

## Análise qualitativa das famílias Wavelet para detecção de descargas parciais em isoladores

Kaynan Maresch\*, João Vitor Maccari Brabo Castro\*, Patrick Escalante Farias\*\*, Aécio de Lima Oliveira\*, Fernando Guilherme Kaehler Guarda\*, Ghendy Cardoso Jr\*, Aquiles Saccol Borin, Cristian Hans Correa\*\*\*, Erick Finzi Martins\*\*\*

\*UFMS/CEESP-LAPES, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, (msc.maresch@gmail.com) (jvbrabo@outlook.com) (fernando.guarda@ufsm.br) (aecio.oliveira@ufsm.br) (ghendy@ufsm.br) (aquilesborin@gmail.com).

\*\* IFRS, Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Farroupilha, Brasil, (patrick.farias@farroupilha.ifrs.edu.br).

\*\*\* CPFL Transmissão, Porto Alegre, Brasil, (cristianc@cee.com.br) (erick.martins@cee.com.br).

---

Abstract: Partial discharges (PDs) are undesirable phenomena that can manifest themselves in the equipment that make up the electrical system, and these dielectric breakdowns tend to evolve into short circuits. In order to diagnose the damage caused by PDs in a certain equipment, the energy concessionaires need to take it out of operation and then apply the electrical method. In addition to this, the thermovision method can be used, which only detects damage to the equipment when the ruptures are already severe. This article aims to use the Wavelet Transform(TW) in the processing of information contained in 26 PDs and noise signals, Corona-type with and without saline pollution. As a result, the detection of PDs is performed based on the TW coefficients. For this, it was necessary to vary the TW parameters and find the Wavelet family and level that best suits the PD signals. The TW proved to be suitable for the treatment of ultrasound signals as it is capable of dividing a signal into time and frequency windows. This feature makes it possible to identify whether the ultrasound signal comes from noise that is normal for system operation or from a PD. With this work, it was possible to identify the most suitable Wavelet families for the identification of partial discharges in medium voltage insulators.

Resumo: Descargas parciais (DPs) são fenômenos não desejáveis que podem se manifestar nos equipamentos que compõem o sistema elétrico, sendo que essas rupturas dielétricas tendem a evoluir para curto-circuito. Para diagnosticar os danos provocados por DPs em um determinado equipamento, as concessionárias de energia necessitam retirá-lo de operação para então aplicar o método elétrico. Além deste, pode-se fazer uso do método de termo visão, que só detecta os danos no equipamento quando as rupturas já são severas. Este artigo visa utilizar a Transformada Wavelet (TW) no processamento da informação contida em sinais de DPs e ruídos, do tipo Corona com e sem poluição salina. Como resultado, tem-se a detecção de DPs, realizada com base nos coeficientes da TW. Para tal foi necessário variar os parâmetros da TW e encontrar a família e nível da Wavelet que mais se adequa aos sinais de DPs. A TW se mostrou adequada ao tratamento de sinais ultrassom já que é capaz de dividir um sinal em janelas de tempo e frequência. Essa característica permite identificar se o sinal de ultrassom é oriundo de um ruído normal à operação do sistema ou de uma DP. Com este trabalho conseguiu-se identificar as famílias Wavelet mais adequadas para identificação de descargas parciais em isoladores de média tensão.

**Keywords:** Partial Discharges; Acoustic Emission; Wavelet Transformer; Instrument Transformers; Lightning rod.

**Palavras-chaves:** Descargas Parciais; Emissão Acústica; Transformada Wavelet; Transformadores de Instrumento; Para-raios.

---

### 1. INTRODUÇÃO

As descargas parciais são rupturas dielétricas localizadas. Causadas por sobretensões transitórias de alta frequência que promovem a degradação acelerada da isolação de transformadores de instrumentos (TI), cabos, para-raios e

equipamentos elétricos, podendo evoluir para um curto-circuito.

Intervenções para a manutenção emergencial destes equipamentos afetam os indicadores de qualidade. Além disso, uma falha inesperada pode causar interrupção no fornecimento de energia, validando assim a necessidade de detecção de sinais de DPs e o nível de severidade da ruptura

dielétrica para então favorecer a programação antecipada da manutenção.

Chen et al. (2005) apresenta uma investigação sobre a correlação entre os sinais acústicos e os ângulos dos sinais da fonte de energia elétrica, sendo para tal utilizadas técnicas de medição ultrassônica sem contato. Existem 2 variedades de medição ultrassônica, com contato, utilizando de sensores elétricos do tipo piezoelétrico instalados na carcaça do equipamento ou internamente e a sem contato, a qual faz uso de antenas, nesta os sinais são fortemente afetados por ruídos eletromagnéticos e necessitam técnicas de filtragem para se trabalhar com os sinais. A partir da imposição intencional de DPs em transformadores foram aquisitados e analisados sinais de ultrassom gerado em laboratório de alta tensão, sendo estes associados a coordenadas polares e zonas regulares.

Kweon et al.(2005), também analisa sinais ultrassônicos devido a descargas parciais em um transformador de 345 kV. A medição por ultrassom foi utilizada para fins de detecção de descargas parciais e perdas por efeito corona. Foi possível perceber que essa detecção ultrassônica é afetada por muitas fontes de ruídos, tais como: vibrações do núcleo, ventilador de resfriamento e pela bomba de resfriamento. Portanto, é de vital importância para o método que será desenvolvido a diferenciação desses ruídos, com o intuito de filtragem e garantia da correta identificação dos defeitos.

A TW foi utilizada em Chen et al.(2007) para a supressão de ruídos possui como finalidade aumentar a taxa de identificação correta dos sinais de DPs. Foi definida uma função Wavelet mãe semelhante aos sinais acústicos das DPs. Para encontrar a função que melhor se adequa é utilizado um cálculo matemático que compara a forma de onda da Wavelet mãe com um pulso de DP. Realizando tal análise notou-se que as famílias *Symlets* e *Daubechies* possuíam a maior taxa de correlação média entre o pulso de DP e o sinal ultrassom. Peng et al.(2019) propôs estudos com a intenção de classificação de diferentes tipos de DPs em cabos de alta tensão. A metodologia consiste em utilizar as técnicas de Redes Neurais e *Machine Learning* para o tratamento dos coeficientes de TW extraídos dos sinais de DPs. Embora o trabalho considere diferentes tipos de DPs, a família *Daubechies 5* permitiu classificar e reconstruir todos os tipos de DPs, sem a necessidade de variar a família de acordo com os diferentes tipos de DPs. A utilização de sensor ultrassom e o tratamento dos dados medidos se justifica pelo fato de que o equipamento necessita estar energizado e não precisa estar conduzindo uma alta corrente. Estes dispositivos permitem a antecipação de uma futura falha quando comparado com a manutenção baseada em imagem térmica. A maioria das concessionárias utilizam o método de termovisão, porém este método não prevê uma falha na isolação, detectando apenas quando a ruptura presente no isolante já se assemelha (ou está muito próximo) a um curto-circuito, exigindo uma manutenção emergencial.

Este artigo visa identificar a Wavelet mãe mais adequada para o tratamento de sinais em frequência ultrassônica, para então favorecer ao desenvolvimento de uma metodologia para detecção de descargas parciais. Este trabalho foi construído com base em sinais de DPs e ruídos, do tipo

Corona com e sem poluição salina em isoladores de média tensão.

## 2. AQUISIÇÃO DE SINAIS

Este artigo reporta parte de resultados obtidos em projeto de pesquisa que vem sendo desenvolvido em uma parceria entre o Centro de Excelência em Energia Sistemas de Potência – LAPES – UFSM, o Laboratório de Extra Alta Tensão – UFPA e a CPFL Transmissão. O LEAT é responsável por realizar os ensaios dos equipamentos através do sensor ultrassom, em conformidade com o descrito a seguir.

A tensão alternada aplicada ao corpo prova, é produzida a partir de uma fonte série-ressonante com indutância variável, a apresentada em Fig. 1.

Utiliza-se uma *probe* para medição de emissões na frequência de ultrassom (*ULTRAPROBE 2000 - UESystem*) geradas a partir de ensaio de tensão aplicada em uma coluna isolante formada por dois isoladores, tipo pedestal e classe de tensão 25 kV, ilustrado em Fig. 2 e Fig. 3.



Figura.1. Fonte ressonante série.  
Fonte: LEAT-UFPA (2021).

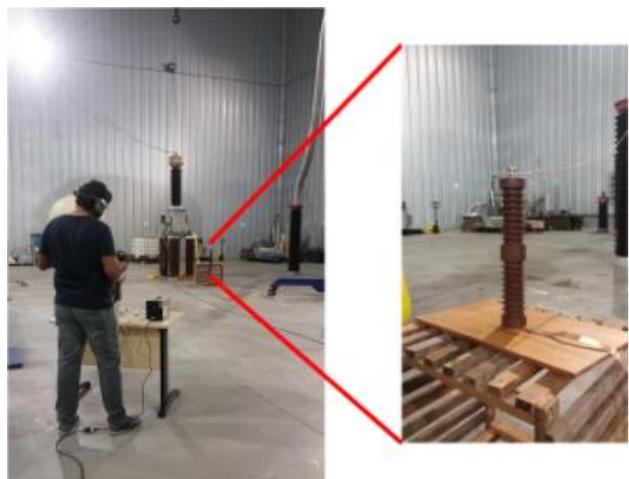


Figura.2 – Medição do ultrassom com a *probe* e percepção pelo fone de ouvido.  
Fonte: LEAT-UFPA (2021).

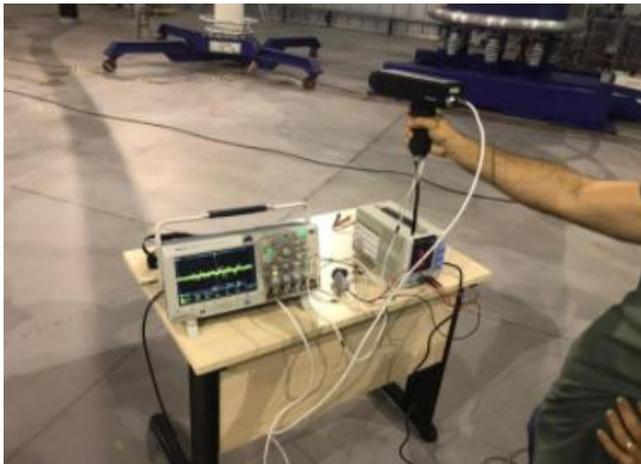


Figura 3 – Medição do ultrassom com a *probe* e aquisição de dados com o osciloscópio.  
Fonte: LEAT-UFPA (2021).

### 3. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA

A transformada de Wavelet é uma análise espectral de multiresolução usada para extrair certas bandas de frequências e /ou detectar estruturas locais presentes de um sinal, (Domingues et al. 2016). Diferente da transformada de Fourier, as Wavelets possuem um espectrograma feito “sob medida” para o sinal analisado, dessa forma, a resolução temporal usada aumenta proporcionalmente a frequência, possibilitando uma extração mais precisa de informações.

Existem duas características principais para as Wavelets, que são escala e translação, as quais são nomeadas  $a$  e  $b$ , respectivamente. A escala é a capacidade de diminuição da janela de tempo e a translação é a capacidade de percorrer todo o sinal com essa janela de tempo. A Fig. 4 exemplifica as características principais da transformada de Wavelet (Kutz et al. 2013).

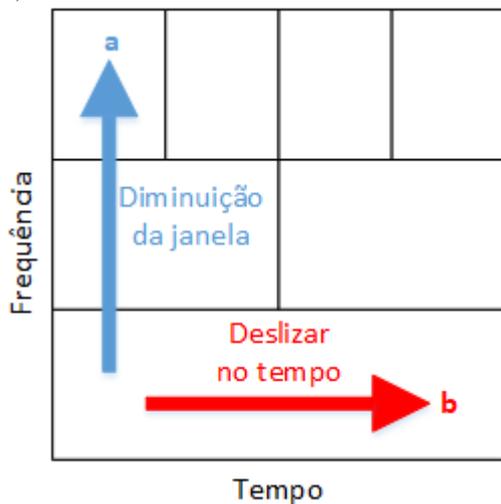


Figura 4 – Princípio básico de funcionamento da transformada de Wavelet.

#### 3.1. Transformada contínua

A transformada de Wavelet contínua, CWT (Continuous Wavelet Transform), baseia-se na comparação de função ortogonal pré-definida, chamada Wavelet mãe, com o sinal em

análise. Como mencionado anteriormente, a transformada Wavelet possui a capacidade de escala ( $a$ ) e translação ( $b$ ). Dessa forma, a transformada é escrita em (2) (Kutz et al. 2013).

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

Em que  $a \neq 0$  e  $b$  é uma constante de valor real.

Dado um sinal  $f$ , a transformada Wavelet pode ser escrita como (3) (Domingues et al, 2016).

$$W_f^\psi(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

#### 3.2. Transformada discreta

A transformada de Wavelet discreta, DWT (*Discrete Wavelet Transform*) é semelhante a transformada contínua, e também possui os parâmetros de escala e translação,  $a$  e  $b$ , respectivamente. Entretanto, como é empregada em processamento de sinais, o conjunto de dados possui uma dimensão finita, logo, os valores  $a$  e  $b$  devem ser discretizados. O valor  $a$  é discretizado na forma de uma exponencial,  $a = a_0^m$  e  $b = nb_0 a_0^m$ . Sendo  $n$  e  $m$  números inteiros que controlam a escala e translação, respectivamente. Os valores de  $a_0$  e  $b_0$  são os passos discretos. A equação (4) apresenta a transformada discreta de Wavelet (Chui et al. 1992).

$$W_f^\psi(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(a_0^{-m}x - nb_0) dx \quad (4)$$

#### 3.3. Famílias Wavelet

As famílias Wavelet são formas de onda características que, quando comparadas ao sinal original, realizam a decomposição do sinal a partir da função de base selecionada (Wavelet mãe) em quantos níveis forem selecionados pelo usuário. Existem diversas famílias Wavelet e dentro delas existem níveis, que são sutis variações da forma de onda original.

As Fig. 5 a 9 apresentam as formas de onda características de algumas famílias Wavelet.

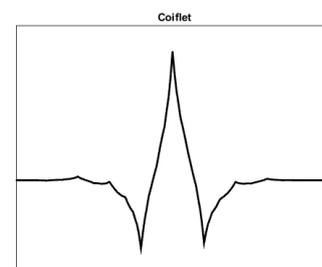


Figura 5 – Forma de onda característica da família Wavelet *Coiflet*.

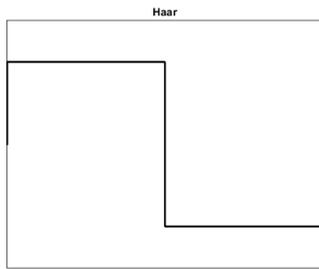


Figura 6 – Forma de onda característica da família Wavelet Haar.

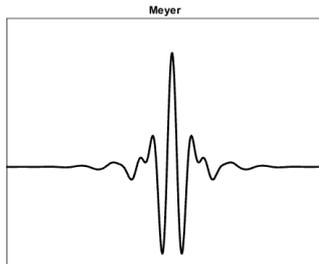


Figura 7 – Forma de onda característica da família Wavelet Meyer.

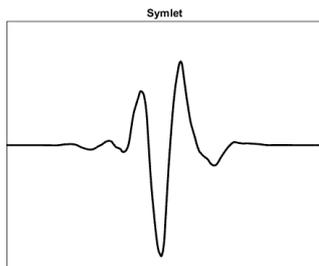


Figura 8 – Forma de onda característica da família Wavelet Symlet.

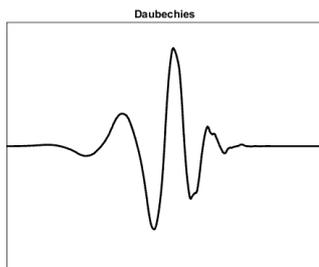


Figura 9 – Forma de onda característica da família Wavelet Daubechie.

#### 4. SIMULAÇÕES

Com o objetivo de se avaliar a transformada de Wavelet como ferramenta de tomada de decisão para a identificação de descargas parciais serão utilizados dois casos base, que serão avaliados através das diferentes famílias Wavelets e níveis de aproximação de detalhe.

##### 4.1 Casos base

Apesar do grande banco de sinais disponíveis, contendo sinais de corona com diferentes níveis de tensão e poluição na cadeia

de isoladores, como meio de se viabilizar uma análise sistemática e minuciosa das famílias Wavelet, são considerados apenas dois casos característicos.

O primeiro caso é o sinal acústico de um ruído de fundo, apresentado na Fig. 10. Esse caso é importante, pois além de ruídos ambientes diversos que existem e variam de lugar para lugar, os demais equipamentos elétricos presentes no local podem produzir grande influência na medição acústica. Dessa forma, a caracterização desse tipo de sinal serve como meio de diferenciação com relação aqueles onde a DP está presente.

O segundo caso considerado é o sinal acústico de um evento onde ocorre o efeito corona em uma cadeia de isoladores sem poluição com a tensão de 50 kV. Esse sinal é apresentado na Fig. 11.

##### 4.2 Análise da família Daubechie com 3 níveis de aproximação e detalhe

A família Wavelet Daubechie é uma família muito utilizada no processamento de sinais acústicos por conta da alta taxa de correlação média entre um pulso de sinal acústico de DP e a Wavelet mãe Daubechie, conforme informam os trabalhos de Chen et al (2005) e Chen et al (2007). Dessa forma, iniciou-se a análise por essa família.

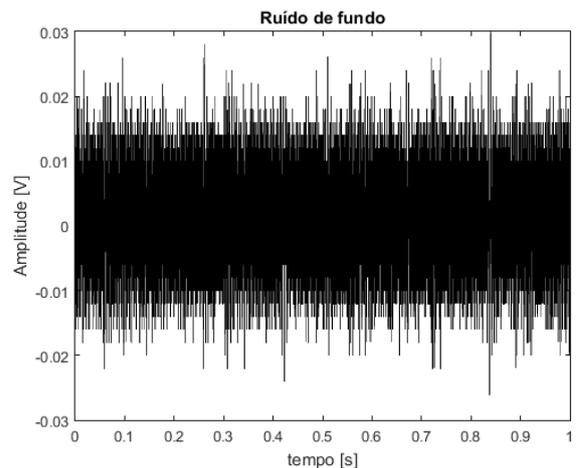


Figura 10 – Sinal acústico de um ruído de fundo.

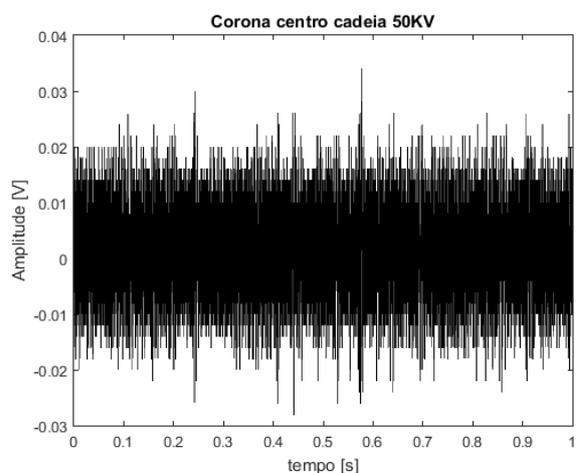


Figura 11 – Sinal acústico do efeito corona a 50kV.

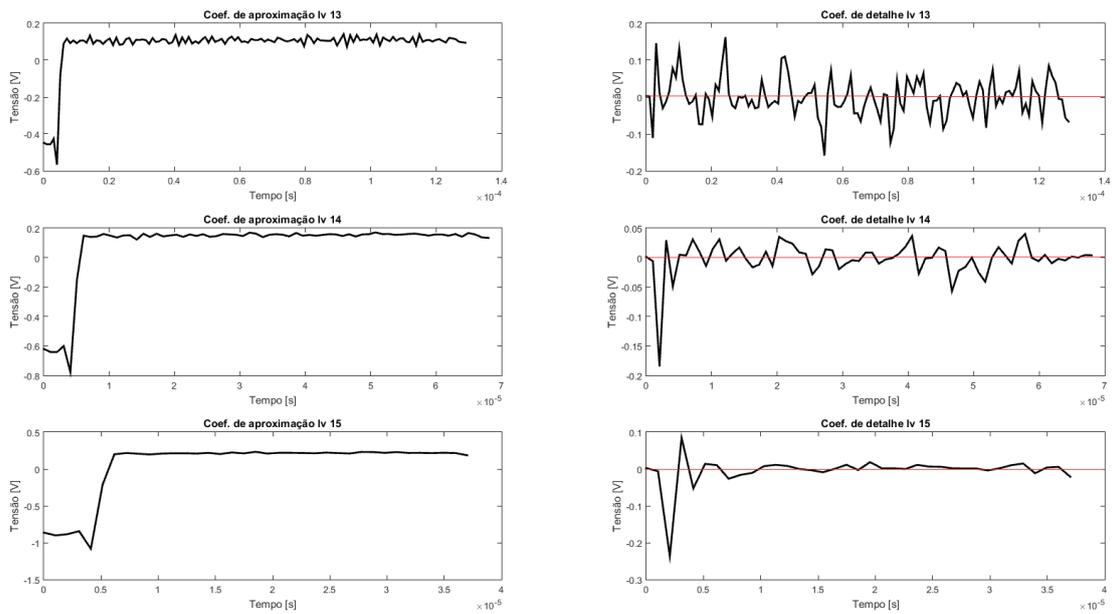


Figura 12 – Transformada Wavelet usando a Wavelet mãe *Daubechie* 4 e os níveis 13, 14 e 15 de aproximação e detalhe para um sinal de ruído de fundo.

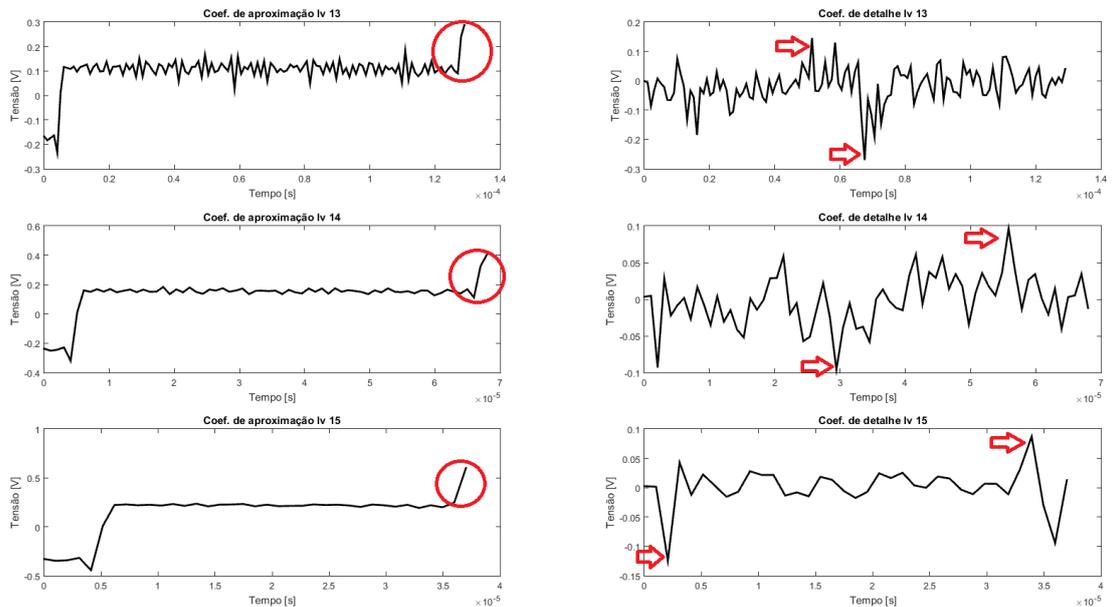


Figura 13 – Transformada Wavelet usando a Wavelet mãe *Daubechie* 4 e os níveis 13, 14 e 15 de aproximação e detalhe para um sinal de corona.

Através da transformada de Wavelet foram analisados 15 níveis de aproximação e detalhe, entretanto, os níveis mais baixos, inferiores a 13, em uma análise visual, não apresentaram grandes informações relevantes, ao passo que para os níveis 13, 14 e 15 são visualmente perceptíveis e apresentam diferenças notáveis entre o sinal de ruído de fundo e corona a 50 kV. As Fig. 12 e Fig. 13, mostram a aproximação e detalhe para ruído de fundo e corona da *Daubechie* 4, respectivamente.

Algumas considerações sobre as famílias *Daubechie*:

- Para os coeficientes de aproximação do efeito corona é notável que existe um aumento da amplitude do sinal no final da janela.
- Os coeficientes de detalhe do efeito corona possuem maiores variações de amplitude, enquanto os coeficientes de detalhe para o ruído de fundo

apresentam uma rápida diminuição seguida de um rápido aumento no início do tempo.

- Os coeficientes de detalhe para o efeito corona possuem, em sua maioria, um pico máximo e mínimo separados por um intervalo de tempo entre si.

#### 4.3 Análise da família Haar com 1 nível de aproximação e detalhe

A Fig. 14 e a Fig. 15 mostram os coeficientes Wavelet de aproximação e detalhe para o nível 14 da família Haar.

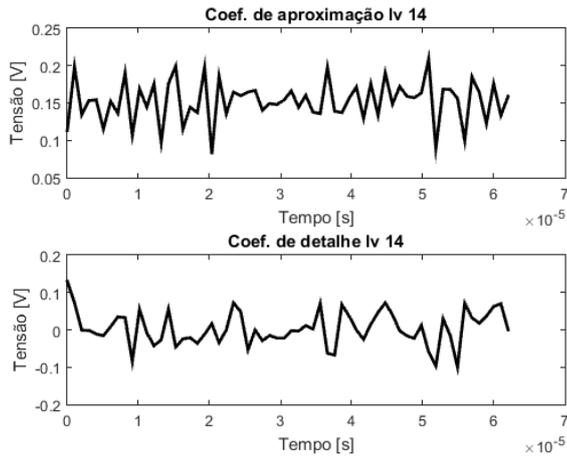


Figura 14 – Transforma wavelet usando a wavelet mãe Haar e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de ruído de fundo.

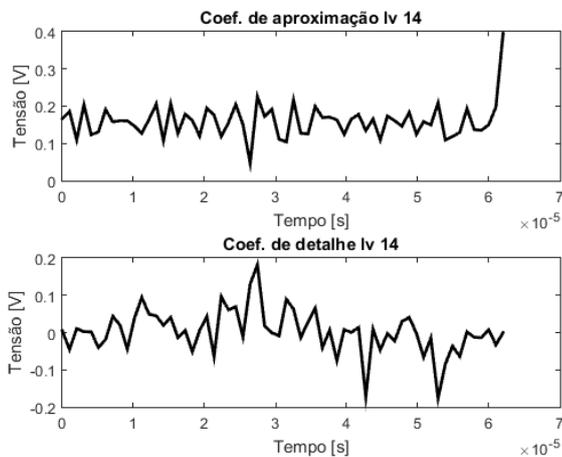


Figura 15 – Transforma wavelet usando a wavelet mãe Haar e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de corona.

Para a família Haar, são apontadas as considerações 1 e 3 realizadas sobre a família Daubechie.

#### 4.4 Análise da família Meyer com 1 nível de aproximação e detalhe.

As Fig. 16 e Fig. 17 apresentam os coeficientes Wavelet de aproximação e detalhe para o level 14 da família Meyer. É

possível notar que a família meyer não mostrou diferenças consideráveis entre os dois sinais.

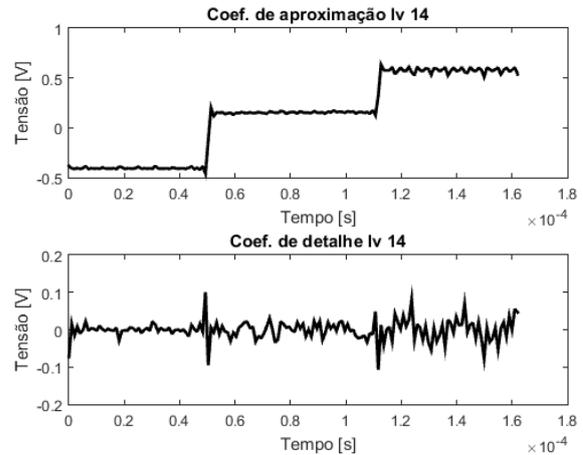


Figura 16– Transforma wavelet usando a wavelet mãe Meyer e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de ruído de fundo.

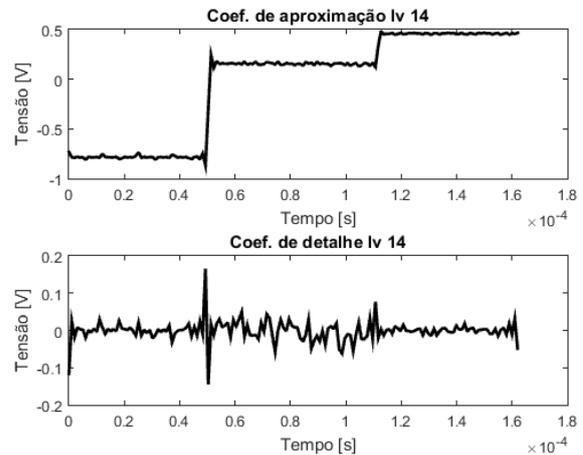


Figura 17 – Transforma Wavelet usando a Wavelet mãe Meyer e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de corona.

#### 4.5 Análise da família Coiflet com 1 nível de aproximação e detalhe

A Fig. 18 e a Fig. 19 apresentam os coeficientes Wavelet de aproximação e detalhe para o nível 14 da família Coiflet. O coeficiente de aproximação da família Coiflet mostra que existe um aumento de amplitude de tensão no final da janela de tempo, assim como os coeficientes de aproximação para o efeito corona possuem maior variabilidade.

#### 4.6 Análise da família Symlet com 1 nível de aproximação e detalhe

Para a família Symlet são apontadas as considerações 1 e 3 relativas a família Daubechie.

As Fig. 20 e Fig. 21 mostram os coeficientes Wavelet de aproximação e detalhe para o level 14 da família Symlet.

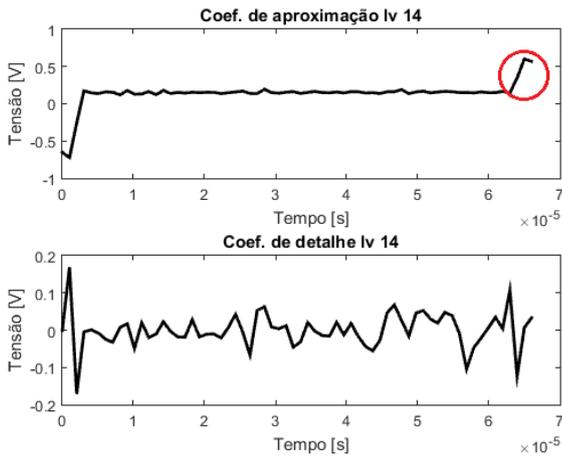


Figura 18– Transforma wavelet usando a wavelet mãe *Coiflet* e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de ruído de fundo.

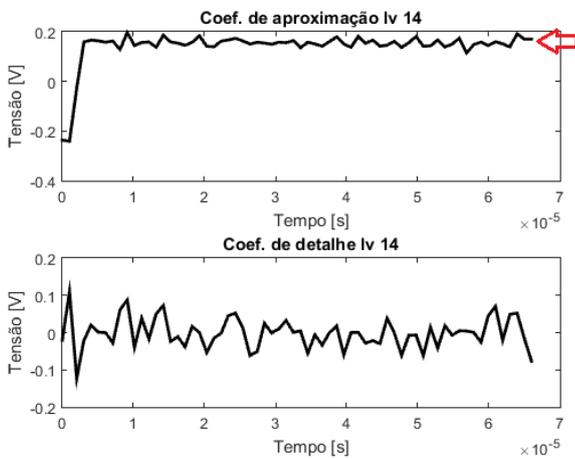


Figura 19 – Transforma wavelet usando a wavelet mãe *Coiflet* e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de corona.

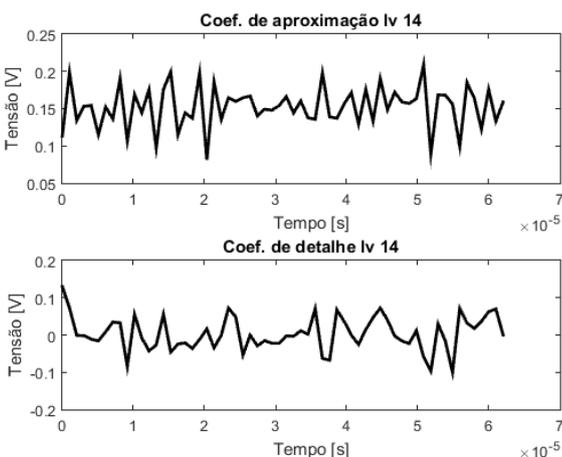


Figura 20– Transforma wavelet usando a Wavelet mãe *Symlet* e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de ruído de fundo.

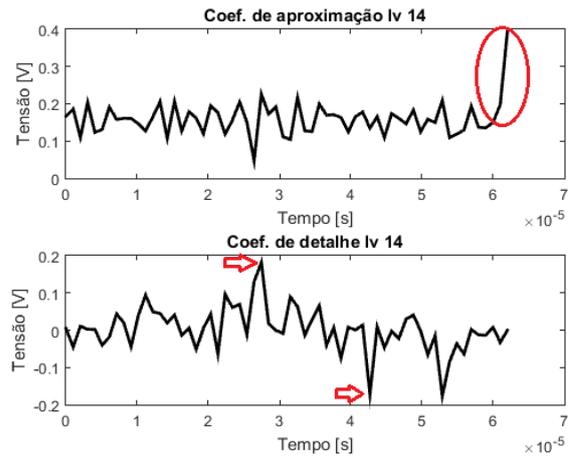


Figura 21 – Transforma wavelet usando a wavelet mãe *Symlet* e o nível 14 de aproximação e detalhe para um sinal de corona.

## 6. CONCLUSÕES

Através das análises gráficas realizadas, é possível notar que a transformada de Wavelet extremamente adequada para o processamento de sinais acústicos. Como demonstrado, os níveis mais altos da transformada, nível 13, 14 e 15 são os que apresentam, de forma visível, discrepâncias entre o sinal de ruído e o de corona.

Os testes com diversas famílias demonstram que as famílias *Daubechie*, *Haar* e *Symlet* são as mais promissoras para a identificação e classificação de padrões. A família *Coiflet* apresentou apenas um padrão observável de diferença entre os sinais. Por outro lado, a família *Meyer* não apresentou diferenças observáveis.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Os autores agradecem ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico através do projeto PD-05785-2107/2021 – DE2107: “Desenvolvimento de metodologia para avaliação da degradação da isolamento de transformadores de instrumentos e para-raios energizados por meio da medição ultrassônica de descargas parciais.”, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em parceria com a CPFL Transmissão.

## REFERÊNCIAS

- Chen, L. J., Lin, W. M., Tsao, T. P., & Lin, Y. H. (2007). ‘Study of partial discharge measurement in power equipment using acoustic technique and wavelet transform’. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(3), 1575–1580.
- Chen, L. J., Tsao, T. P. and Lin, Y. H. (2005) ‘New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology’, IEEE Transactions on Power Delivery, 20(4), pp. 2501–2508.
- Chui, C. F. (1992) ‘An Introduction to Wavelets’, San Diego: Academic. Press Inc.

- Domingues, M. O. et al. (2016) ‘Explorando a transformada wavelet contínua’, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(3).
- Kutz, J. N. (2013) ‘Data-Driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data’, Oxford University Press, Oxford, UK.
- Kweon, D. J., Chin, S. B., Kwak H. R., Kim J. C., and Bin Song, K. (2005) ‘The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer,’ *IEEE Trans. Power Delivery*, 20(3), pp. 1976–1983.
- Peng, X., Yang, F., Wang, G., Wu, Y., Li, L., Li, Z., Bhatti, A. A., Zhou, C., Hepburn, D. M., Reid, A. J., Judd, M. D., & Siew, W. H. (2019). ‘A Convolutional neural network-based deep learning methodology for recognition of partial discharge patterns from high-voltage cables’. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(4), 1460–1469.
- UE Systems. ‘Ultraprobe Introduction Manual’. Disponível em: [www.uesystems.com](http://www.uesystems.com).