

Graphical Visualization of Power Quality Disturbances

Rafael Pavan, São Paulo State University (UNESP)

Abstract — This article proposes three different methodologies to analyze and visualize power quality related problems, in order to facilitate the detection, extraction of features and classification of such events. First, the Lissajous (V-I trajectories) figures will be used for symmetrical and asymmetrical faults characterization. For power quality disturbances analysis, two methodologies will be employed: space vector ellipse in complex plane for quick characterization of the event and Stockwell transform for detailing in the domain of time and frequency, simultaneously. The analyzed data will be generated artificially through simulations and computer programming.

Key-Words — Power quality disturbances, Stockwell transform, V-I trajectories, space vector ellipse in complex plane, graphical visualization.

I. INTRODUÇÃO

SISTEMAS elétricos de potência estão sujeitos a uma série de distúrbios de qualidade de energia elétrica, tais como: afundamentos e elevação de tensão, harmônicas, transitórios, interrupções, etc. Normas internacionais como: IEC 61000 e IEEE 1159 recomendam uma série de limitações e regras para estabelecer os limites de qualidade de energia, de forma que os sistemas elétricos operem de maneira segura e confiável.

A proliferação de cargas não-lineares e equipamentos eletrônicos sensíveis acabou por afetar consideravelmente a maneira como a energia é distribuída e mensurada, uma vez que tais cargas modificam as formas de onda de tensão e corrente e são mais susceptíveis às oscilações de energia [1]. Atualmente, há uma tendência de monitoramento contínuo da qualidade de energia elétrica numa instalação ou rede de energia, de forma que grandes quantidades de dados são gerados a cada segundo, tornando a análise laboriosa e complexa [2]. O processo de monitoramento tem evoluído junto com os equipamentos e metodologias de medição, uma vez que as técnicas de processamento de sinais, os computadores e os dispositivos de comunicação têm se espalhado pelo mundo [3].

No decorrer dos anos, diversas técnicas para análise de qualidade de energia elétrica e caracterização de cargas foram utilizadas, das quais se destacam: valor RMS, valor instantâneo, transformada de Fourier, transformada de Fourier janelada, transformada wavelet discreta, transformada de Stockwell, trajetórias V-I, transformada de Clarke e, mais recentemente, *space vector ellipse* no plano complexo. As metodologias tradicionais e clássicas de análise de qualidade de energia elétrica, em muitos casos, mostram-se insuficientes para a correta classificação de um determinado evento. A análise do valor RMS de uma variável é extremamente dependente do

tamanho da janela de cálculo, o que pode ocultar eventos de curta duração. O valor instantâneo fornece informações apenas no domínio do tempo, o que não permite identificar e caracterizar com precisão distúrbios com frequências múltiplas da fundamental. A transformada de Fourier além de fornecer apenas informações no domínio da frequência, supõe que o sinal analisado é periódico e estacionário, sendo que em muitos casos os distúrbios de qualidade de energia elétrica não obedecem a tais condições. A performance da transformada de Fourier janelada é prejudicada pela resolução no domínio do tempo ou da frequência, que varia conforme o tamanho da janela [2]. A transformada wavelet discreta tem seu desempenho prejudicado em caso de sinais com presença de ruídos [4], enquanto que a transformada de Stockwell - que mistura os princípios da transformada de Fourier janelada e transformada wavelet contínua - tem uma maior robustez aos ruídos e melhor resolução nos domínios do tempo e da frequência [5]. Mais recentemente, a técnica *space vector ellipse* no plano complexo foi proposta por pesquisadores, onde o sinal com distúrbio é retratado no plano complexo de forma elipsoidal, tornando o processo de análise e classificação mais simples e menos laborioso para algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial [6].

No quesito caracterização de cargas, alguns autores sugerem a utilização das figuras de Lissajous - também denominadas trajetórias V-I - e da transformada de Clarke [7]. As figuras de Lissajous são gráficos que mostram a relação entre tensão e corrente ao longo do tempo, em cada fase analisada. Já a transformada de Clarke, é aplicável a sistemas trifásicos, de forma a reduzir o número de variáveis a apenas duas: *alfa* e *beta*. Enquanto a trajetória V-I utiliza os dados de tensão e corrente simultaneamente, a transformada de Clarke analisa separadamente cada variável [8].

Neste artigo, algumas das ferramentas mencionadas anteriormente serão aplicadas para diagnosticar e caracterizar alguns distúrbios de qualidade de energia elétrica. A seção II irá utilizar as trajetórias V-I para análise de faltas simétricas e assimétricas em simulações. A seção III, irá aplicar a *transformada space vector ellipse* no plano complexo para visualização inicial de alguns distúrbios de qualidade de energia elétrica e, complementarmente na seção IV, será aplicada a transformada de Stockwell para um maior detalhamento e extração de características do distúrbio observado. A metodologia de análise proposta visa facilitar a detecção das anomalias, de forma a melhorar a tomada de decisão tornando-a mais rápida e detalhada.

II. VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE FALTAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS COM AS TRAJETÓRIAS V-I

Para a caracterização das faltas simétricas e assimétricas foram utilizadas as figuras de Lissajous, que retratam o comportamento da tensão e corrente em apenas um gráfico. Nas trajetórias V-I, em casos onde não há harmônicas na forma de onda de tensão e corrente, pode-se notar um formato elíptico cujas excentricidades e inclinação dependem dos valores do módulo da impedância e de seu respectivo fator de potência. Tais informações da carga podem ser extraídas através das figuras. O circuito da Figura 1 foi simulado no *software* Matlab através da ferramenta Simulink.

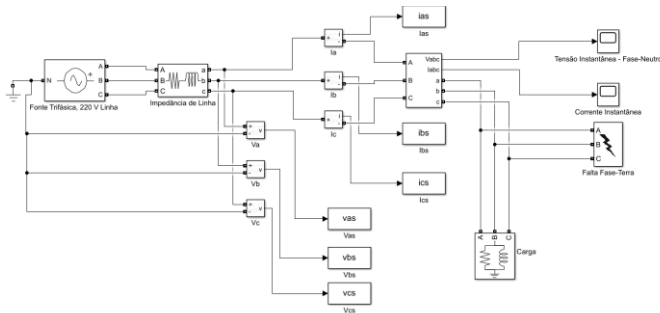


Fig. 1. Circuito simulado com gerador de falta simétrica e assimétrica. Fonte de tensão trifásica 127/220 V (60 Hz) conectada em Y com neutro aterrado, impedância de linha de 0.1 Ω e 0.01 mH. Carga indutiva-resistiva de 80 kVAR e 10 kW.

Inicialmente, foi simulado a situação de curto-circuito fase-terra, em um ponto próximo à carga. As tensões e correntes foram medidas em um ponto anterior ao da falta. O curto tem duração de 200 ms, e ocorre na fase A. As Figuras 2 e 3 retratam o comportamento da tensão e corrente no momento da falta.

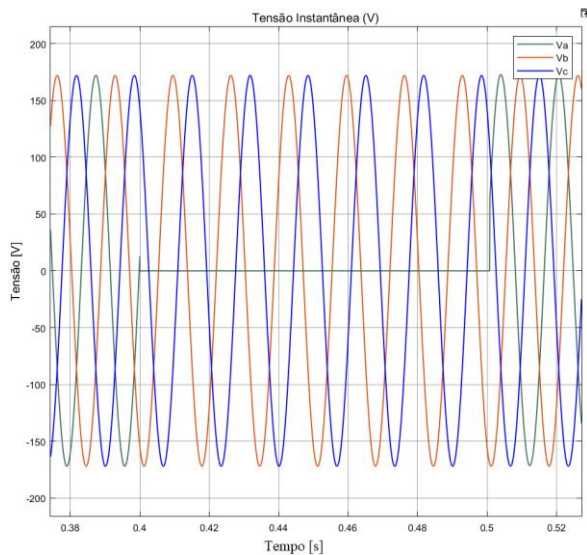


Fig. 2. Tensões nas fases A, B e C no momento da ocorrência da falta fase-terra.

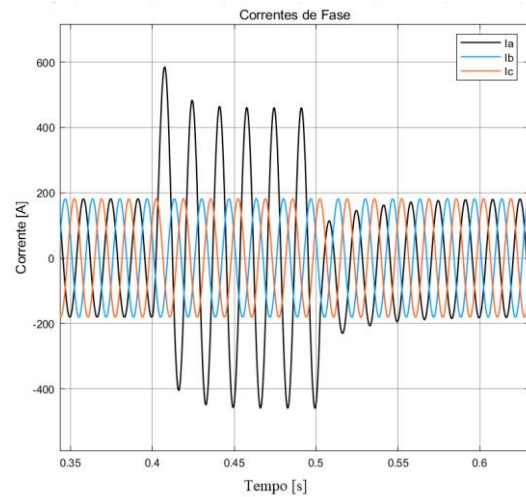


Fig. 3. Correntes nas fases A, B e C no momento da ocorrência da falta fase-terra.

Com os dados de corrente e tensão amostrados, foram levantadas as trajetórias V-I para cada uma das fases, conforme as Figuras 4, 5 e 6.

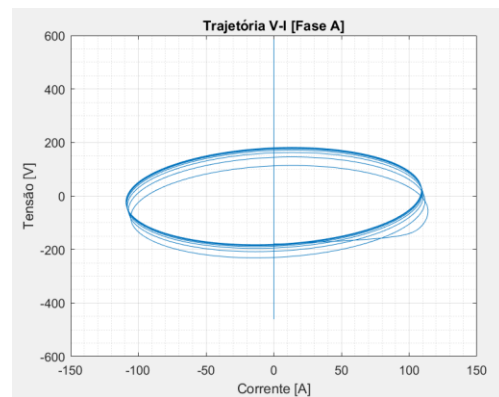


Fig. 4. Trajetória V-I da fase A durante falta fase-terra. A trajetória em condições nominais de operação é elíptica, no entanto, na ocorrência da falta fase-terra há a formação de uma reta vertical ao longo do eixo da corrente.

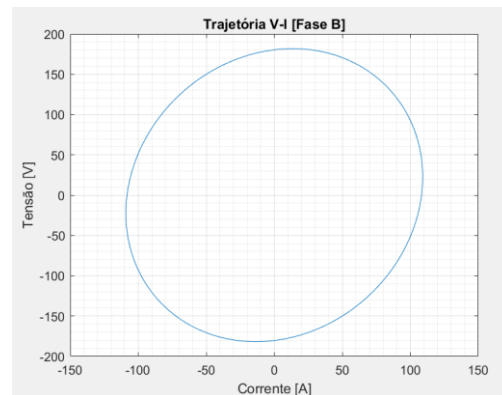


Fig. 5. Trajetória V-I da fase B durante falta fase-terra.

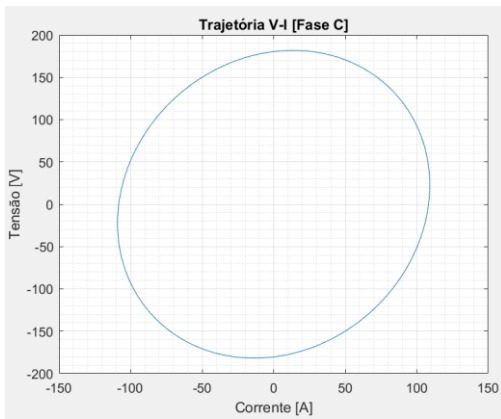


Fig. 6 Trajetória V-I da fase C durante falta fase-terra.

Durante a ocorrência da falta fase-terra na fase A, pode-se observar que a tensão tem seu valor reduzido a zero, enquanto que a corrente da respectiva fase sobe ao patamar de 600 A para depois decair exponencialmente. Nas demais fases, não houve alterações.

O comportamento descrito anteriormente pode ser visto nas Trajetórias V-I de cada fase. Nas fases B e C, as trajetórias elípticas apresentam o comportamento nominal, pois as respectivas tensões e correntes permanecem sem alterações. Na fase A, a trajetória elíptica é subitamente modificada durante a ocorrência da falta, de forma que esta passa a ser uma reta centrada no eixo da corrente, variando conforme sua amplitude. Ao término da falta, quando a tensão é restituída, nota-se que a corrente demora alguns milissegundos para atingir sua amplitude nominal, de forma que elipses de diferentes excentricidades são desenhadas no gráfico. Nos demais casos de faltas simétricas e assimétricas envolvendo terra, para a fonte de alimentação nas condições do circuito simulado, o mesmo comportamento pode ser observado nas fases em que o curto-circuito ocorre.

Para a falta fase A - fase B, sem envolvimento de terra, temos as Figuras 7 e 8 ilustrando as tensões e correntes de cada fase.

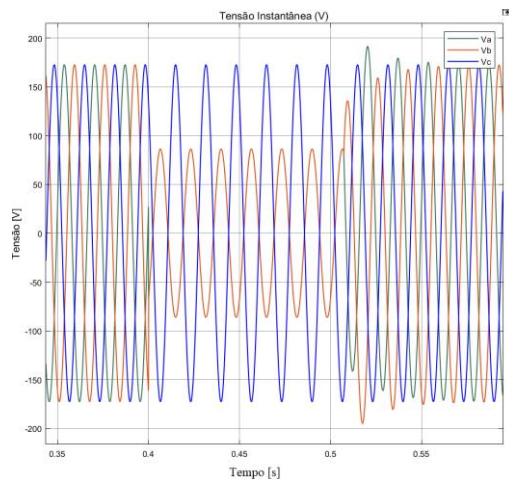


Fig. 7 Tensões nas fases A, B e C no momento da ocorrência da falta fase-fase.

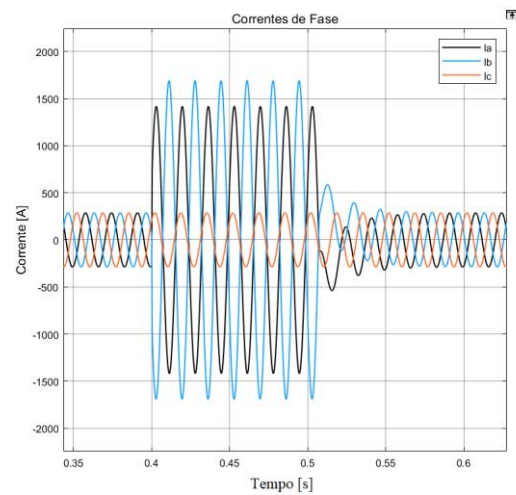


Fig. 8 Correntes nas fases A, B e C no momento da ocorrência da falta fase-fase.

As respectivas trajetórias V-I estão ilustradas nas Figuras 9, 10 e 11.

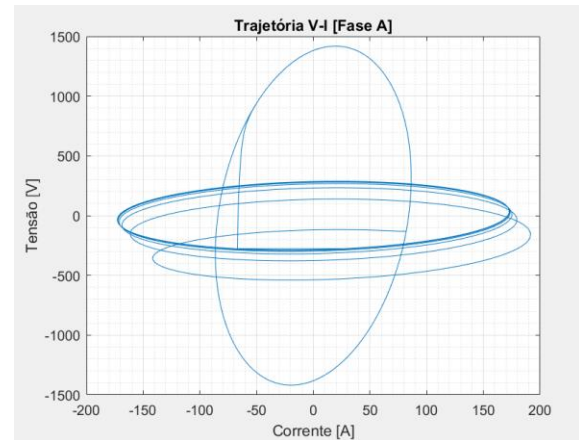


Fig. 9 Trajetória V-I da fase A durante falta fase-fase.

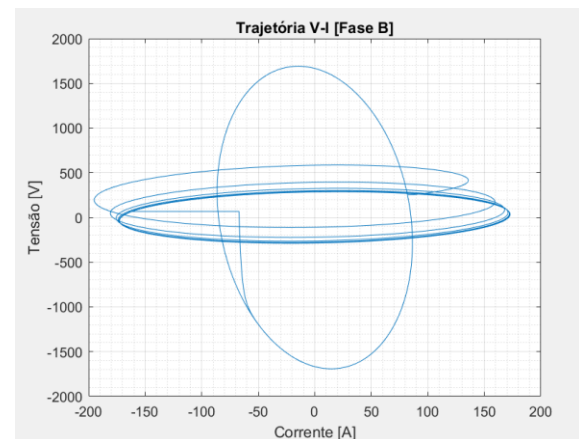


Fig. 10 Trajetória V-I da fase B durante falta fase-fase.

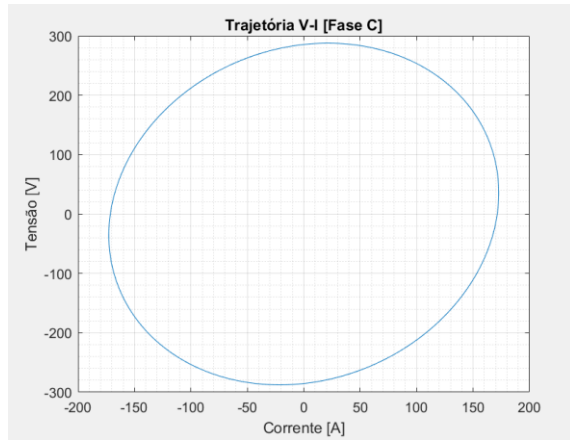


Fig. 11. Trajetória V-I da fase C durante falta fase-fase.

Durante a ocorrência da falta fase-fase sem envolvimento de terra, pode-se notar que as tensões nas fases A e B acabam por ter seu valor instantâneo diminuído, ficando exatamente em fase e com mesma amplitude. Enquanto isso, a corrente passa a ter seu valor de pico próximo a 1500 A, com alterações no deslocamento de fase. A trajetória V-I nas fases A e B ilustra exatamente o ocorrido, com a diminuição da excentricidade no eixo da tensão e aumento no eixo da corrente, de forma que agora tem-se outra elipse desenhada no gráfico, destoando da ocasião de ocorrência de falta entre fase e terra. Nota-se que a inclinação também é divergente entre as fases, uma vez que no momento da falta as ondas de tensão e corrente sofrem um deslocamento angular.

As trajetórias V-I, portanto, diminuem pela metade a quantidade de gráficos a serem analisados durante a ocorrência da falta, uma vez que tensões e correntes são condensadas em uma única plotagem, permitindo diferenciar os curtos-circuitos facilmente, nas condições da simulação. Ainda pelas características da elipse, podem ser extraídas informações sobre módulo e ângulo da impedância do circuito.

III. VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO PLANO COMPLEXO

Para a visualização de distúrbios de qualidade de energia elétrica, foram gerados os sinais que constam na Tabela 1. Para cada um dos sinais criados, foi aplicada a transformada *space vector ellipse* no plano complexo. Através da transformada o sinal estudado é mapeado no plano complexo, também na forma elipsoidal, onde a divergência de sua trajetória nominal depende do tipo de distúrbio ocorrido, de forma que cada evento tenha uma caracterização peculiar. O resultado pode ser conferido nas Figuras 12 a 19.

TABELA I
DISTÚRBIOS DE TENSÃO SIMULADOS

Sinal	Distúrbio	Características
1	Onda de referência, sem distúrbio.	Amplitude: 1 pu. Frequência: 60 Hz.
2	Afundamento.	Afundamento de 0.5 pu.
3	Elevação.	Elevação de 0.5 pu.
3	Interrupção.	Interrupção total entre 0.04 e 0.1 segundo.
4	Transitório.	Transitório de frequência 1250 Hz e decaimento exponencial entre 0.04 e 0.1 segundo.
5	Harmônicas.	3ª, 5ª e 7ª com amplitudes de 0.15 pu.
6	Harmônicas com Afundamento.	3ª, 5ª e 7ª com amplitudes de 0.15 pu. Afundamento na componente fundamental, de 0.3 pu.
7	Harmônicas com Elevação.	3ª, 5ª e 7ª com amplitudes de 0.15 pu. Elevação na componente fundamental, de 0.3 pu.

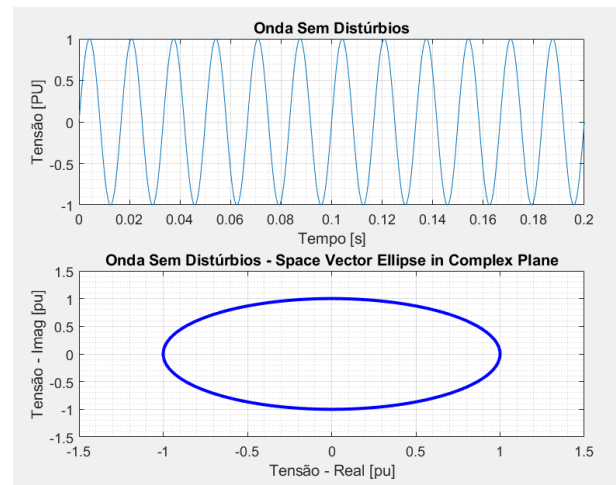


Fig. 12. Sinal 1, onda sem distúrbio – trajetória elíptica no plano complexo.

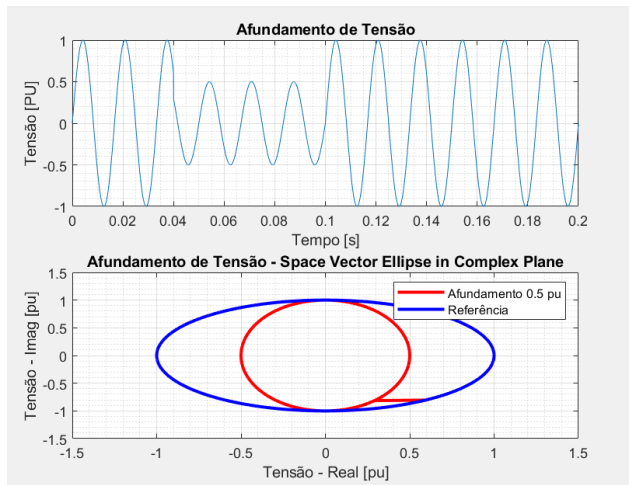


Fig. 13. Sinal 2, onda com afundamento – trajetória elíptica no plano complexo.

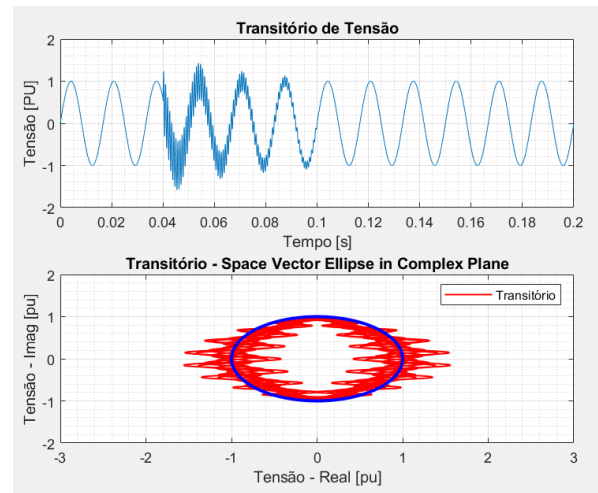


Fig. 16. Sinal 5, onda com transitório – trajetória elíptica no plano complexo.

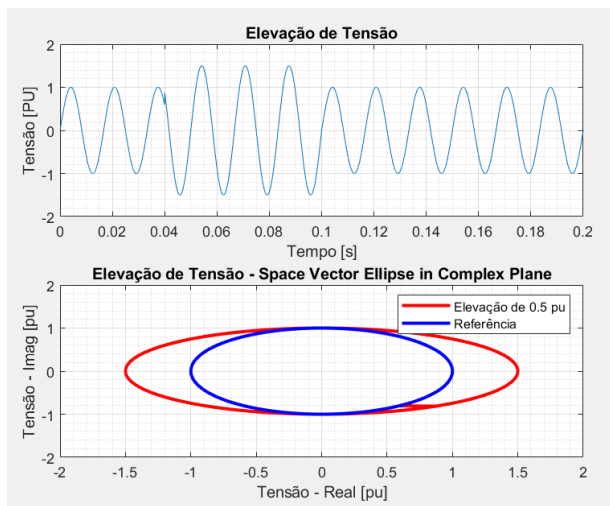


Fig. 14. Sinal 3, onda com elevação – trajetória elíptica no plano complexo

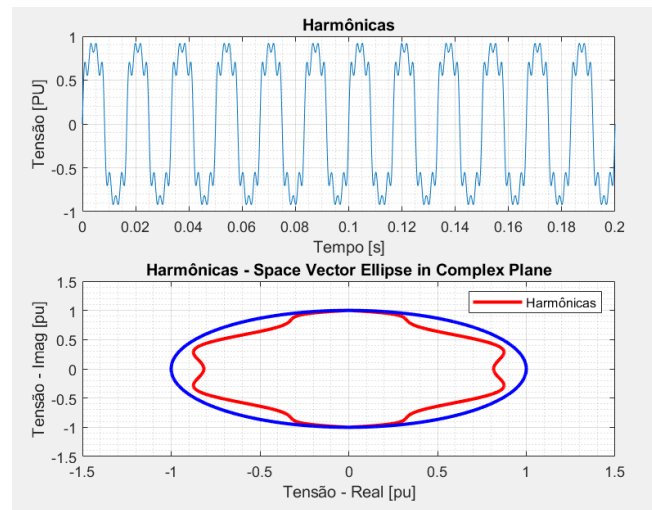


Fig. 17. Sinal 6, onda com harmônicas – trajetória elíptica no plano complexo

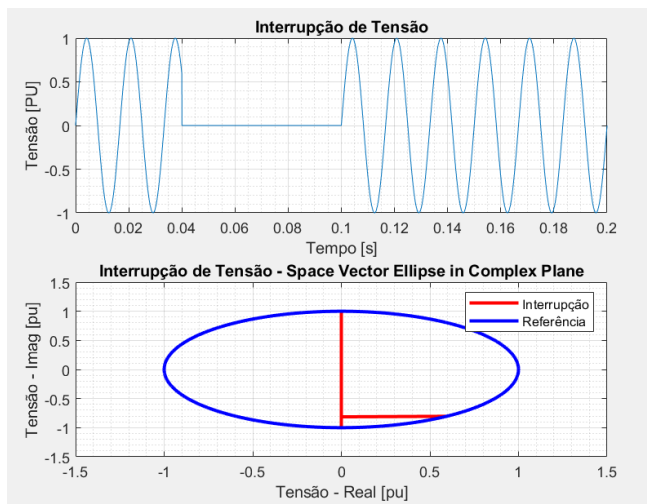


Fig. 15. Sinal 4, onda com interrupção – trajetória elíptica no plano complexo

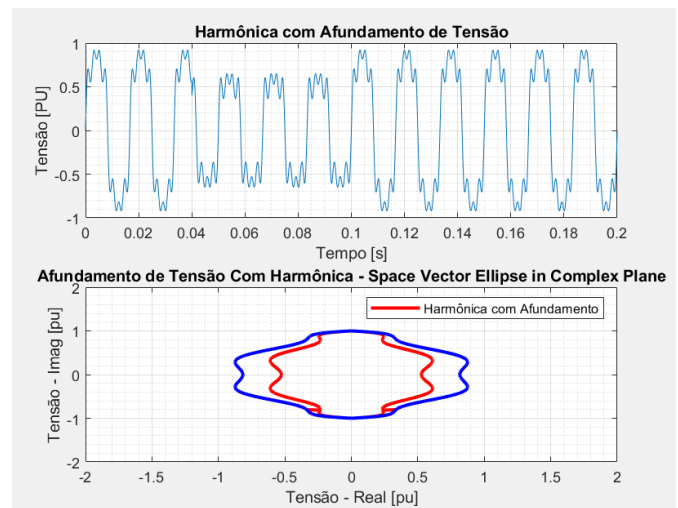


Fig. 18. Sinal 7, onda com harmônica e afundamento – trajetória elíptica no plano complexo.

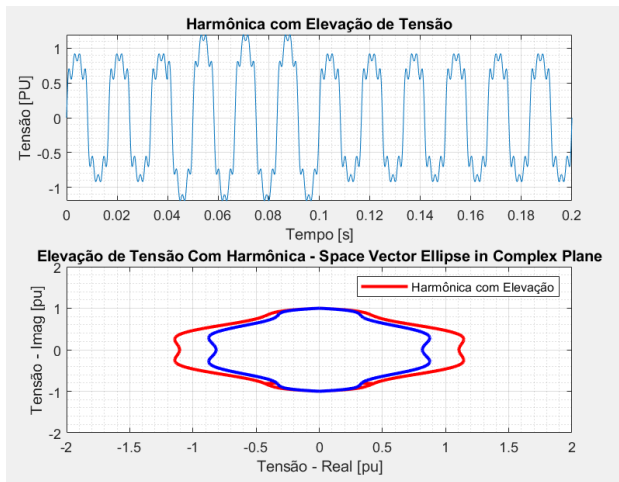


Fig. 19. Sinal 8, onda com harmônica e elevação – trajetória elíptica no plano complexo.

Através da aplicação da transformada *space vector ellipse* no plano complexo, pode-se representar o distúrbio no plano complexo, na forma elipsoidal. Através das imagens, pode-se concluir que os distúrbios que afetam a amplitude de uma onda, acabam por ser representados na excentricidade localizada no eixo real, de forma que afundamentos e elevações são retratados através da diminuição ou aumento do comprimento da elipse em tal dimensão. Ao retratar distúrbios aos quais possuem componentes de outras frequências que não a fundamental, nota-se que a elipse se deforma em um todo, de acordo com a frequência e amplitude do evento.

Embora a visualização gráfica dos distúrbios utilizando tal técnica não forneça informações detalhadas sobre suas características, os autores afirmam que a metodologia proposta é mais eficiente computacionalmente para o reconhecimento de padrões e sua consequente classificação.

IV. VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA – TRANSFORMADA DE STOCKWELL

Com os mesmos distúrbios da Tabela 1, foram gerados gráficos tridimensionais a partir da aplicação da transformada de Stockwell, que realizam o mapeamento dos eventos nos domínios do tempo e da frequência, de forma que agora a visualização seja muito mais detalhada que nas técnicas anteriores. As Figuras de 20 a 27, ilustram os oito casos estudados neste artigo.

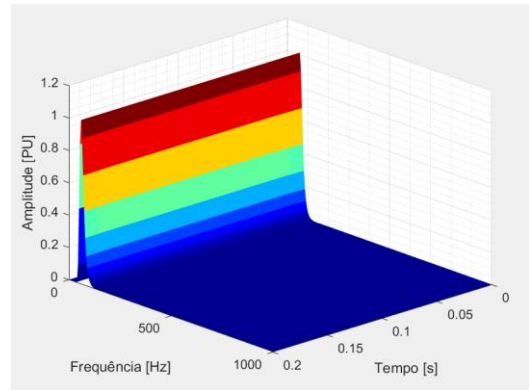


Fig. 20. Sinal 1, onda sem distúrbio – transformada de Stockwell.

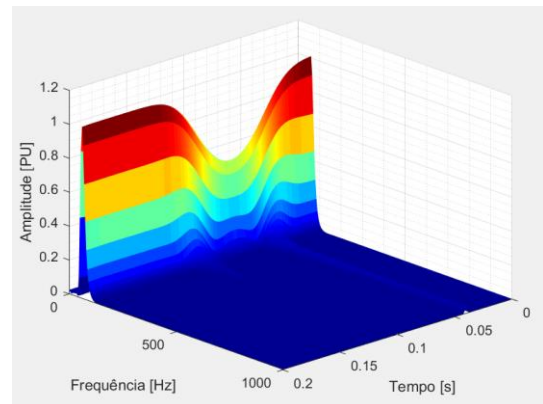


Fig. 21. Sinal 2, onda com afundamento – transformada de Stockwell.

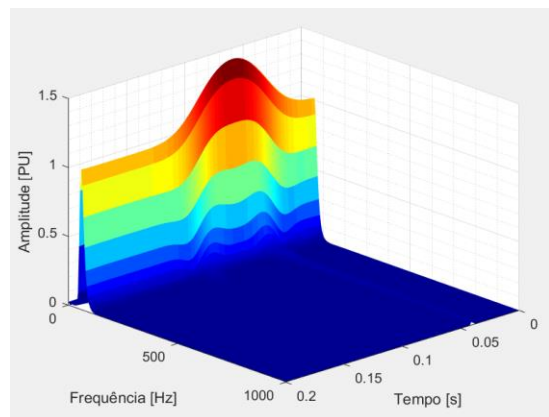


Fig. 22. Sinal 3, onda com elevação – transformada de Stockwell.

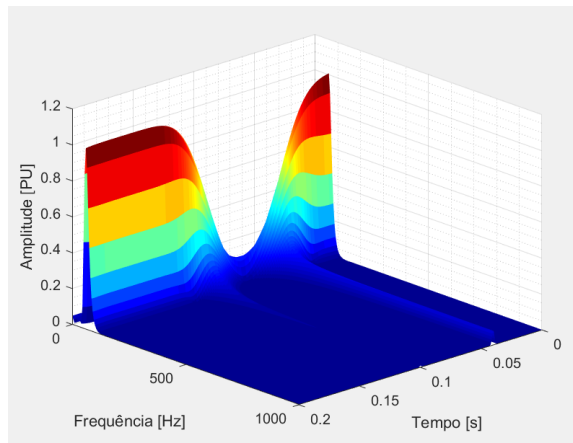


Fig. 23. Sinal 4, onda com interrupção – transformada de Stockwell.

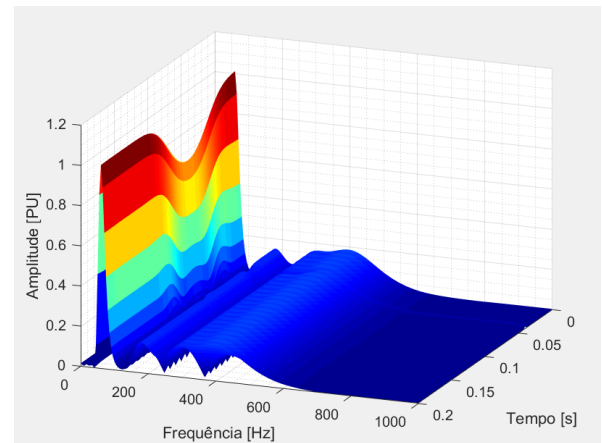


Fig. 26. Sinal 7 onda com harmônicas e afundamento – transformada de Stockwell.

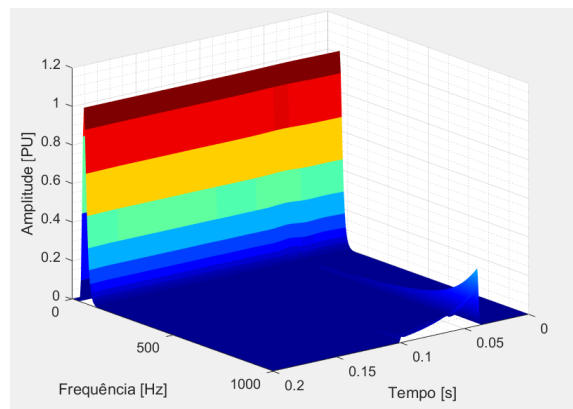


Fig. 24. Sinal 5, onda com transitório – transformada de Stockwell.

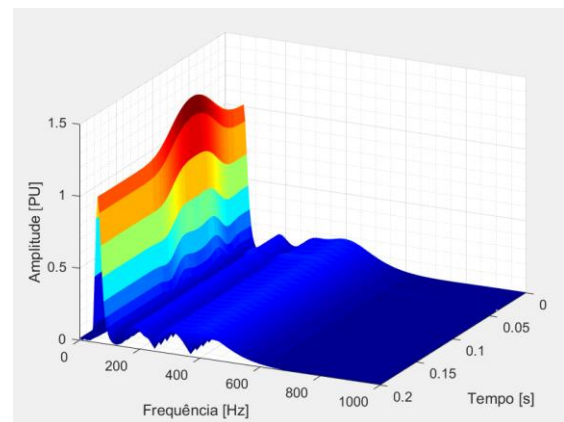


Fig. 27. Sinal 8 onda com harmônicas e elevação – transformada de Stockwell.

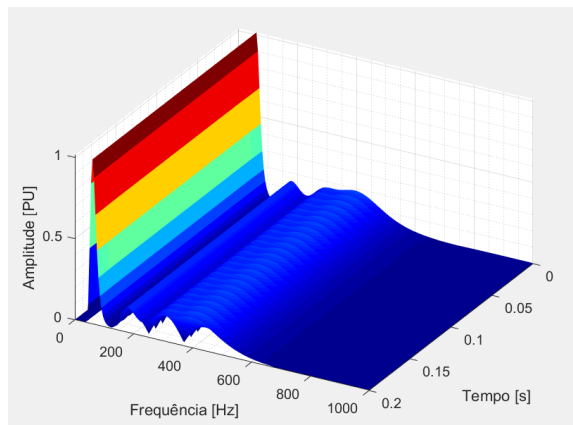


Fig. 25. Sinal 6, onda com harmônicas – transformada de Stockwell.

Nota-se que a transformada de Stockwell é uma ferramenta excelente para extrair informações sobre os distúrbios, pois ao mesmo tempo provém detalhes da onda no domínio do tempo e da frequência, permitindo localizar o período de ocorrência bem como separar em qual frequência o evento ocorre. Os melhores exemplos do que foi citado anteriormente, podem ser vistos nas Figuras 24, 25 e 26. A ferramenta foi capaz de separar em qual frequência a variação de amplitude ocorre, além de capturar com boa resolução todas as informações que podem ser conferidas e comparadas na Tabela 1.

V. CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a apresentar e implementar diferentes técnicas de visualização de distúrbios de qualidade de energia, de forma a detalhar os principais padrões e características para cada problemática. Conforme visto, as Figuras de Lissajous são eficientes para visualizar distúrbios que interferem na corrente e na tensão simultaneamente, o que é o caso de faltas simétricas e assimétricas, além de transitórios por acionamento de banco de capacitores e partida de motores. No entanto, a análise fica restringida para cada fase, individualmente. Além disso, mostra-se uma excelente ferramenta para caracterização de cargas, onde através da trajetória realizada pode-se determinar o módulo da impedância bem como seu ângulo de defasagem.

A Transformada Space Vector Ellipse no Plano Complexo se mostrou uma técnica eficiente de padronização de distúrbios de energia elétrica, uma vez que a quantidade de atributos a serem analisados é inferior ao das demais transformadas referenciadas no trabalho. Tal técnica combina a simplicidade das Trajetórias V-I com uma boa padronização e caracterização de cada tipo de distúrbio, o que é resultado da transformação matemática aplicada ao sinal. A Transformada S (Stockwell) mostra-se portadora de uma boa resolução de frequência e tempo, sendo uma ferramenta poderosíssima para o detalhamento e extração de informações dos eventos.

De maneira geral, o autor deste trabalho aconselha a utilização das Figuras de Lissajous para caracterização e detecção de faltas simétricas e assimétricas, bem como a aplicação da técnica de Space Vector Ellipse para detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia elétrica, a fim de melhorar a eficiência computacional. Uma vez detectados, a Transformada de Stockwell pode ser aplicada para oferecer um maior detalhamento do evento no domínio da frequência e do tempo, caso necessário.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] D. Granados-Lieberman, R. j. Romero-Troncoso, R. a. Osornio-Rios, A. Garcia-Perez and E. Cabal-Yeppez, "Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 4, pp. 519-529, April 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0466.
- [2] G. Gasparese, "Power Quality Monitoring, Analysis and Enhancement - Chapter: Methods of Power Quality Analysis". 2011, INTECH. doi: 10.5772/1425
- [3] T. Yebra Vega, V. Fuster Roig and H. Beltran San Segundo, "Evolution of signal processing techniques in power quality," *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPQU.2007.4424200.
- [4] C. H. Kim, R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. I. General introduction to the wavelet transforms," in *Power Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 81-87, April 2000, doi: 10.1049/pe:20000210
- [5] P. E. K. Dash, B. K. Panigrahi and G. Panda, "Power Quality Analysis Using S-Transform," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 7, pp. 60-60, July 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4312414.
- [6] Souhardya Panda (2020). Power Quality Disturbance Detection Using S transform (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/66879-power-quality-disturbance-detection-using-s-transform>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved November 10, 2020.
- [7] L. Du, D. He, R. G. Harley and T. G. Habetler, "Electric Load Classification by Binary Voltage-Current Trajectory Mapping," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 358-365, Jan. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2442225.
- [8] Orozco, O. A. T., Gomez, Y. A. G., Farfán, A. J. U., & Plata, E. A. C. (2013, January). "Identification and Characterization of Loads using Voltage, Current and Power Characteristics". In *Simpósio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica-SICEL* (Vol. 7, p. 8).