

MÉTODO DE ANÁLISE DE DISTÚRBIOS EM SINAIS DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM ESTATÍSTICAS DE ORDEM SUPERIOR

PEDRO HENRIQUE GALDINO BOUZON*, BELISÁRIO NINA HUALLPA*, DANTON DIEGO FERREIRA*,
FÁBIO DOMINGUES DE JESUS*

**Endereço do Pedro, Belisário, Danton e Fábio
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

Emails: peubouzon@gmail.com, beli@fem.unicamp.br, danton@deg.ufla.br,
fabio.jesus@deg.ufla.br

Abstract— The power quality can be defined by the delivery of energy in form of a pure sinusoidal wave, with no changes in frequency or amplitude. With the crescent use of embedded electronics, equipment has become more sensitive to disturbances, what motivates the study in methods to detect them. For this purpose, signals with and without disturbances were simulated using MATLAB. Higher-order statistics (HOS) were used to extract features from these signals and the Fisher's Discriminant Ratio (FDR) was used to select the best features. After this steps, a reduced feature space was achieved, showing good separability between classes. Promising results were achieved and have shown linear separability between the majority of the classes considered.

Keywords— Power Quality, Higher Order Statistics, Pattern Recognition.

Resumo— A qualidade da energia elétrica pode ser caracterizada pelo fornecimento de energia na forma de uma onda senoidal pura, sem alterações na frequência e amplitude. Com o crescente uso da eletrônica embarcada, os equipamentos se tornaram mais sensíveis a distúrbios, o que motiva o estudo de métodos para detectá-los. Para tal, sinais com e sem distúrbios foram simulados, foi utilizado estatísticas de ordem superior para extrair características dos sinais e o método do discriminante linear de Fisher para selecionar as melhores características, criando um espaço reduzido de características a partir destas que mostre separabilidade entre as classes. Os resultados são promissores e apontam para separações lineares para a maioria das classes de distúrbios abordadas.

Palavras-chave— Qualidade de energia elétrica, Estatística de ordem superior, Reconhecimento de padrões.

1 Introdução

Em um sistema elétrico de energia, a dinâmica de operação dos equipamentos elétricos e o crescente uso de cargas não lineares, frequentemente causam distúrbios na qualidade de energia elétrica. Existem várias definições sobre o termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) encontradas na literatura (Bollen et al., 2009). Este trabalho usa a definição dada por (Arrillaga et al., 2000), que define que QEE está diretamente associada à qualidade da forma de onda do sinal de tensão elétrica. A partir desta definição, os principais distúrbios encontrados nos sinais elétricos são oscilações transitórias, afundamentos e elevações de tensão, harmônicos, notchs, spikes, etc. A QEE é uma linha de pesquisa cuja atenção vem crescendo principalmente devido às seguintes razões: 1. Rápida expansão de dispositivos eletrônicos de potência, que levam a difusão de cargas não lineares e variantes no tempo na rede elétrica; 2. O crescente uso de dispositivos eletrônicos de precisão, que requerem fontes de energia com alta qualidade; 3. A necessidade de localizar a fonte dos distúrbios para resolvê-los rapidamente; e 4. Grandes perdas financeiras para os consumidores, em especial para a indústria.

A extração de características é um passo essencial em direção à detecção e classificação de distúrbios. Ela é baseada em conhecimentos subjetivos de especialistas ou informações objetivas extraídas de sinais de tensão. Em relação às in-

formações objetivas, características podem ser extraídas sem considerar a natureza específica dos sinais de tensão, por exemplo, por meio de transformações de sinais, que incluem a Transformada Discreta de Fourier e Wavelets ou métodos estatísticos, como Estatística de Segunda Ordem e Valor Médio Quadrático (Bollen et al., 2009). Vários trabalhos encontrados na literatura mostraram que os métodos baseados na Transformada Wavelet Discreta (Mallat, 1999) e na Transformada S (Stockwell et al., 1996) são técnicas eficientes de extração de características de distúrbios de qualidade de energia. Isto se deve principalmente pela capacidade destes métodos de representar as componentes de frequência dos sinais, sem com isto perder as informações referentes ao domínio do tempo (Mishra et al., 2008). Apesar disto, dificuldades podem surgir, no uso das transformadas, quando os sinais estão corrompidos com ruído, ou quando o número de amostras do sinal é pequeno (Ferreira et al., 2011).

A proposta deste trabalho é investigar a capacidade das Estatísticas de Ordem Superior (EOS) de distinguir os distúrbios de QEE por meio de um espaço de características reduzido. A partir deste espaço de características pode-se propor detectores de distúrbios com melhor desempenho e menor complexidade computacional. O método conhecido como Razão de Discriminação de Fisher (FDR) foi empregado para a seleção das melhores características. O uso de EOS se mostra interes-

sante uma vez que os cumulantes não são sensíveis a ruído branco (Mendel, 1991), como acontece com outras técnicas de processamento de sinais, como é o caso da Transformada Wavelet.

2 Método proposto

O método proposto é representado na figura 1. Primeiramente, um conjunto de sinais pertencentes às classes sem distúrbio (C1) e com distúrbio (C2) são gerados. A seguir, calcula-se os cumulantes de 2ª, 3ª e 4ª ordem para cada classe, o resultado é um grande conjunto de características. Logo após, o critério do discriminante linear de Fisher (DLF) é aplicado, com o intuito de determinar os cumulantes que geram maior distinção entre as classes. Feito isto, um espaço de seleção de características é gerado, tendo como dimensões os dois melhores cumulantes selecionados pelo DLF.

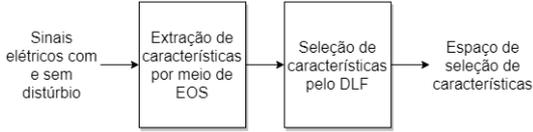


Figura 1: Método de extração de características baseado em EOS.

2.1 Modelagem

As ferramentas de simulação mais utilizadas para analisar eventos em sistemas de energia são o PSCAD/EMTDC, o ATP/EMTP e o MATLAB/Simulink. Neste trabalho, utiliza-se o MATLAB em conjunto com modelos matemáticos para simular os distúrbios elétricos, conforme apresentado em (Khokhar et al., 2014).

2.2 Cumulantes

Cumulantes são funções estatísticas que fornecem o grau de dependência entre duas variáveis aleatórias. As expressões para os cumulantes de segunda, terceira e quarta ordem de um vetor $x(n)$ que contém N amostras de um evento, com média nula, são definidas por (Ferreira et al., 2009):

$$C_{2,x}(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(\text{mod}(n+i, N)) \quad (1)$$

$$C_{3,x}(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^2(\text{mod}(n+i, N)) \quad (2)$$

$$C_{4,x}(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^3(\text{mod}(n+i, N)) - 3 \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(\text{mod}(n+i, N)) \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (3)$$

onde $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e a função $\text{mod}(a, b)$ é a função que retorna o resto inteiro da divisão de a por b .

2.3 Discriminante linear de Fisher

Para reduzir as dimensões das características extraídas pela EOS e conseqüentemente o esforço computacional, o Discriminante Linear de Fisher (DLF) é utilizado. A partir dele, é possível selecionar um conjunto finito de características que fornecem uma boa separabilidade entre duas classes. O vetor de custo da função DLF é dado por:

$$\mathbf{J}_c = (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2)^2 \odot \frac{\mathbf{1}}{(\mathbf{D}_1^2 + \mathbf{D}_2^2)} \quad (4)$$

onde $\mathbf{J}_c = [\mathbf{J}_1 \dots \mathbf{J}_L]^T$ é um vetor cujos elementos representam quão boa é a separabilidade entre as classes para uma dada característica e L é o número total de características. As variáveis \mathbf{m}_1 e \mathbf{m}_2 e \mathbf{D}_1 e \mathbf{D}_2 representam a média e variância dos vetores de características para a primeira e segunda classe respectivamente e o símbolo \odot representa ao produto de Hadamard.

3 Resultados e discussão

Neste trabalho cinco distúrbios foram analisados: afundamento e elevação de tensão, harmônicos, interrupção e transitórios. Os eventos foram simulados de acordo com os modelos descritos em (Khokhar et al., 2014), com frequência de amostragem de 15360 amostras/s, com um total de 1400 amostras. O sinal fundamental de tensão foi modelado como uma senóide de 60 Hz, com amplitude de 1 p.u. A amplitude dos distúrbios foram dadas em percentual, tomando o sinal fundamental como base. Um total de 50 eventos foram gerados, para as classes com e sem distúrbio; e todos receberam a adição de ruído Gaussiano, com relação sinal ruído (RSR) de 30dB.

Os cumulantes de 2º, 3ª e 4ª ordem dos eventos referentes às duas classes foram calculados, sendo armazenados em dois vetores, denominados C1 para a classe sem distúrbio e C2 para a classe com distúrbio. Aplicando a função DLF nos cumulantes C1 e C2, obtêm-se um terceiro conjunto de dados, os quais são armazenados no vetor J. Os melhores cumulantes são aqueles cujo resultado do função DLF entre C1 e C2 apresenta os maiores valores.

A partir dos dois melhores cumulantes, cria-se um espaço de seleção de características, onde cada dimensão é um cumulante. Com C_x sendo o melhor cumulante e C_y o segundo melhor, estes dados foram dispostos em um gráfico, para se observar a eficiência do método na separabilidade entre classes. Nestes gráficos, os cumulantes da classe sem distúrbio são representados por quadrados azuis e

os da classe com distúrbio por hexágonos vermelhos.

3.1 Harmônicos

Nesta simulação, os harmônicos de 3ª e 5ª ordem foram adicionados ao sinal fundamental de tensão (1º harmônico), com amplitude relativa de 5%. Na Figura 2, são mostrados os sinais com e sem distúrbio. A curva em linha contínua representa o sinal com distúrbio e a curva em linha tracejada o sinal sem distúrbio.

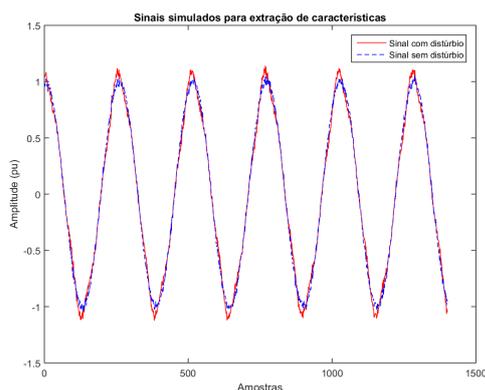


Figura 2: Simulação de sinal elétrico com presença de harmônicos (linha contínua) e do sinal fundamental de tensão (linha tracejada).

Para execução do método, são utilizadas características das duas classes de eventos, uma com distúrbio e outra sem. Estes dados são obtidos por meio do cálculo dos cumulantes dos sinais apresentados na Figura 2. As características da classe $C1$ são os cumulantes de 2ª, 3ª e 4ª ordem do sinal sem distúrbio e as da classe $C2$ são os cumulantes do sinal com distúrbio. O próximo passo é selecionar as melhores características por meio do DLF. Para isto, foi utilizada a equação (4).

A Figura 3 mostra os resultados da equação (4). Esta figura possui três quadros, que são referentes aos cumulantes de 2ª, 3ª e 4ª ordem da esquerda para a direita. Os cumulantes são calculados em torno de cada amostra do sinal, então, para um evento com 1400 amostras, tem-se 1400 cumulantes de cada ordem. A função DLF indica quão boa é a distinção entre as classes dada por cada cumulante. Observa-se na Figura 3 que os maiores valores ocorrem para os cumulantes de 4ª ordem, portanto, os melhores cumulantes são selecionados desta ordem.

Com os dois melhores cumulantes determinados, um espaço de seleção de características é criado a partir destes. O resultado é mostrado na Figura 4. Nesta figura, C_x representa a dimensão formada pelo melhor cumulante e C_y pelo segundo melhor. Observa-se uma clara separação entre as classes sem distúrbio, representada por quadrados

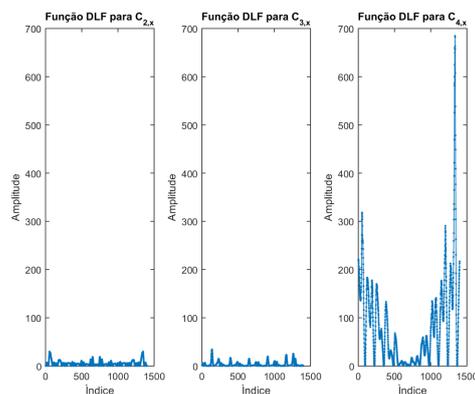


Figura 3: Função DLF aplicada às características extraídas para as classes com e sem harmônicos.

azuis, e com distúrbio, representada por hexágonos vermelhos.

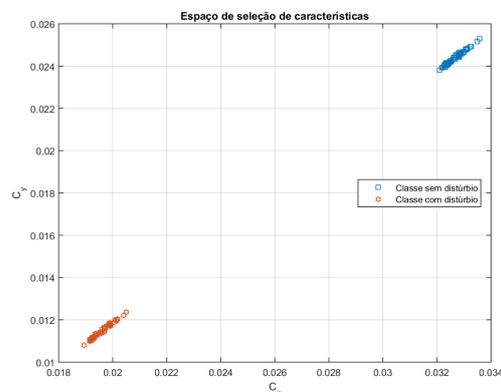


Figura 4: Espaço de seleção de características para distinção entre a classe que possui distorção harmônica (hexágonos vermelhos) e a que não possui (quadrados azuis).

3.2 Interrupção de tensão

A interrupção de tensão pode ser observada na Figura 5, na qual o sinal sofre uma redução drástica de amplitude. Nesta figura, o sinal de tensão fundamental está em linha tracejada e o sinal com distúrbio em linha contínua.

Seguindo o mesmo método exposto na seção da distorção harmônica, a função DLF para este distúrbio é apresentada na Figura 6 e o espaço de seleção de características na Figura 7.

A Figura 6 mostra o DLF entre os cumulantes dos sinais com e sem distúrbio. Os cumulantes para o qual os maiores valores ocorrem são de segunda ordem; e estes são usados para gerar um espaço de seleção de características. Tal espaço é apresentado na Figura 7. Nela, observa-se que os pontos azuis, referentes à classe sem distúrbio, estão separados dos hexágonos vermelhos, que representam os sinais com interrupção de tensão.

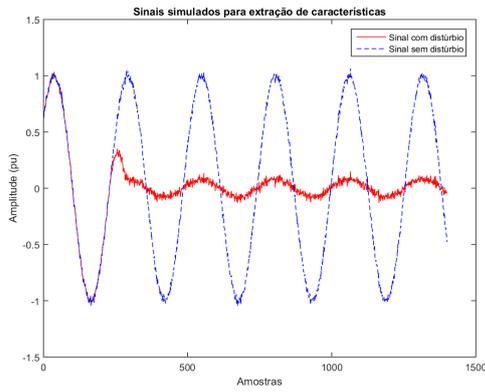


Figura 5: Simulação de sinal elétrico com interrupção (linha contínua) e do sinal fundamental de tensão (linha tracejada).

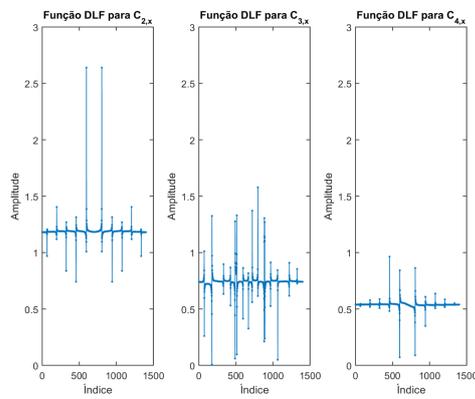


Figura 6: Função DLF aplicada às características extraídas para as classes com e sem interrupção de tensão.

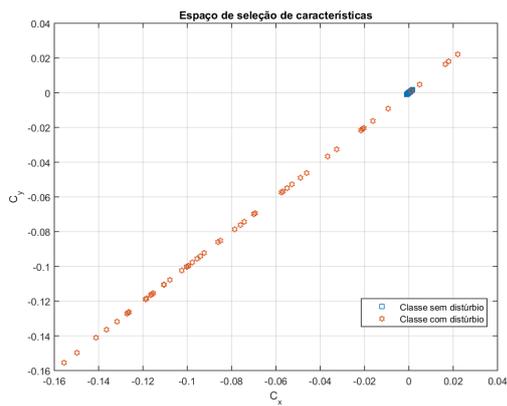


Figura 7: Espaço de seleção de características para distinção entre a classe em que ocorre interrupção de tensão (hexágonos vermelhos) e a que não ocorre (quadrados azuis).

3.3 Interrupção curta

Nesta simulação, a interrupção ocorre de forma momentânea, retornando à condição normal após

100 amostras. A Figura 8 mostra este distúrbio.

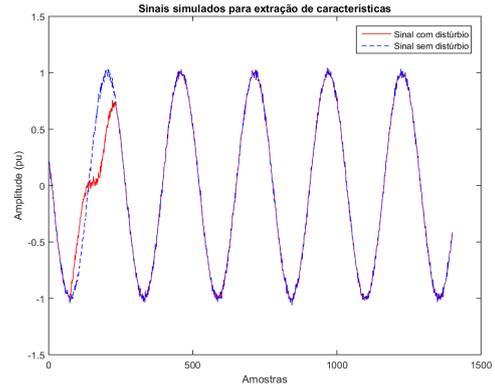


Figura 8: Simulação de sinal elétrico com interrupção curta (linha contínua) e do sinal fundamental de tensão (linha tracejada).

O resultado da função DLF é apresentado na Figura 9. O maior valor ocorre para um cumulante de terceira ordem e o segundo maior para um de quarta ordem. O espaço gerado por estes cumulantes é mostrado na Figura 10. A separação entre as classes é nítida.

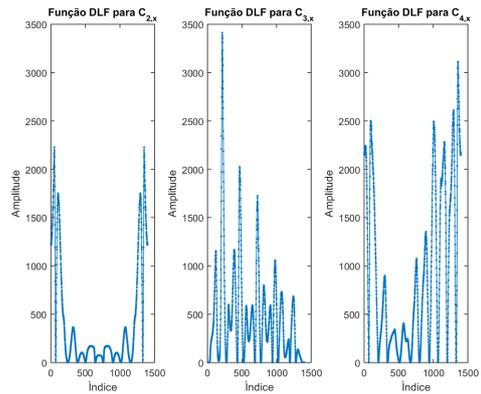


Figura 9: Função DLF aplicada às características extraídas para as classes com e sem interrupção curta de tensão.

3.4 Elevação de tensão

Na Figura 11, pode ser observado a elevação de tensão. Nela a tensão sofre um aumento de 8% em relação à amplitude do sinal fundamental.

A Figura 12 apresenta a função DLF dos cumulantes dos sinais com e sem distúrbio. Nesta figura, é possível observar que os melhores cumulantes são selecionados do quadro da esquerda, que representa os de segunda ordem.

A Figura 13 apresenta o espaço de seleção de características, criado a partir dos melhores cumulantes. Uma análise desta figura indica que as classes são facilmente separáveis neste espaço.

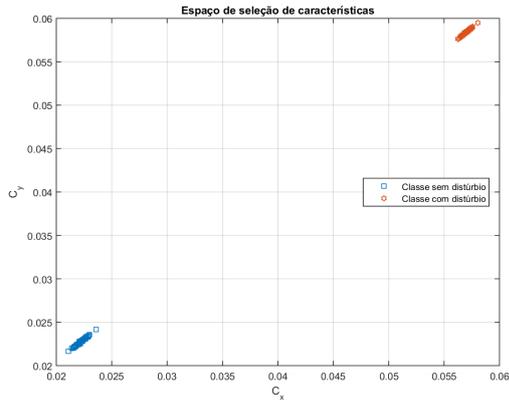


Figura 10: Espaço de seleção de características para distinção entre a classe que possui distorção harmônica (hexágonos vermelhos) e a que não possui (quadrados azuis).

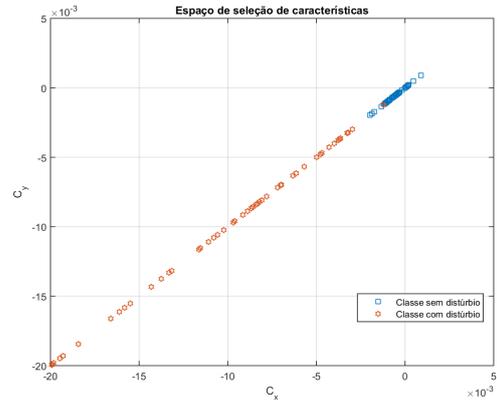


Figura 13: Espaço de seleção de características para distinção entre a classe em que ocorre a interrupção curta de tensão (hexágonos vermelhos) e a que não ocorre (quadrados azuis).

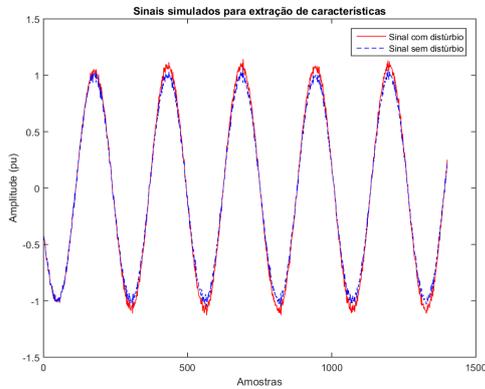
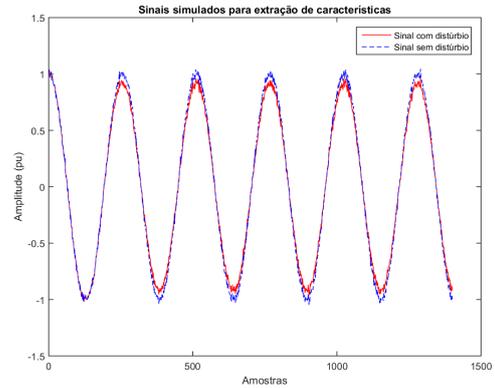


Figura 11: Simulação de sinal elétrico com elevação de tensão (linha contínua) e do sinal fundamental de tensão (linha tracejada).



evento, a amplitude do sinal foi reduzida em 8%, o que é mostrado na Figura 14. A Figura 15 apre-

Figura 14: Simulação de sinal elétrico com afundamento de tensão (linha contínua) e do sinal fundamental de tensão (linha tracejada).

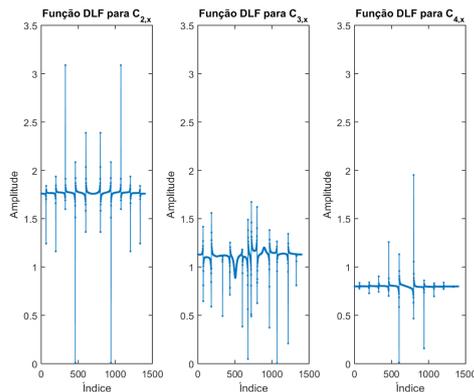


Figura 12: Função DLF aplicada às características extraídas para as classes com e sem elevação de tensão.

3.5 Afundamento de tensão

O afundamento de tensão representa uma diminuição da amplitude do sinal de tensão. Neste

evento, a amplitude do sinal foi reduzida em 8%, o que é mostrado na Figura 14. A Figura 15 apresenta a função DLF dos cumulantes. Os melhores cumulantes são selecionados do quadro do meio, referente à terceira ordem. O espaço de seleção de características é mostrado na Figura 16. Nela, nota-se que os quadrados azuis estão separados dos hexágonos vermelhos o que indica que o distúrbio pode ser detectado. Apesar disso, a separação não é tão nítida quanto nos casos anteriores.

3.6 Oscilações transitórias

Para simulação das oscilações transitórias, a frequência de oscilação o fator de amortecimento adotados foram, respectivamente, dados por um número aleatório entre 1000 e 2500 Hz e outro entre 400 e 1000. A simulação é mostrada na Figura 17. Na Figura 18, é apresentado o resultado da função DLF. Nela, observa-se que os cumulantes de segunda ordem são os que melhor distinguem

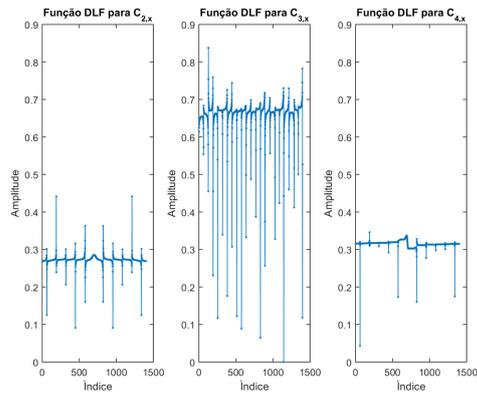


Figura 15: Função DLF aplicada às características extraídas para as classes com e sem afundamento de tensão.

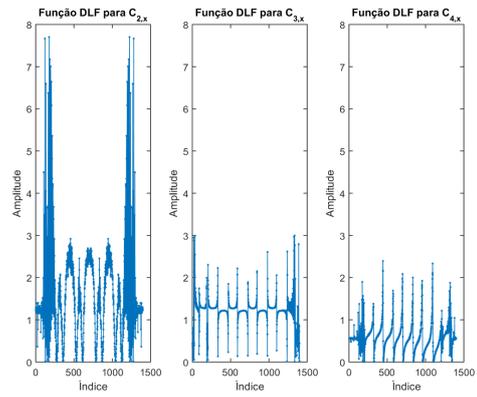


Figura 18: Função DLF aplicada às características extraídas para as classes com e sem oscilações transitórias.

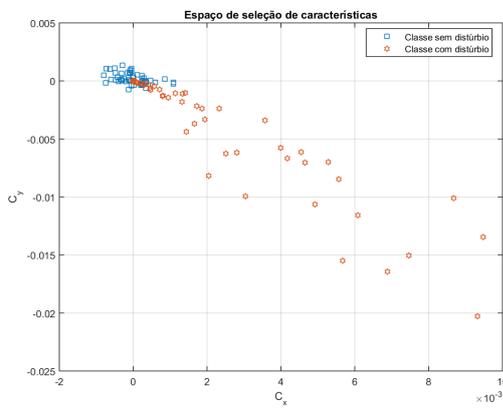


Figura 16: Espaço de seleção de características para distinção entre a classe em que ocorre afundamento de tensão (hexágonos vermelhos) e a que não ocorre (quadrados azuis).

mulantes. Nota-se uma separação entre as classes sem distúrbio e com distúrbio.

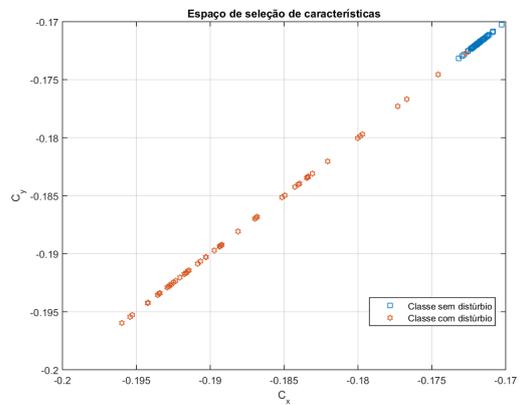


Figura 19: Espaço de seleção de características para distinção entre a classe que ocorre oscilações transitórias (hexágonos vermelhos) e a que não ocorre (quadrados azuis).

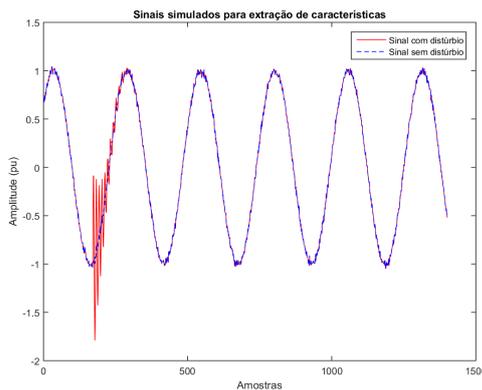


Figura 17: Simulação de sinal elétrico com presença de oscilações transitórias (linha contínua) e do sinal fundamental de tensão (linha tracejada).

entre as classes com e sem distúrbio; porque os maiores valores ocorrem no quadro da esquerda. A Figura 19 mostra o espaço de seleção de características, criado a partir dos dois melhores cu-

3.7 Análise de resultados

A partir de várias simulações, foi possível perceber que os harmônicos são melhor detectados pelos cumulantes de quarta ordem, independente da amplitude relativa do conteúdo harmônico. De maneira análoga, as oscilações transitórias são sempre melhor detectadas pelos cumulantes de segunda ordem. Em relação aos outros distúrbios não foi possível concluir qual ordem dos cumulantes melhor detecta as classes, porque a amplitude da função custo do DLF era semelhante para todas as ordens. Por exemplo, na Figura 9, observa-se que o melhor cumulante foi selecionado de uma ordem e o segundo melhor de outra ordem.

Os harmônicos foram simulados com amplitude de 0.1% a 80% e o espaço de seleção de características mostrou separabilidade em todos os casos. Este resultado é impressionante, uma vez que

com uma amplitude percentual de 0.1% o ruído adicionado exerce mais influência no sinal com distúrbio que a própria distorção harmônica. Apesar disto, o método foi capaz de distinguir a classe com distúrbio, o que se deve ao fato da estatística de ordem superior ser imune à ruídos Gaussianos. Caso a Transformada Wavelet fosse aplicada, o nível de ruído adicionado poderia impossibilitar a extração de características de forma eficiente.

Em relação ao afundamento e elevação de tensão, a máxima variação da amplitude do sinal em que o método conseguiu distinguir o distúrbio foi de 8%. Sobre a interrupção de tensão, os melhores resultados ocorreram entre 100 e 1000 amostras, que representa 6,5 milissegundos a 65 milissegundos de interrupção.

Outro ponto a ser observado é que os espaços de seleção de características mostraram diferentes níveis separabilidade entre as classes. Neste sentido, os melhores resultados ocorreram para a distorção harmônica, interrupção curta, oscilações transitórias e afundamento de tensão; os piores ocorreram para interrupção e elevação de tensão.

4 Conclusões

Neste trabalho, foram utilizadas as ferramentas de estatística de ordem superior (EOS) e discriminante linear de Fisher (DLF) para o reconhecimento de padrões de distúrbios elétricos. O método proposto apresentou bons resultados, na avaliação da qualidade de energia elétrica, quando aplicado a sinais com e sem distúrbio. Foram utilizados os distúrbios de distorção harmônica, elevação e afundamento de tensão, oscilações transitórias e interrupção longa e curta. A proposta conseguiu gerar um espaço para detecção sinais contendo distorção harmônica, interrupção de tensão, oscilações transitórias e afundamento e elevação de tensão. A presença de ruído nos sinais não afetou a separação entre as classes, comprovando que a estatística de ordem superior é imune à ruídos brancos e pode ser uma ferramenta bastante útil no monitoramento da QEE em redes inteligentes (Smart Grids).

Para dar continuidade a este trabalho, sugere-se adicionar um método de classificação, baseado em máquinas de vetor de suporte ou métodos similares de inteligência computacional. Além disto, será verificado a eficiência do método quando vários distúrbios estão presentes ao mesmo tempo no sinal.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Lavras por propiciar o laboratório de sinais para realização das simulações e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais por financiar o projeto.

Referências

- Arrillaga, J., Bollen, M. H. and Watson, N. R. (2000). Power quality following deregulation, *Proceedings of the IEEE* **88**(2): 246–261.
- Bollen, M. H., Gu, I. Y., Santoso, S., McGranaghan, M. F., Crossley, P. A., Ribeiro, M. V. and Ribeiro, P. F. (2009). Bridging the gap between signal and power, *IEEE Signal Processing Magazine* **26**(4).
- Ferreira, D., Cerqueira, A., Duque, C. and Ribeiro, M. (2009). Hos-based method for classification of power quality disturbances, *Electronics Letters* **45**(3): 183–185.
- Ferreira, D. D., Marques, C. A., de Seixas, J. M., Cerqueira, A. S., Ribeiro, M. V. and Duque, C. A. (2011). Exploiting higher-order statistics information for power quality monitoring, *Power Quality*, InTech.
- Khokhar, S., Zin, A. M., Mokhtar, A. and Ismail, N. (2014). Matlab/simulink based modeling and simulation of power quality disturbances, *Energy Conversion (CENCON), 2014 IEEE Conference on*, IEEE, pp. 445–450.
- Mallat, S. (1999). *A wavelet tour of signal processing*, Elsevier.
- Mendel, J. M. (1991). Tutorial on higher-order statistics (spectra) in signal processing and system theory: Theoretical results and some applications, *Proceedings of the IEEE* **79**(3): 278–305.
- Mishra, S., Bhende, C. and Panigrahi, B. (2008). Detection and classification of power quality disturbances using s-transform and probabilistic neural network, *IEEE Transactions on power delivery* **23**(1): 280–287.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L. and Lowe, R. (1996). Localization of the complex spectrum: the s transform, *IEEE transactions on signal processing* **44**(4): 998–1001.