,702	0,004	0,000
2	0,001	11,732	0,004	-51,760
3	0,001	51,424	0,001	7,687
4	0,000	-123,846	0,001	166,994
5	0,000	124,223	0,000	131,458
6	0,000	-64,738	0,000	-45,827
7	0,001	-99,827	0,001	-140,044
8	0,001	24,752	0,003	-33,396
9	0,001	28,798	0,002	-16,589
10	0,001	-97,996	0,000	-132,135
11	0,000	-15,983	0,000	-18,981
12	0,001	69,722	0,001	61,665
13	0,001	62,005	0,001	44,933
14	0,001	79,706	0,002	78,767