

Estimação robusta de estados harmônicos considerando supressão de erros grosseiros: uma abordagem usando um modelo de otimização

A robust harmonic state estimation considering bad data suppression: an approach using an optimization model

DOI:10.34117/bjdv7n2-524

Recebimento dos originais: 20/12/2020

Aceitação para publicação: 29/01/2021

Igor Delgado de Melo

Prof. Dr. Em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituição: Universidade Federal de Juiz de Fora
Endereço: Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro
E-mail: igor.delgado@ufjf.br

Vitor Pereira de Almeida

Doutorando pela Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituição: Universidade Federal de Juiz de Fora
Endereço: Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro
E-mail: vitorpereiradealmeida1991@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho, um modelo de otimização é formulado para se estimar estados harmônicos a partir de um algoritmo robusto à introdução de erros grosseiros. Na abordagem proposta, magnitudes e ângulos de tensões harmônicas são as variáveis de estados a serem determinadas pela solução do problema de otimização proposto. Medições fasoriais sincronizadas são consideradas para a abordagem sendo o sistema IEEE de 14 barras utilizado para validar o método proposto e atestar a eficiência do mesmo considerando cargas não lineares conectadas ao sistema. Comparações são realizadas com um fluxo de potência e o método tradicional dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). A fim de se melhorar o desempenho computacional do processo da estimativa de estados para cada ordem harmônica, o uso de processamento paralelo é adotado.

Palavras-chave: estimação de estados; qualidade de energia; distorção harmônica; fluxo de potência.

ABSTRACT

In this work, an optimization model is formulated in order to estimate harmonic states based on an algorithm robust to the introduction of gross errors. In the proposed approach, harmonic voltage magnitudes and angles are the state variables to be determined by the solution of the proposed optimization problem. Synchronized phasor measurements are considered for the approach being the IEEE 14 bus test system used for the validation of the proposed methodology and to verify its efficiency considering nonlinear loads connected to the system. Comparisons with load flow and the traditional Weighted Least Squares (WLS) method is made. In order to improve the computation burden of the state estimation process for each harmonic order, parallel processing is used.

Keywords: state estimation; power quality; harmonic distortion; power flow.

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento contínuo de cargas não lineares, advento da eletrônica de potência e uso intensivo de fontes renováveis alternativas, diversos problemas associados à qualidade de energia podem ser exacerbados nas redes incluindo desvios de frequência, variações de tensão de curta, longa duração e distorções harmônicas [1,2,3]. Essas últimas são as principais causadoras de diversos problemas como sobreaquecimento de motores, redução de vida útil de transformadores, vibração mecânica de máquinas, aumento de perdas elétricas em fios e cabos [4]. É de fundamental importância, portanto, monitorar níveis de distorção harmônica e estimar suas componentes para a avaliação sistêmica da proliferação de distorções [4].

A Estimação de Estados Harmônicos (EEH) é uma ferramenta essencial desde que foi primeiramente proposta por [5] através de aplicação da técnica dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) em sistemas de potência e em [6] para aplicação direta em monitoramento de harmônicos. Para se efetuar a EEH, é necessário prévio conhecimento sobre modelagem de equipamentos e redes no domínio da frequência, de um número mínimo de medidores alocados na rede e um algoritmo, geralmente MQP, que seja capaz de minimizar erros aleatórios inerentes ao processo de aquisição de dados [7,8]. Neste contexto, qualímetros tradicionais são comumente usados, apesar de não possuírem fonte de sincronismo, para extrair informações harmônicas de sinais coletados em campo [7,8].

Entre os anos de 1992 e 1998, o primeiro sistema de monitoramento harmônico trifásico de grande escala foi concebido e desenvolvido pela NYPA (*New York Power Authorities*) valendo-se do uso de PMUs (*Phasor Measurement Units*) [8,9]. Na abordagem adotada para a estimação de estados harmônicos, o algoritmo MQP é executado regularmente em 15 minutos considerando que a obtenção de fasores harmônicos é realizada por Análise de Fourier aplicada em sinais analógicos adquiridos por PMUs. Apesar do sucesso do empreendimento, notou-se a introdução de erros maiores do que os aleatórios corriqueiros e inerentes à instrumentação. Tais erros, chamados grosseiros, seriam capazes de danificar os resultados do estimador de estados resultando na perda da confiança do operador no algoritmo. Para isso, um supercalibrador foi desenvolvido em [8] para extirpar erros grosseiros e sistemáticos garantindo a aplicação viável de PMUs e estimação de estados harmônicos.

Desde este projeto, outros sistemas de monitoramento foram concebidos e até mesmo outros modelos de PMUs foram propostos para contemplar análise harmônica como em [10] e [11].

Em [12], é proposto o uso de técnicas evolutivas como o algoritmo genético para se minimizar os erros envolvidos no processo de EEH. Apesar dos resultados satisfatórios encontrados, destaca-se que métodos meta-heurísticos são associados a tempos computacionais desvantajosos comumente. Outras publicações também se valem de algoritmos meta-heurísticos como enxame de partículas em [13] e acasalamento de abelhas melíferas em [14] para a EEH em sistemas de distribuição.

Como alternativa, destaca-se o uso de métodos diferentes aos tradicionais como a decomposição em valores singulares exploradas em [15,16] e análise de componentes independentes proposta em [17].

O uso de PMUs no contexto da estimação de estados é amplamente citado na literatura como em [18-21].

Em [19], um problema de otimização com restrições não lineares é formulado para cada ordem harmônica a partir de um número reduzido de PMUs alocadas no sistema de distribuição. A resolução se dá via método de pontos interiores com barreira de segurança.

Em [20], as restrições não lineares de um problema de otimização podem ser relaxadas durante o processo iterativo a fim de se determinar a solução ótima e rastrear componentes harmônicas ao longo do tempo.

Todos os algoritmos propostos na literatura pressupõem que erros aleatórios possam ser minimizados no processo de EEH. Entretanto, se houver a introdução de erros grosseiros, estes seriam afetados significativamente. Entende-se por erro grosseiro, neste contexto, a ocorrência de eventos não randômicos capazes de introduzir erros expressivos nas medidas de tensão e correntes efetuadas em campo devido à descalibração, ataques cibernéticos, eventos intempestivos relacionados a descargas atmosféricas e desconexão de cabos como descrito em [22].

Este artigo propõe uma abordagem robusta para a EEH em sistemas de potência. Na formulação proposta, um problema de otimização é concebido a partir da minimização de uma função objetivo cujo intuito é minimizar os erros quadráticos das medições e estados estimados sujeito a restrições de igualdade que incorporam o conceito de robustez estatística. Neste caso, o estimador-M desenvolvido em [23] será aplicado pela primeira vez à estimação de estados harmônicos como contribuição desta pesquisa.

Na abordagem proposta, cada ordem harmônica tem seus estados correspondentes estimados individualmente. Considerando uma abordagem de estimação sequencial, o processo de estimação começaria da primeira ordem harmônica até a última considerada sob análise resultando em um desempenho computacional desvantajoso. Para solucionar este problema, o uso de processamento paralelo é usado sendo a estimação de cada ordem harmônica interpretada como um processo (*thread*) o qual pode ser executado em paralelo a outros garantido melhoria no tempo computacional e resultados precisos.

A validação do método se dá via comparação com resultados de um fluxo de potência, comparação com a resposta obtida pela aplicação do MQP tradicional aplicado ao problema quando se considera introdução de erros aleatórios e grosseiros. O sistema IEEE 14 barras é usado para as simulações computacionais.

Este artigo é dividido em quatro seções principais incluindo esta de caráter introdutório. Na segunda seção, o método proposto é apresentado. Na terceira, os resultados e comparações são efetuadas para validação do algoritmo proposto e na última seção, as considerações finais são apresentadas.

2 METODOLOGIA PROPOSTA

O método proposto é baseado na formulação de um problema de otimização associado à cada ordem harmônica h individualmente. A função objetivo (1) é minimizada sujeito às restrições de igualdade consideradas em (2)-(5):

$$\min J^h(\hat{\mathbf{x}}^h) = \sum_{i=1}^m \rho_i(r_i^h) \quad (1)$$

sujeito a:

$$z_i^h = \varphi_i^h(\hat{\mathbf{x}}^h) + r_i^h \quad (2)$$

$$\rho_i(r_i^h) = \begin{cases} (r_i^h/\sigma_i^h)^2, & |r_i^h/\sigma_i^h| \leq a \\ (a/\sigma_i^h)^2, & |r_i^h/\sigma_i^h| > a \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^h = [\hat{\mathbf{V}}^h, \hat{\boldsymbol{\theta}}^h] \quad (4)$$

$$\mathbf{z}^h = [\mathbf{V}^h, \boldsymbol{\theta}^h, \mathbf{I}^h, \boldsymbol{\delta}^h] \quad (5)$$

em que:

- J^h é a o valor da função objetivo a ser minimizada;
- ρ_i é uma função escrita em termos do resíduo de medição (r_i^h);
- m representa o número de medições coletadas da rede;
- z_i^h representa o valor de uma dada medição i , $\varphi_i^h(\hat{\mathbf{x}}^h)$ é seu valor correspondente calculado em função do vetor de variáveis de estados, $\hat{\mathbf{x}}^h$;
- σ_i^h representa o valor do desvio padrão associado aos erros aleatórios das medições, modelados a partir de uma distribuição Gaussiana de média zero;
- a é um valor ajustado entre 1 e 4 segundo [23]. É adotado igual a 3 nos estudos deste artigo;
- $\hat{\mathbf{V}}^h, \hat{\boldsymbol{\theta}}^h$ representam os vetores a serem estimados de magnitudes e ângulos de tensões harmônicas para todas as barras do sistema, respectivamente;
- $\mathbf{V}^h, \boldsymbol{\theta}^h, \mathbf{I}^h, \boldsymbol{\delta}^h$ representam as medições coletadas da rede sendo respectivamente valores de tensões e ângulos nodais; correntes passantes em linhas conectadas às PMUs e seus ângulos.

A função objetivo a ser minimizada é escrita em função dos resíduos como descrito nas equações (1) e (2). A equação (3) mostra a escrita da função $\rho_i(r_i^h)$ que visa minimizar o erro quadrático entre valores medidos e estimados em função das variáveis de estados caso o resíduo seja menor que uma constante a . Em caso contrário, o algoritmo presume a existência de erros grosseiros (o que leva o resíduo de medição ser maior do que em casos em que apenas erros aleatórios estão presentes) os quais devem ser suprimidos pelo método robusto desenvolvido em [23]. Neste caso, $\rho_i(r_i^h)$ assume um valor constante indicado em (3), a equação (4) representa o vetor de variáveis de estados determinado para cada ordem harmônica e a equação (5) apresenta o vetor de medições.

O problema de otimização formulado é solucionado via método de pontos interiores tradicional como em [24].

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de validar o método proposto, o sistema IEEE de 14 barras será utilizado, sendo seu diagrama unifilar representado na Figura 1. Os dados originais do sistema apresentado em [24] são mantidos neste artigo. Para representação no domínio da frequência, as linhas são consideradas em seus modelos PI equivalentes, as cargas adotadas como o modelo paralelo RL. Os geradores, banco de capacitores e cargas não lineares são modeladas seguindo o tutorial apresentado na referência [25].

Para se obter a situação verdadeira representativa do estado operativo da rede, um fluxo de potência é executado como apresentado em [26] em que o método de injeção de correntes harmônico é apresentado. Através de seu uso, os estados harmônicos são calculados (cada magnitude e ângulo de tensão em cada ordem harmônica). Os resultados do fluxo de potência harmônico serão adotados como os valores verdadeiros com os quais os resultados do algoritmo proposto serão comparados para validação.

Seguindo o procedimento de alocação proposto em [27], PMUs são alocadas nas barras 2, 6, 7, 9 e 14 assim como representado pela Figura 1. As medições obtidas, neste caso, são as tensões fasoriais em cada uma destas barras e as correntes passantes por todos os ramos conectados às PMUs.

Para as simulações computacionais, a fim de emular as medições fasoriais, o fluxo de potência harmônico [26] será utilizado. Para simular imperfeições nas medidas e inserção de erros aleatórios, um erro de média zero e desvio padrão de 5% é adotado como na referência [20].

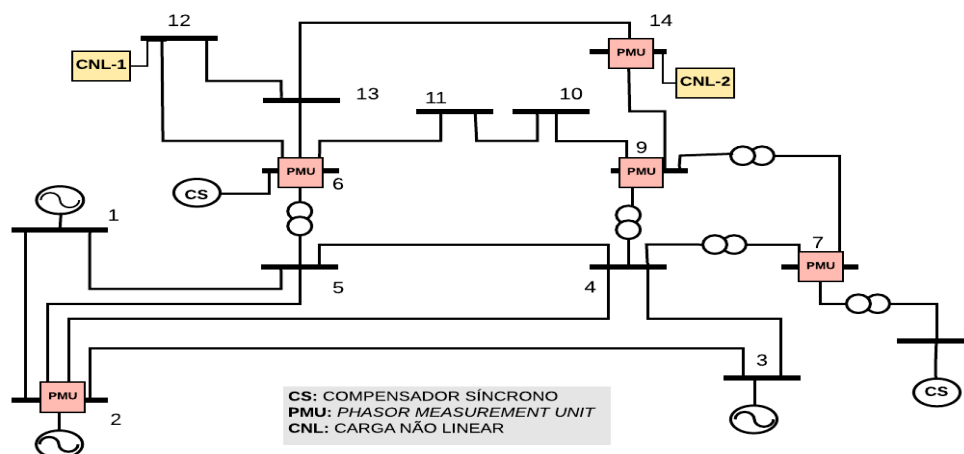


Figura 1: Sistema IEEE de 14 barras

Duas cargas não lineares foram consideradas nas barras 12 e 14, sendo seus respectivos espectros harmônicos apresentados nas Tabelas I e II. Apenas as ordens ímpares foram consideradas e as triplas possuem valores mais expressivos no espectro da carga localizada na barra 12 a fim de simular maior variabilidade entre os espectros.

A partir do caso base, determina-se os estados harmônicos a partir do fluxo de potência harmônica [26] a fim de se obter denominados valores verdadeiros, os quais serão comparados aos valores estimados pela metodologia, posteriormente, para validação da metodologia proposta.

Tabela 1: Espectro harmônico da CNL 1 conectada na barra 12

h	I^h (%)	δ^h (°)
1	100	0
3	83	-125
5	75	-245
7	56	-180
9	43	-65
11	33	-180
13	25	235
15	12	220

Tabela 2: Espectro harmônico da CNL 2 conectada na barra 14

h	I^h (%)	δ^h (°)
1	100	0
3	5	-125
5	75	-245
7	56	-180
9	3	-65
11	33	-180
13	25	235
15	2	220

A Figura 2 mostra os resultados calculados pelo fluxo para as tensões harmônicas em cada barra do sistema associados à cada ordem harmônica. De maneira similar, as correntes para cada barramento e ordem são mostrados pela Figura 3.

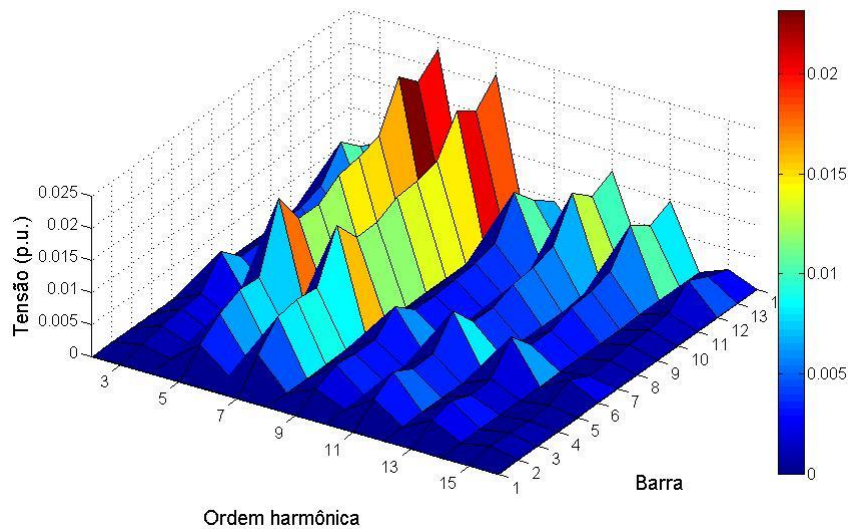


Figura 2: Tensões harmônicas em pu para cada barra do sistema

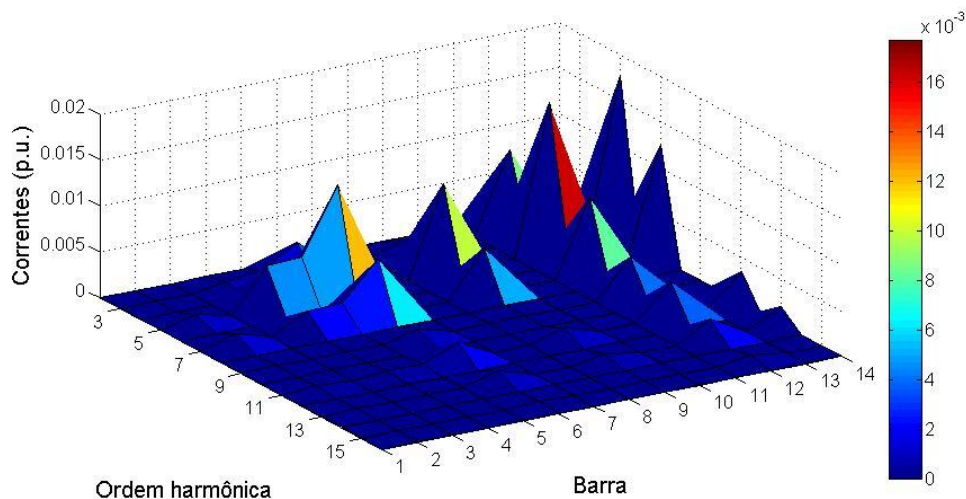


Figura 3: Correntes harmônicas em pu para cada barra do sistema

A. SEM ERRO GROSSEIRO

Como primeiro caso de estudo, o sistema de medição será considerado livre de erros grosseiros, nesta análise, a fim de validar o uso da metodologia e comparar seus resultados com o método MQP tradicional aplicada na estimação de estados harmônicos.

Os erros de estimação entre valores estimados e os verdadeiros (obtidos pelos cálculos do fluxo de potência) são computados, geralmente, através do uso do EQMN (erro quadrático médio normalizado), considerando-se que o algoritmo será executado 10.000 vezes e, ao final, a média dos erros calculados é adotada como métrica para apresentar a diferença entre o valor real e o estimado respectivamente.

Na Tabela 3 mostra-se os maiores erros observados nas magnitudes e ângulos de tensões estimados para cada barra do sistema. Os maiores erros percentuais são apresentados para cada ordem harmônica específica, podendo-se notar que os maiores erros são notados para as quintas e sétimas ordens harmônicas (aquelas que apresentaram maiores distorções indicadas nas Figuras 2 e 3).

Além disso, é importante ressaltar a comparação realizada na Tabela 3 em que os erros de estimação são apresentados usando o método robusto proposto (MRP) e o MQP tradicional, levando a resultados os quais validam a metodologia proposta uma vez que a mesma resulta em erros menores que o método tradicional MQP.

O maior erro usando o método proposto foi de 0,9478% para a magnitude de tensão da quinta ordem harmônica enquanto o maior erro usando o MQP foi no ângulo da mesma ordem harmônica sendo igual a 1,5184%.

Tabela 3: Maiores EQMN percentuais para cada ordem harmônica – comparando o método robusto proposto (MRP) e o MQP tradicional

Ordem Harmônica (<i>h</i>)	MRP		MQP	
	\hat{v}^h (%)	$\hat{\theta}^h$ (%)	\hat{v}^h (%)	$\hat{\theta}^h$ (%)
1	0,0564	0,8580	0,6258	0,9658
3	0,8524	0,5847	0,9871	0,9214
5	0,9478	0,6874	1,2480	1,5184
7	0,9472	0,6847	1,2018	1,0547
9	0,8741	0,5854	1,2015	0,9431
11	0,8547	0,5871	0,9874	0,9986
13	0,8124	0,6985	0,9574	0,9851
15	0,7857	0,8547	0,9784	0,9012

B. COM ERRO GROSSEIRO NA MEDIÇÃO

A fim de se considerar uma situação com erro grosseiro de medição, assume-se, neste segundo estudo de caso, que a magnitude de tensão de quinta ordem harmônica ($h=5$) mensurada na barra 14 seja descalibrada na simulação, sendo, portanto, multiplicada pelo dobro de seu valor nesta simulação. A magnitude da corrente de décima primeira ordem harmônica ($h=11$) medida na linha entre as barras 6 e 11 também sofrerá uma descalibração sendo multiplicada por um terço de seu valor verdadeiro.

Percebe-se na Tabela 4 que, devido à introdução de erros aleatórios em devidas ordens harmônicas, estas são afetadas pelos erros grosseiros simulados pela descalibração. Note que o método MQP tradicional sofre o impacto apresentando erros de estimação extremamente altos acima de 10% denunciando que a estimativa está corrompida e, portanto, poderia não ser associada à um grau de precisão alto. Em

contrapartida, como o algoritmo proposto fornece supressão de erros grosseiros, uma vez que responderá as diferenças entre valores medidos e estimados com diferenças exacerbadas, os erros de estimação de estados são bem inferiores àqueles obtido pelo método tradicional, sendo, portanto, validado sua eficiência para a tarefa de supressão de dados espúrios.

Apesar de o erro de estimação, neste segundo caso, ser maior do que aquele apresentado na Tabela 3, deve-se notar que o resultado ainda continua apresentando resultados satisfatórios comparando os mesmos com os valores obtidos pelo MQP.

Tabela 4: Maiores EQMN percentuais para cada ordem harmônica com erros grosseiros – comparando o método robusto proposto (MRP) e o MQP tradicional

Ordem Harmônica (<i>h</i>)	MRP		MQP	
	\hat{V}^h (%)	$\hat{\theta}^h$ (%)	\hat{V}^h (%)	$\hat{\theta}^h$ (%)
1	0,0564	0,8580	0,6258	0,9658
3	0,8524	0,5847	0,9871	0,9214
5	1,0741	0,9871	10,5847	5,5874
7	0,9472	0,6847	1,2018	1,0547
9	0,8741	0,5854	1,2015	0,9431
11	0,9874	0,7778	6,0287	3,8514
13	0,8124	0,6985	0,9574	0,9851
15	0,7857	0,8547	0,9784	0,9012

Em um terceiro caso de estudo, multiplica-se os magnitudes e ângulos de tensão de quinta ordem harmônica mensurados na barra 2 por metade de seus valores verdadeiros.

Pode-se perceber que os resultados obtidos atestam novamente a validade e eficiência do método para suprimir o efeito do erro grosseiro, garantindo a obtenção de resultados satisfatórios em comparação ao método MQP tradicional. Neste terceiro caso, os erros maiores chegariam a cerca de 8% caso o método robusto não fosse utilizado.

Tabela 4: Maiores EQMN percentuais para cada ordem harmônica com erros grosseiros – terceiro caso – comparando o método robusto proposto (MRP) e o MQP tradicional

Ordem Harmônica (<i>h</i>)	MRP		MQP	
	\hat{V}^h (%)	$\hat{\theta}^h$ (%)	\hat{V}^h (%)	$\hat{\theta}^h$ (%)
1	0,0564	0,8580	0,6258	0,9658
3	0,9947	0,9899	5,9871	8,9214
5	0,9478	0,6874	1,2480	1,5184
7	0,9472	0,6847	1,2018	1,0547
9	0,8741	0,5854	1,2015	0,9431
11	0,8547	0,5871	0,9874	0,9986
13	0,8124	0,6985	0,9574	0,9851
15	0,7857	0,8547	0,9784	0,9012

C. ANÁLISES DE TEMPO COMPUTACIONAL

Pode-se perceber que o método proposto é desenvolvido a partir da premissa tradicional e comumente utilizada em que os estados harmônicos são determinados individualmente sendo o processo de estimação iniciado na frequência fundamental de 50/60Hz ($h=1$), seguindo sequencialmente para a segunda ordem harmônica, terceira, quarta, quinta e assim por diante. Um tempo desvantajoso seria associado à esta abordagem caso a mesma fosse usada para sistemas de grande porte, com alto número de ordens harmônicas a serem processadas.

Para contornar este problema, propõe-se o uso do processamento paralelo em que vários processos ou tarefas (*threads*) podem ser realizados concomitantemente através do uso da tecnologia *hyperthreading* em que os núcleos virtuais e físicos de um computador podem ser compartilhados e resolver tarefas individuais concomitantemente, poupando tempo computacional associado comumente à estimação de estados harmônicos.

Neste artigo, foi utilizado um computador IntelCore i7 800GB com sistema operacional Windows 10, composto por 4 núcleos físicos e possibilidade do uso de 8 *threads* para processamento paralelo. Os modelos e algoritmos foram todos desenvolvidos em MATLAB, sendo possível através de linhas de comando através do *parfor* atribuir as tarefas associadas à estimação de estados harmônicos em até 8 *threads*.

Percebe-se que, nos estudos de caso, considera-se apenas as ordens harmônicas ímpares mais expressivas nas redes de potência da primeira até décima quinta ordem, sendo no total, oito ordens harmônicos para terem seus estados estimados.

Na Tabela 5, são mostradas as diferenças entre os tempos computacionais usando processamento sequencial, paralelo e o *speed-up* (razão entre o tempo do processo sequencial e paralelo). Pode-se perceber que, para o caso I em que nenhum erro grosseiro foi considerado o tempo computacional seria em torno de 8,40 segundos possuindo um ganho de 6,19 em relação ao processamento sequencial. Tal fato viabiliza e habilita de fato o uso da estimação de estados harmônicos em centros de controle de maneira efetiva e mais ágil. Para os casos em que erros grosseiros existem no conjunto de medições, o algoritmo proposto demanda mais esforço computacional para determinar os estados operativos da rede. Porém, além de o mesmo fornecer boas estimativas satisfatoriamente em relação ao MQP tradicional, mesmo assim seu tempo computacional não inviabiliza o monitoramento do espargimento de harmônicos pela rede e o monitoramento de distorções em tempo real.

Tabela 5: Comparações entre tempos computacionais para cada caso de simulação

Caso de Estudo	Sequencial (s)	Paralelo (s)	Speed-up
I	52,05	8,40	6,19
II	185,25	29,26	6,33
III	120,14	19,16	6,27

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma nova abordagem para a estimação de estados harmônicos em sistemas de potência considerando um algoritmo robusto à introdução de erros grosseiros em medições sincronizadas. Para isso, uma nova formulação foi concebida para a estimação de estados harmônicos baseada em um problema de otimização com restrições não lineares. O objetivo é minimizar erros quadráticos entre valores medidos e estimados, sendo os mesmos calculados a partir de uma função que determina um valor limite para a diferença (resíduo) entre um valor medido e seu correspondente estimado pelo método garantindo que, caso este resíduo seja expressivo, o mesmo seja suprimido no processo de estimação de estados.

A maior contribuição desta pesquisa é propor, pela primeira vez, o uso de estimadores robustos para se determinar estados harmônicos em sistemas de potência. Através da supressão de erros grosseiros, pode-se notar, através de estudos de caso e pelos resultados obtidos que o método fornece erros de estimação menores do que aqueles obtidos usando MQP tradicional além de garantir que as estimativas sejam obtidas de maneira confiável e satisfatória. Diz-se confiável em relação à posterior ações como mitigação de harmônicas e controle das mesmas através de bancos de capacitores com reatores de sintonia, filtros ativos e eletrônica de potência.

A utilidade do método vem de sua aplicabilidade e praticidade de implementação visto que é necessário para um sistema de monitoramento a capacidade de suprimir eventuais dados espúrios que apareçam devido à eventos não previsíveis e intempestivos.

Como trabalhos futuros, destaca-se o uso de estimadores híbridos usando tecnologias sincronizadas com não sincronizadas e outras técnicas de estimação robusta.

REFERÊNCIAS

- [1] Melo, I. D., Pereira, J. L., Variz, A. M., & Ribeiro, P. F. (2020). Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement. *Electric Power Systems Research, 180*, 106128.
- [2] Bandeira, Marcos Lima, Rodrigo Carvalho Gonçalves, and Sandro Zachariades Sabença. "Avaliação dos indicadores de qualidade e de sustentabilidade econômico-financeira de distribuidoras de energia elétrica." *Brazilian Journal of Development* 6.4 (2020): 20967-20987.
- [3] de Melo, Igor Delgado, Heitor Magno Rodrigues Junior, and Mariana Escarati de Oliveira. "Maximum hosting capacity of distributed generation in three-phase distribution systems: an approach based on an optimization model." *Brazilian Journal of Development* 7.1 (2021): 7425-7443.
- [4] Mesquita, A., Lima, M., Wulfert, T., Delgado, I., Manso, L., Duque, C., & Variz, A. (2020). Estimação de Fontes Harmônicas em Sistemas de Potência. *Principia: Caminhos da Iniciação Científica, 20*, 11-11.
- [5] Schweppe, F. C., & Wildes, J. (1970). Power system static-state estimation, Part I: Exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, (1), 120-125.
- [6] Heydt, G. T. (1989). Identification of harmonic sources by a state estimation technique. *IEEE Transactions on Power Delivery, 4*(1), 569-576.
- [7] Meliopoulos, A. S., Zhang, F., & Zelingher, S. (1994). Power system harmonic state estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery, 9*(3), 1701-1709.
- [8] Meliopoulos, A. S., Cokkinides, G. J., Hedrington, C., & Conrad, T. L. (2010, July). The supercalibrator—a fully distributed state estimator. In *IEEE PES General Meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- [9] Zelingher, S., Fardanesh, B., Uzunovic, E., Meliopoulos, A. S., & Cokkinides, G. (2006, June). Harmonic monitoring system via GPS-synchronized measurements-update and new developments. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting* (pp. 7-pp). IEEE.
- [10] Carta, A., Locci, N., & Muscas, C. (2009). A PMU for the measurement of synchronized harmonic phasors in three-phase distribution networks. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 58*(10), 3723-3730.
- [11] Mejia-Barron, A., Granados-Lieberman, D., Razo-Hernandez, J. R., Amezquita-Sanchez, J. P., & Valtierra-Rodriguez, M. (2019). Harmonic PMU algorithm based on complex filters and instantaneous single-sideband modulation. *Electronics, 8*(2), 135.
- [12] Arruda, E. F., Kagan, N., & Ribeiro, P. F. (2010). Three-phase harmonic distortion state estimation algorithm based on evolutionary strategies. *Electric power systems research, 80*(9), 1024-1032.
- [13] Arefi, A., Haghifam, M. R., & Fathi, S. H. (2011, June). Distribution harmonic state estimation based on a modified PSO considering parameters uncertainty. In *2011 IEEE Trondheim PowerTech* (pp. 1-7). IEEE.

- [14] Arefi, A., Haghifam, M. R., Fathi, S. H., Niknam, T., & Olamaei, J. (2009, June). A novel algorithm based on Honey Bee Mating Optimization for distribution harmonic state estimation including distributed generators. In *2009 IEEE Bucharest PowerTech* (pp. 1-7). IEEE.
- [15] Yu, K. K. C., & Watson, N. R. (2004, November). Three-phase harmonic state estimation using SVD for partially observable systems. In *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.* (Vol. 1, pp. 29-34). IEEE.
- [16] Breda, J. F. D., Vieira, J. C. M., & Oleskovicz, M. (2021). Power Quality Monitor Allocation Based on Singular Value Decomposition and Genetic Algorithm. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(1), 175-185.
- [17] Gursoy, E., & Niebur, D. (2008). Harmonic load identification using complex independent component analysis. *IEEE Transactions on power delivery*, 24(1), 285-292.
- [18] Zhou, W., Ardakanian, O., Zhang, H. T., & Yuan, Y. (2019). Bayesian Learning-Based Harmonic State Estimation in Distribution Systems with Smart Meter and DPMU Data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(1), 832-845.
- [19] Melo, I. D., Pereira, J. L., Variz, A. M., & Garcia, P. A. (2017). Harmonic state estimation for distribution networks using phasor measurement units. *Electric Power Systems Research*, 147, 133-144.
- [20] Melo, I. D., Pereira, J. L., Ribeiro, P. F., Variz, A. M., & Oliveira, B. C. (2019). Harmonic state estimation for distribution systems based on optimization models considering daily load profiles. *Electric Power Systems Research*, 170, 303-316.
- [21] Moradifar, A., Foroud, A. A., & Firouzjah, K. G. (2017). Intelligent localisation of multiple non-linear loads considering impact of harmonic state estimation accuracy. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(8), 1943-1953.
- [22] Yu, K. K., Watson, N. R., & Arrillaga, J. (2005). Error analysis in static harmonic state estimation: A statistical approach. *IEEE transactions on power delivery*, 20(2), 1045-1050.
- [23] Merrill, H. M., & Schweppe, F. C. (1971). Bad data suppression in power system static state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (6), 2718-2725.
- [24] A. R. Al-Roomi, "Power Flow Test Systems Repository," 2015.
- [25] IEEE Power Energy Society (PES), Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation, 2003.
- [26] A. Variz, J. Pereira, S. Carneiro Jr, and P. Barbosa, "Three-phase harmonic power flow using the current injection method," in IEEE International Conference on Harmonics and Power Quality, 2006