

MÉTODO DE COMPRESSÃO DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA BASEADO EM ICA E FFT

Larissa de Souza Pinto, Mateus Vieira da Assunção,
Danton Diego Ferreira, Belisário Nina Huallpa

Universidade Federal de Lavras

larissa.souzapinto.lsp@gmail.com, mateusvassun-
cao@gmail.com, danton@deg.ufla.br, belisa-
rio.nina@deg.ufla.br

Leandro R. Manso Silva, Carlos Augusto Duque

Universidade Federal de Juiz de Fora

leandro.manso@engenharia.ufjf.br, car-
los.duque@ufjf.edu.br

Resumo —No monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica é gerado um grande volume de dados. Para realizar o armazenamento de maneira mais eficiente deve-se utilizar um método de compressão. O presente trabalho propõe um método de compressão de distúrbios, que é baseado nos algoritmos de Análise de Componentes Independentes, Transformada Rápida de Fourier e Limiares Adaptativos obtidos utilizando Morfologia Matemática. O algoritmo de Análise de Componentes Independentes retorna três componentes estatisticamente independentes entre si. Como o ruído e distúrbios presentes são estatisticamente independentes da componente fundamental, a ferramenta de Análise de Componentes Independentes os isola no primeiro componente, onde um limiar é aplicado, enquanto a primeira e segunda componentes são apresentadas à Transformada de Fourier. Boas relações de compressão de distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica são alcançadas.

Palavras-chave —Compressão, Redes Inteligentes, Análise de Componentes Independentes, Qualidade de Energia.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento das cargas elétricas não lineares, com potências cada vez mais elevadas e com a inserção de novas fontes de energia, cresce a demanda de uma rede elétrica mais flexível, confiável, segura, ecológica, eficiente, adaptativa, inteligente e observável em todos os níveis de tensão. Este tipo de rede é atualmente referido como rede inteligente, ou Smart Grid [1].

Uma das tarefas importantes em Smart Grids é o monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) [1]-[2], que consiste em detectar e classificar os distúrbios que acometem os sinais de tensão e corrente bem como levantar os índices de QEE.

No monitoramento da QEE, arquivos de dados de grande extensão são gerados. A fim de reduzir o volume de dados a serem armazenados, alguns métodos de compressão de sinais utilizando técnicas de processamento digital de sinais foram propostos. As Referências [3]-[4]-[5] utilizam a transformada wavelet como ferramenta principal para compressão. Em [5], os dados são decompostos em sinais de baixa e alta frequência pela transformada wavelet e um limiar determina as in-

formações necessárias para análise. A limitação deste método é a escolha do limiar, que é dependente do tipo de distúrbio que acomete o sinal analisado. No trabalho apresentado em [3], as propriedades esparsas da transformada wavelet são exploradas a fim de ampliar as taxas de compressão. A referência [5] apresenta propostas de métodos adaptativos de compressão utilizando a transformada wavelet. A técnica é realizada por meio da decomposição do sinal, onde os limiares são determinados através da ponderação do valor máximo absoluto de cada escala e coeficientes cujos valores estão abaixo do limite são descartados, enquanto aqueles que estão acima do limite são mantidos juntamente com suas localizações temporais.

Outros trabalhos são encontrados na literatura que utilizam as transformadas ortogonais, tais como: Transformada Discreta de Cossenos (TDC), Transformada Discreta de Fourier, em inglês "Discrete Fourier Transform" (DFT) e "Wavelet Packet Transform" (WPT) [6]-[10]. As técnicas citadas, realizam uma compressão com perdas, já que as informações julgadas irrelevantes são descartadas. Existem trabalhos baseados em técnicas de compressão sem perdas, baseados nos codificadores de Lempel-Ziv-Welch e Huffman [11], porém, como estas técnicas não descartam informação, as taxas de compressão obtidas por esses métodos são menores.

Neste trabalho, é proposto o uso da técnica de Análise de Componentes Independentes, em inglês "Independent Component Analysis" (ICA) [12], e a Transformada de Fourier, em inglês "Fourier Transform" (FT), para a compressão de dados em distúrbios de QEE em sistemas trifásicos. O ICA é um método de processamento estatístico de sinais que realiza a transformação linear de um conjunto de observações de variáveis, onde o resultado é um novo conjunto de variáveis estatisticamente independentes, chamadas de componentes independentes. A FT proporciona a transição de uma função do domínio do tempo para o domínio da frequência. Neste trabalho é usado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier, em inglês "Fast Fourier Transform" (FFT) para o processamento da FT.

Na seção 2 (método proposto), serão descritas as etapas do procedimento de compressão, com explicações sucintas sobre os algoritmos utilizados.

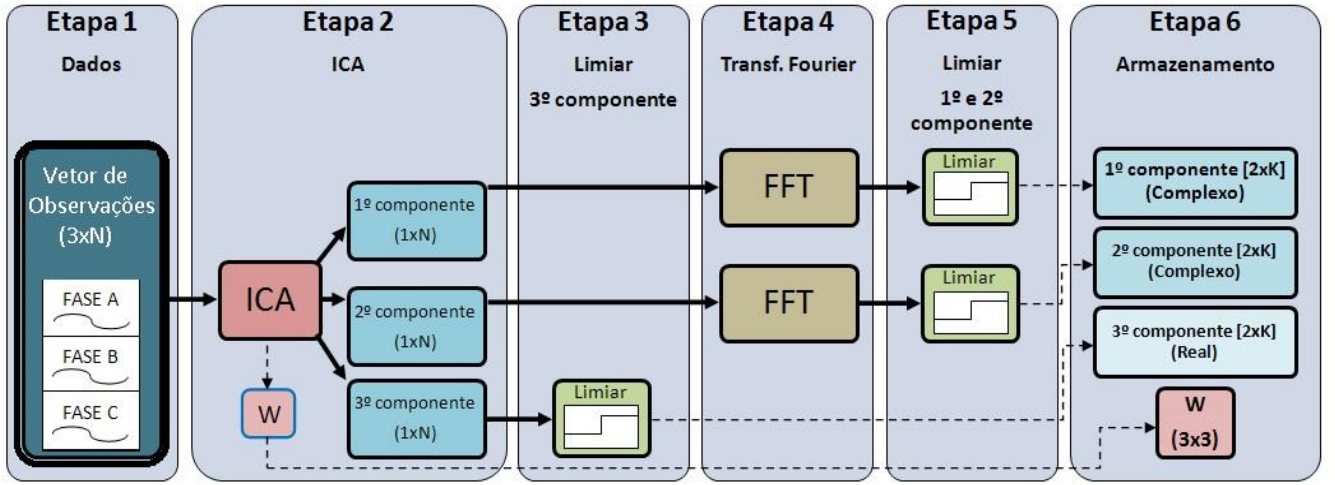


Fig.1. Diagrama das etapas do método

A seção 3 (base de dados), descreve as características dos dados utilizados para a avaliação dos métodos. Em resultados e discussões (seção 4), apresenta-se um exemplo de aplicação do método, com o intuito de apresentar as etapas envolvidas e descrever os resultados nos testes. Por fim, na seção 5 (conclusão), os principais resultados do trabalho são apresentados.

II. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto consiste em seis etapas, conforme Fig.1. Na primeira etapa, um segmento do sinal de tensão de cada fase do sistema elétrico ($v[n]$, $n = 1, \dots, N$ amostras discretas no tempo) é recortado de forma sincronizada e agrupado, constituindo assim, a matriz de observações:

$$\mathbf{x}[n] = [v_a[n]; v_b[n]; v_c[n]]^T; \quad (1)$$

onde, $v_a[n]$, $v_b[n]$ e $v_c[n]$ são as formas de onda da tensão de fase a , b e c do sistema elétrico.

Na segunda etapa, o vetor de observações é apresentado ao algoritmo ICA, que realiza uma transformação linear, definida por, $\mathbf{y}[n] = \mathbf{W}\mathbf{x}[n]$, onde,

$$\mathbf{y}[n] = [y_1[n]; y_2[n]; y_3[n]]^T \quad (2)$$

é o vetor de componentes independentes e $\mathbf{W}$ é a matriz de separação, ou matriz de transformação que é obtida através do processamento dos dados por um algoritmo de ICA.

No presente trabalho, para a obtenção de $\mathbf{W}$, foram testados dois algoritmos de ICA, o SOBI, do inglês "Second Order Blind", e o algoritmo aproximado de diagonalização de Auto matrizes JADE, do inglês "Joint Approximate Diagonalization of Eigen-Matrices" [13]. O algoritmo JADE apresentou maior eficiência nos resultados do problema, motivo pelo qual foi escolhido para os procedimentos do trabalho.

As duas primeiras componentes possuem informações importantes sobre: a componente fundamental, o distúrbio e o ruído. Portanto, nenhum dado poderá ser descartado para que a reconstituição seja possível no futuro.

Como o ruído e o distúrbio presentes nos sinais elétricos são estatisticamente independentes da componente fundamental (60 Hz), o algoritmo ICA utilizado, os isola na terceira componente. Assim, nesta etapa, descartam-se as amostras irrelevantes (ruídos), e apenas as informações importantes (distúrbios) são mantidas.

Um limiar é definido automaticamente usando as operações de dilatação e erosão (morfologia matemática) de forma simplificada, como proposto em [2].

Todos os valores abaixo do limiar, na terceira componente independente, são descartados no armazenamento dos dados e substituídos por zeros para a reconstrução das observações, o que é feito pela operação $\mathbf{x}[n] = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{y}[n]$.

Na quarta etapa, nas duas primeiras componentes independentes são aplicadas a FT usando o algoritmo da FFT. Os dados são apresentados em função da frequência, o que possibilita distinguir os componentes do sinal que são de interesse. A partir dos espectros em frequência obtidos, aplicam-se dois limiares, e substituem-se por 0 dados com amplitudes inferiores ao limiar definido em cada espectro. A reconstrução das observações é feita utilizando a Transformada Inversa de Fourier (IFFT).

A última etapa é o armazenamento de dados, em que os dados resultantes do processo são salvos para futuras análises. Duas matrizes contendo números complexos e não-nulos provenientes do limiar após a FFT, uma matriz contendo as informações úteis da terceira componente e a matriz de transformação $\mathbf{W}$ são armazenadas. As matrizes de números complexos são de ordem $2 \times K$, onde a primeira linha corresponde aos valores não nulos dos componentes (K valores) e a segunda linha contém as posições das amostras correspondentes

aos valores da primeira linha. A Fig. 1 ilustra todas as etapas descritas acima.

III. BASE DE DADOS

Sinais sintéticos de tensão trifásicos foram gerados com frequência de amostragem f_s de 15.360 Hz corrompidos por sete tipos diferentes de distúrbios de QEE: transitório oscilatório, interrupção longa, interrupção curta, afundamento de tensão (Sag), elevação de tensão (Swell), transições rápidas e sucessivas de tensão (Notch) e variações bruscas de tensão (Spike).

Os sinais nominais (sem distúrbios) foram gerados com frequência de 60 Hz, amplitude nominal de 1 p.u., fase variando de $-\pi$ à π com um ruído aditivo $r(n)$ de distribuição normal $N(0; \sigma_r^2)$ e com uma relação sinal-ruído, em inglês "Signal-to-noise ratio" (SNR), de 30 dB. Estes sinais foram gerados via MatLab®.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fig. 2 é apresentado um distúrbio transitório oscilatório acometendo as três fases do sistema. Estes sinais foram apresentados ao método proposto.

O vetor de observações $x[n]$ foi construído para $N = 1.024$ amostras de acordo com (1) e apresentado ao algoritmo ICA.

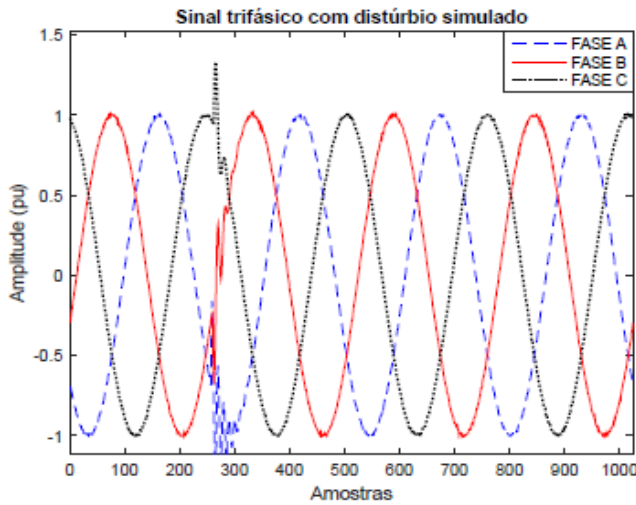


Fig. 2. Sinal trifásico com distúrbio transitório.

Na Fig. 3 é mostrada as componentes independentes obtidas pelo algoritmo ICA. Observa-se que a terceira componente (em (c)) apresenta apenas ruído e uma parcela dominante do distúrbio transitório oscilatório.

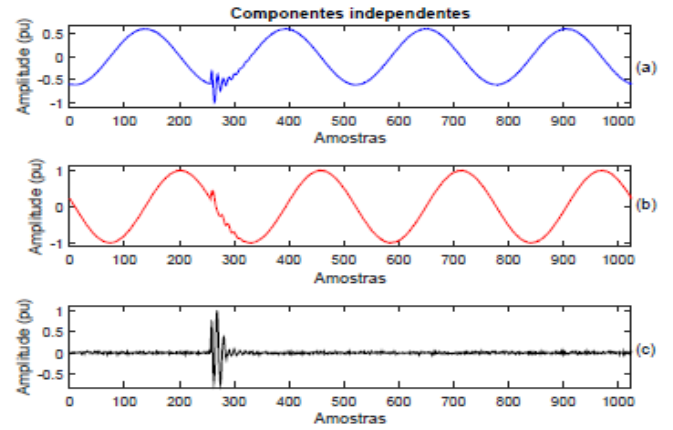


Fig. 3. (a) Primeiro componente; (b) Segundo componente e (c) Terceira componente.

Com o intuito de eliminar apenas o ruído presente no terceiro componente independente, Fig. 3 (c), um limiar foi definido usando morfologia matemática, de forma que as amostras com valores menores do que esse limiar (referentes a ruídos) sejam descartadas e as demais amostras (referentes ao transitório) sejam armazenadas. O limiar obtido é mostrado na Fig. 4 (a), e o resultado da aplicação do mesmo em na Fig. 4. (b).

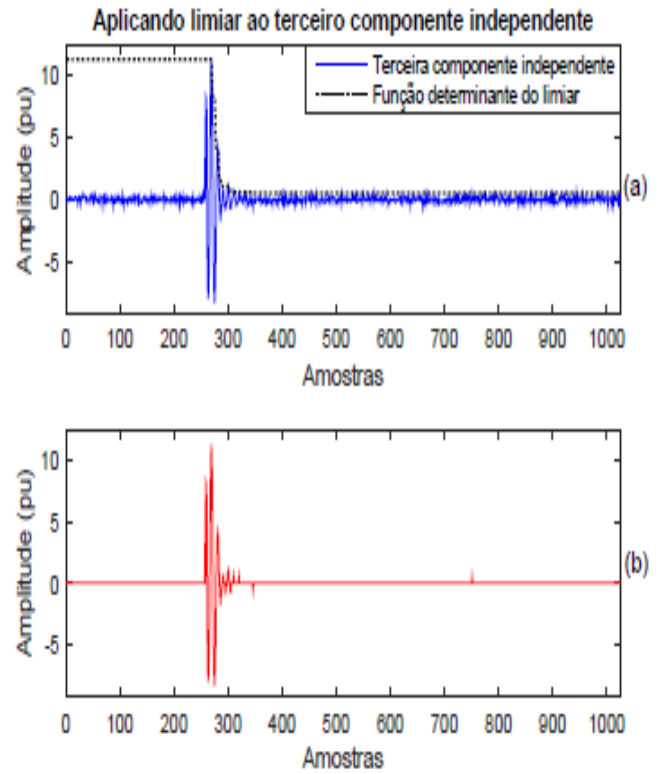


Fig. 4. (a) Terceira componente anterior ao limiar e (b) Terceira componente posterior ao limiar.

Nas Fig. 5 (a) e (b) são apresentados os resultados da aplicação do algoritmo FFT nas duas primeiras componentes independentes mostradas nas Figuras 3 (a) e (b). Observa-se que duas regiões do espectro se destacam por amplitudes mais elevadas. Com o intuito de manter apenas esses componentes de amplitude mais significativa, limiares são aplica-

dos, resultando nos dados mostrados nas Fig. 5 (c) e (d).

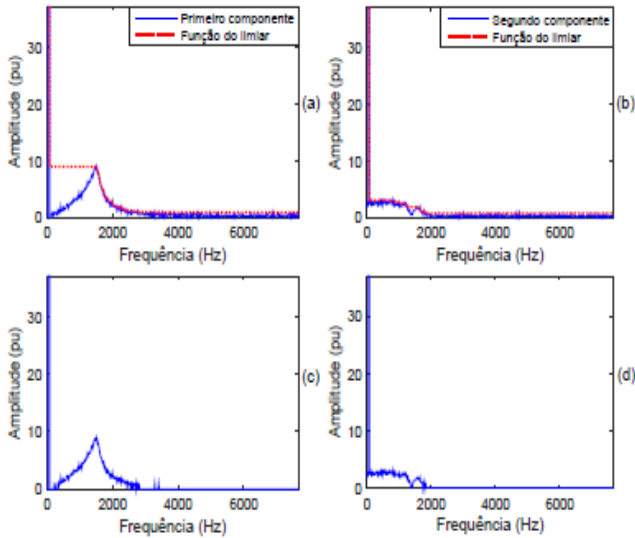


Fig.5. (a) Primeira componente e limiar; (b) Segunda componente e limiar; (c) Resultado da aplicação do limiar na primeira componente; e (d) Resultado da aplicação do limiar da segunda componente.

Na Fig. 6 mostram-se os sinais de tensão trifásicos reconstruídos utilizando apenas os dados comprimidos e armazenados. Uma compressão de 40%, ou seja, uma relação de compressão de 5:3 foi obtida. Essa relação de compressão é mantida sempre que distúrbios transitórios oscilatórios trifásicos são processados.

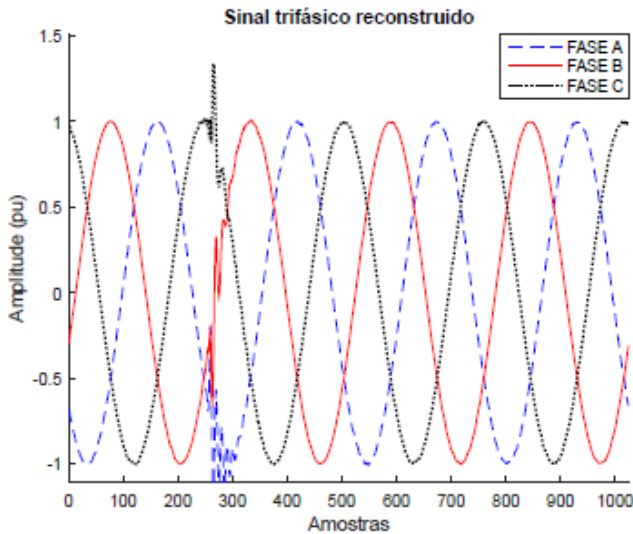


Fig.6. Reconstrução dos sinais após a compressão dos dados.

Nas figuras, Fig.7(a), Fig.8(a), Fig.9(a) e Fig.10(a), apresentam-se os sinais gerados com distúrbios de: Interrupção, Interrupção curta, Sag e Swell, e nas figuras, Fig.7(b), Fig.8(b), Fig.9(b) e Fig.10(b), os resultados ao aplicar o método proposto.

Dois casos especiais, sinais com os distúrbios Notch e Spike, não apresentaram resultados satisfatórios utilizando o método proposto. A aplicação do limiar para esses dois casos deve possuir características construtivas diferentes, para que

o método possa convergir para uma taxa de compressão satisfatória e com pouca perda de dados.

O problema do algoritmo aplicado ao sinal com o distúrbio do tipo Spike ocorre na etapa 3 (vide Fig. 1) em que o limiar é automaticamente calculado e aplicado à terceira componente resultante do ICA. As características dos sinais são mantidas, mas o posicionamento do distúrbio é alterado e com isso o sinal é reconstruído de maneira incorreta. No sinal com o distúrbio do tipo Notch, o erro do algoritmo se apresenta na aplicação do limiar na etapa 5 (vide Fig. 1) onde o limiar é calculado e aplicado ao sinal no âmbito da frequência. Neste caso, alguns dados importantes do distúrbio são perdidos e a reconstrução ocorre com erro nas amostras em que o distúrbio se apresenta, resultando em uma reconstrução incorreta. Nos dois casos a solução encontrada foi alterar a parte do algoritmo que calcula os limiares, alterando constantes que afetam o cálculo iterativo do algoritmo que define os limiares. Com esses novos algoritmos foi possível reconstruir os sinais com compactação (caso do Spike) e no máximo sem perda de dados (caso do Notch). As Fig. 9 (a) e (b), mostram os sinais gerados para esses dois casos e as Fig. 10 (a) e Fig. 10 (b), apresentam as reconstruções desses sinais após o uso de algoritmos de aplicação de limiares específicos.

Na Tabela I apresentam-se os tamanhos dos dados originais (matriz com os dados das fases do sinal em três vetores) e dos dados salvos após compressão, além da relação média de compressão. Na Tabela II é apresentada uma métrica de qualidade de reconstrução, utilizando os dados de energia do sinal original e do sinal reconstruído.

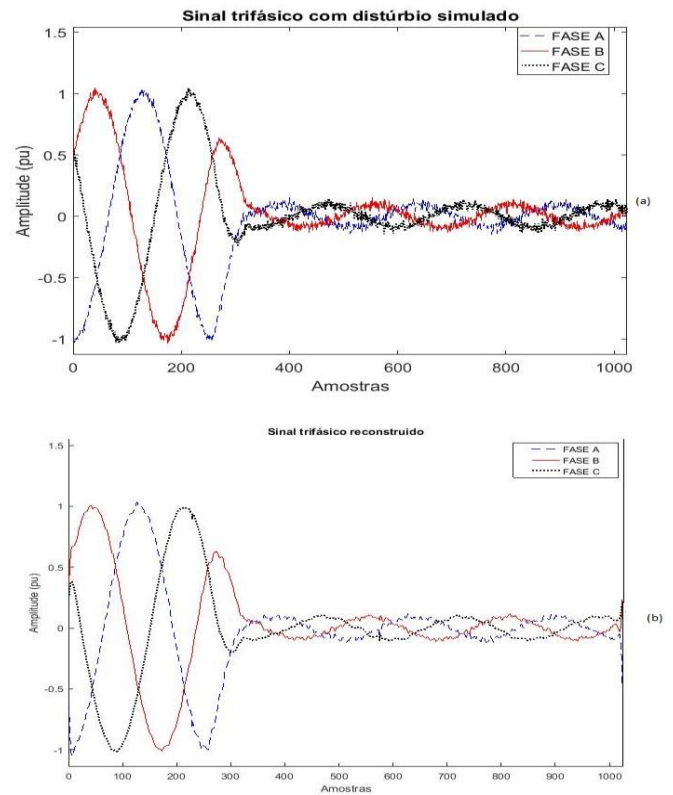


Fig. 7. Sinal trifásico com distúrbios: Interrupção (a) Sinal original; (b) Sinal reconstruído.

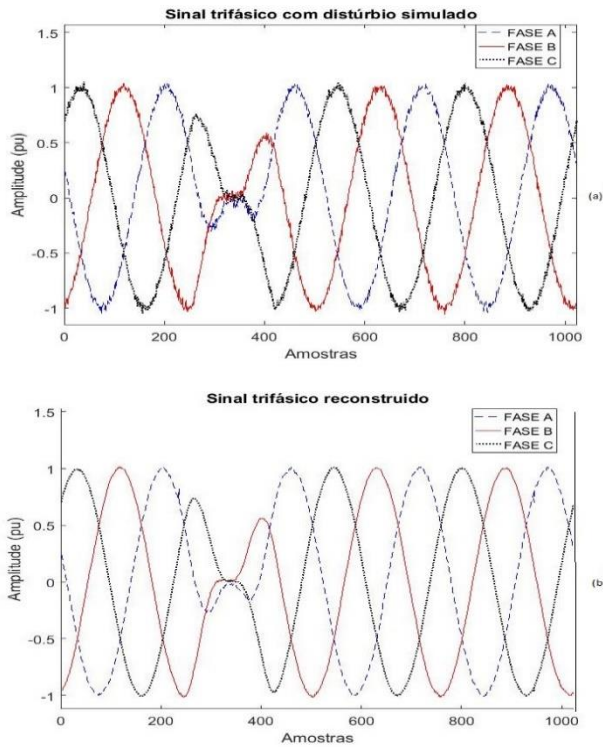


Fig. 8. Sinal trifásico com distúrbios: Interrupção curta; (a) Sinal original; (b) Sinal reconstruído.

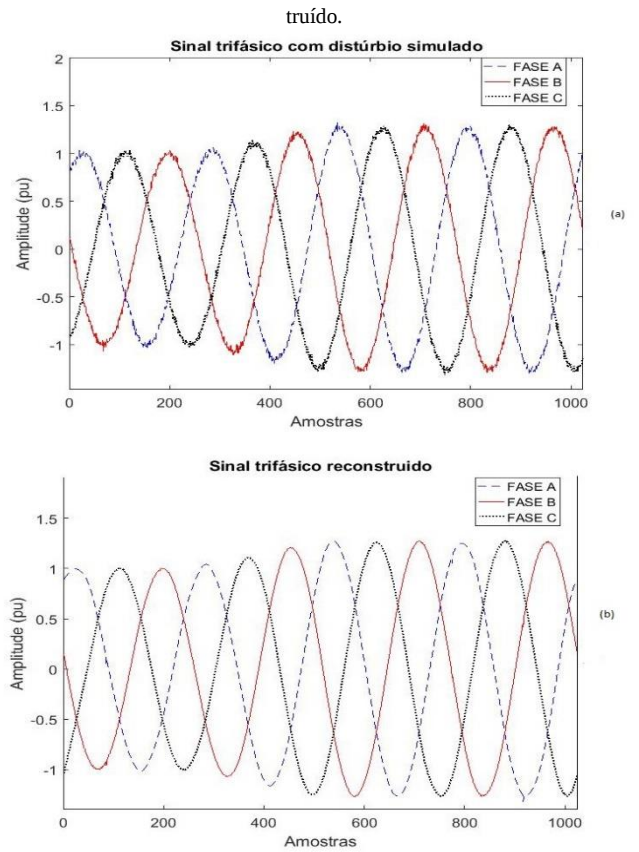


Fig. 10. Sinal trifásico com distúrbios: Swell (a) Sinal original; (b) Sinal reconstruído.

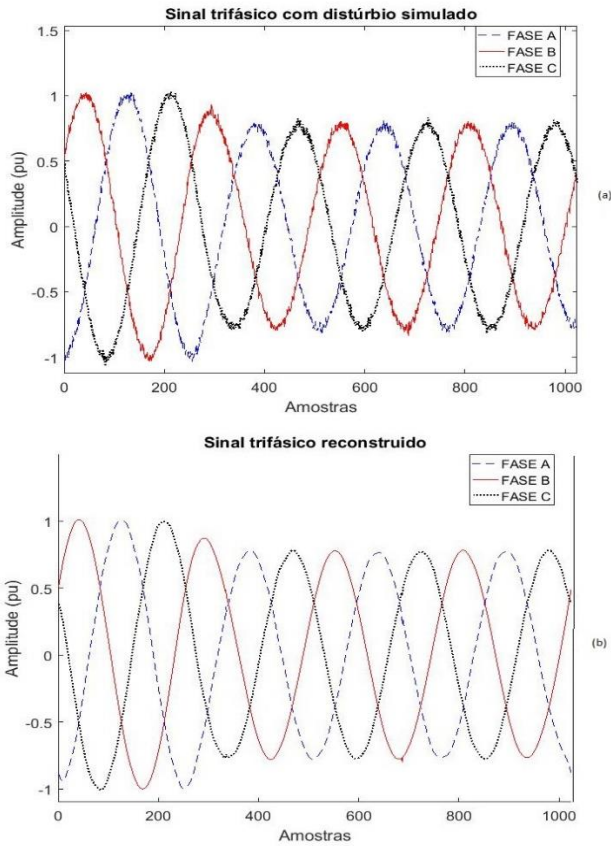


Fig. 9. Sinal trifásico com distúrbios: Sag (a) Sinal original; (b) Sinal recons-

TABELA I. DADOS DA COMPRESSÃO PARA CADA DISTÚRBIO.

Tipo de Distúrbio	Dados Originais (Bytes)	Dados Salvos (Bytes)	Relação Média de Compressão
Transitório	24.576	13.832	5:3
Interrupção	24.576	7.880	3:1
Interrupção Curta	24.576	2.984	10:1
Sag	24.576	2.472	6:1
Swell	24.576	4.520	5:1
Notch	24.576	23.704	1:1
Spike	24.576	5.560	4:1

TABELA II. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE COMPRESSÃO PARA CADA DISTÚRBIO.

Tipo de Distúrbio	Energia original (und. de energia 10^3)	Energia final (und. de energia 10^3)	Energia mantida (%)
Transitório	1.5515	1.5498	99,98%
Interrupção	0.4187	0.4167	99,53%
Interrupção curta	1.3606	1.3590	99,89%
Sag	0.8861	0.8822	99,55%
Swell	2.8735	2.8711	99,92%
Notch	1.5145	1.5114	99,80%
Spike	1.5536	1.5693	101,01%

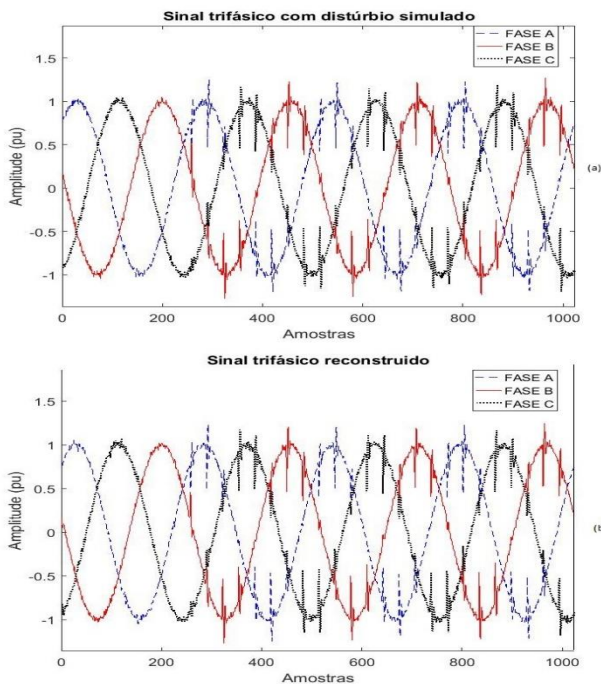


Fig. 11. Sinal trifásico com distúrbios: Notch (a) Sinal original; (b) Sinal reconstruído.

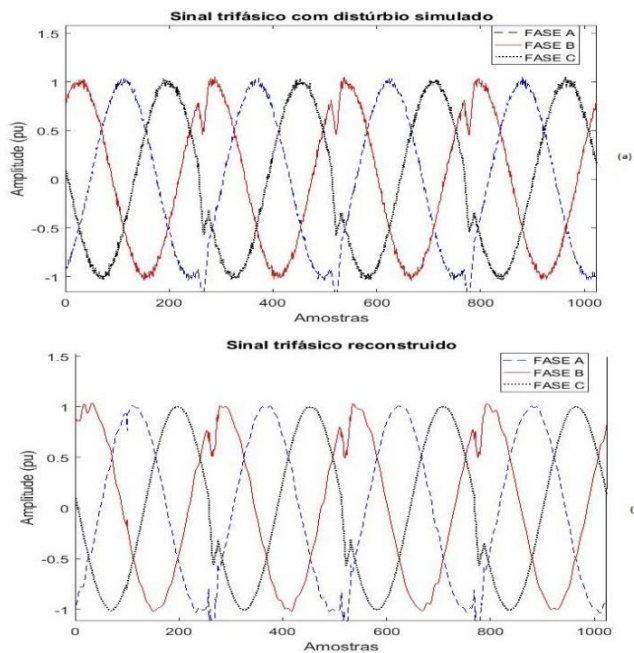


Fig. 12. Sinal trifásico com distúrbios: Spike (a) Sinal original; (b) Sinal reconstruído.

V. CONCLUSÃO

O método apresentou resultados promissores sobre a compactação de sinais trifásicos com diversos tipos de distúrbios de QEE. Os resultados obtidos são similares aos obtidos por métodos que a literatura oferece em alguns casos. Porém, o método faz uso de técnicas de processamento simples baseados em ICA, FT e limiares automáticos, que possuem características e etapas de execução com complexidade inferior aos métodos da literatura, consequentemente é uma alternati-

va interessante visando aplicações em Smart Grids. Para a evolução do método, estudos de aprimoramento nos algoritmos de determinação automática de limiares devem ser desenvolvidos, pois eles são extremamente importantes para a melhoria da taxa de compressão.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Tcheou, M. P., Lovisolo, L., Ribeiro, M. V., da Silva, E. A. B., Rodrigues, M. A. M., Romano, J. M. T. e Diniz, P. S. R. (2014). The compression of electric signal waveforms for smart grids: State of art and future trends, *IEEE Transactions on Smart grids* 5: 291-302.
- [2] Ribeiro, P. F., Duque, C. A., Silveira, P. M. e Cerqueira, A. S. (2013). *Power Systems Signal Processing for Smart Grids*, Jhon Siley & Sons LTD, Chuchester United Kingdon.
- [3] Ribeiro, M. V., Romano, J. M. T. e Duque, C. A. (2004). An improved method for signal processing and compression in power quality evaluation, *IEEE Transaction on Power Delivery* 19(2): 464-471.
- [4] Ribeiro, M. V., Romano, J. M. T. e Mitra, S. K. (2007). A novel mdl-based compression method for power quality applications, *IEEE Transaction on Power Delivery* 22(1): 27-36.
- [5] Santoso, S., Powers, E. J. e Grady, W. M. (1997). Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods, *IEEE Transaction on Power Delivery* 12(3): 1250-1257.
- [6] Hyvarinen, A., Karhunen, J. e Oja, E. (2001). *Independent Component Analysis*, Wiley-Interscience.
- [7] Radil, T., Ramos, P. M., Janeiro, F. M. e Serra, A. C. (2008). Pq monitoring system for real time detection and classification of disturbances in single phase power system, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57(8): 1725-1733.
- [8] C. Hsieh and S. Huang, "Disturbance data compression of a power system using the huffman coding approach with wavelet transform enhancement," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, pp. 7-14, 2003.
- [9] S.-J. Huang and M.-J. Jou, "Application of arithmetic coding for electric power disturbance data compression with wavelet packet enhancement," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004.
- [10] G. Panda, P. Dash, A. Pradhan, and S. Meher, "Data compression of power quality events using the slantlet transform," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002.
- [11] F. Lorio and F. Magnago, "Analysis of data compression methods for power quality events," in *Power Engineering Society General Meeting*, 2004. IEEE, 2004.
- [12] P. Pillay and A. Bhattacharjee, "Application of wavelets to model shortterm power system disturbances," *IEEE Transactions on Power Systems*, Nov 1996.
- [13] J.-F., Cardoso and A., Souloumiac, Blind Beamforming for Non Gaussian Signals, *IEE- Proceedings-F*, vol.140, no 6 pp.362-370. Dec. 1993.
- [14] S. Santoso, E. Powers, and W. Grady, "Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997.