

## **SIMULAÇÃO DE DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CABOS DE REDE ELÉTRICA SUBTERRÂNEA UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET <sup>1</sup>**

### **SIMULATION OF DETECTION OF PARTIAL DISCHARGES IN UNDERGROUND NEA ELECTRICAL NETWORK CABLES USING TRANSFORMED WAVELET**

**Abilio da Silva Lima<sup>2</sup>, Gustavo Eckhardt<sup>3</sup>, Airam Teresa Z. R. Sausen<sup>4</sup>,  
Paulo Sérgio Sausen<sup>5</sup>, Maurício de Campos<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Projeto em parceria entre a Unijuí (GAIC) e a CEEE-D para Pesquisa e Desenvolvimento de Sistema de Descoberta de Conhecimento para Apoio a Tomada de Decisões Aplicado ao Controle de Operações do Sistema Duplo Radial Subterrâneo de Média Tensão.

<sup>2</sup> Bolsista; Aluno do curso de pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional.

<sup>3</sup> Bolsista PROFAP/CEEE, aluno do curso de Engenharia Elétrica da Unijuí.

<sup>4</sup> Professora, Doutora e Pesquisadora na Unijuí, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS.

<sup>5</sup> Professor, Doutor e Pesquisador na Unijuí, Bolsista produtividade CNPq DT 2, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS.

<sup>6</sup> Professor, Doutor e Pesquisador na Unijuí, Bolsista produtividade CNPq DT 2, Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS.

### **RESUMO**

Para as redes de distribuição de energia elétrica em sistemas subterrâneos, as falhas na isolação dos componentes da rede são as principais causas de interrupção no fornecimento. Métodos de diagnóstico do estado de degradação dos materiais isolantes dessas redes, se tornam fundamentais para aumentar a confiabilidade desses sistemas. Para cabos e componentes isolados, os principais fenômenos vinculados à degradação dessas camadas isolantes são as descargas parciais e as arborescências. Identificar o início da ocorrência de descargas parciais é essencial para realizar um diagnóstico assertivo e eficaz do estado de deterioração da isolação. Nesse ponto, simular a ocorrência desses fenômenos nas redes subterrâneas é necessário para estudá-los e buscar diagnosticar o estado da isolação. Para tornar possível a realização dessas simulações, esse trabalho reproduz a decomposição de sinais utilizada para identificação de descargas parciais em cabos isolados.

**Palavras-chave:** Descargas parciais. Redes subterrâneas. Cabos isolados. Diagnóstico. Transformada wavelet.

### **ABSTRACT**

For electricity distribution networks in underground systems, faults in the insulation of network components are the main causes of interruption in supply. Methods for diagnosing the state of degradation of insulating materials in these networks become fundamental to increase the reliability of these systems. For cables and insulated components, the main phenomena linked to the degradation of these insulating layers are partial discharges and trees. Identifying the beginning of the occurrence of partial discharges is essential to carry out



an assertive and effective diagnosis of the state of deterioration of the insulation. At this point, simulating the occurrence of these phenomena in underground networks is necessary to study them and seek to diagnose the state of insulation. To make it possible to carry out these simulations, this work reproduces the signal decomposition used to identify partial discharges in insulated cables.

**Keywords:** Partial discharges. Underground Network. Insulated cables. Diagnose. Wavelet transform.

## INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos pilares da sociedade moderna e, por consequência, da vida dos cidadãos. A eletricidade está presente em residências, estabelecimentos comerciais, escolas, transportes, indústrias, atividades recreativas, entre outras. No entanto, apesar de sua importância, ela acaba passando despercebida para a maioria das pessoas, que só a percebem no momento de falta.

A energia elétrica chega às unidades consumidoras por meio do Sistema Elétrico de Potência (SEP). O SEP é dividido em quatro grandes sistemas: geração, transmissão, distribuição e utilização (consumidores). Segundo Casazza et al. (2011), no sistema de distribuição, a eletricidade atende a uma ampla variedade de usos finais, seja desde a simples iluminação, o aquecimento, os usos industriais e até os casos críticos como os usos hospitalares, os quais podem ser determinantes para a manutenção da vida dos seus pacientes. Cada consumidor tem seu próprio conjunto exclusivo de requisitos para o uso da energia elétrica e, com esses requisitos, diferentes necessidades de confiabilidade do fornecimento.

Os sistemas de redes de distribuição subterrâneas proporcionam maior confiabilidade, pois não estão expostos a descargas atmosféricas, ventos, pássaros, chuvas, contaminação ambiental (poluição ou salinidade) e abalroamentos. Dessa maneira, em sistemas elétricos subterrâneos, as falhas de maior incidência são as falhas de isolamento, que levam a curtos-circuitos. Os curtos-circuitos podem ocorrer entre fase-terra, fase-fase, bifásico-terra, trifásico ou mesmo trifásico-terra. Falhas por curto-circuito podem ser causadas por defeitos nas isolações dos cabos (TLEIS, 2019).

O envelhecimento e deterioramento da isolação dos cabos e acessórios em sistemas subterrâneos, levam a falhas e interrupções no fornecimento de energia. Durante o



envelhecimento, as camadas de isolamento perdem suas propriedades dielétricas permitindo que surjam faltas incipientes (Mousavi et al, 2009). As faltas incipientes aceleram a degradação do dielétrico por meio das descargas parciais, formando árvores elétricas que, em seu estágio final, levam ao colapso da isolamento e consequente interrupção no fornecimento de energia.

Conforme expõe Boggs et al. (2000), as descargas parciais geram sinais de tensão e corrente entre os condutores do sistema, como resultado da mudança na configuração do campo elétrico. Baseado nessa afirmação, alguns autores propõem métodos para diagnosticar a degradação no dielétrico a partir da medição de descargas parciais. Nesse sentido, Cavallini et al. (2003) buscam identificar as descargas parciais, classificá-las quanto à sua origem e magnitude através do monitoramento dos sinais gerados na conexão com o sistema de aterramento. Kulkarni et al. (2014) apresentam método de localização dos pontos de degradação da isolamento, a partir de um algoritmo que utiliza dados de forma de onda, coletados por monitores de qualidade de energia, para estimar a distância da falta incipiente por meio da impedância.

Jannati et al. (2019) propõem uma estratégia de monitoramento em duas etapas para detectar os transientes monofásicos e distinguir faltas incipientes de outras condições semelhantes no sistema de distribuição. Ainda, Mousavi et al. (2009) desenvolveram um sistema de avaliação de condição, baseado em medição automatizada para distribuição subterrânea. Os principais componentes do sistema incluem classificadores de padrões baseados em regras e em *support vector machine* (SVM), que utilizam recursos nos domínios do tempo e transformada wavelet para classificar padrões de cabos subterrâneos.

Conforme apresentado, os estudos em direção à evolução das soluções de avaliação do envelhecimento de sistemas subterrâneos são de grande importância para melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo replicar parte dos processos desenvolvidos por Mousavi et al. (2009), mais especificamente, a etapa de eliminação do ruído, inserindo um sinal correspondente à descarga parcial, em uma simulação de sistema elétrico subterrâneo, para detectá-la por meio da utilização de transformada wavelet.



## **METODOLOGIA**

Em seu trabalho, Mousavi et al. (2009) realizaram experimentos controlados em laboratório e coletaram dados em um circuito alimentador subterrâneo de média tensão, composto por um cabo isolado em polietileno reticulado (XLPE) de uma região residencial. A partir destes experimentos, foram coletadas informações do comportamento do fluxo de energia elétrica no alimentador. Neste trabalho, tal coleta de dados ocorre em um ambiente computacional. É utilizada a ferramenta Simulink® do software Matlab®, onde é simulado um trecho de sistema elétrico subterrâneo de média tensão da CEEE-D/Equatorial. Nesta simulação, é inserido o sinal elétrico correspondente à descarga parcial, para simular o efeito de envelhecimento nos cabos.

No sentido de reproduzir a eliminação do ruído realizado por Mousavi et al. (2009), será utilizado o mesmo processo descrito pelo autor através do uso da transformada wavelet. Para esclarecer o processo da transformada wavelet, é realizada uma breve revisão sobre seus tipos e classificações, assim como o seu funcionamento. A partir dos dados dos sinais elétricos coletados pelos medidores incluídos na simulação, é realizada a decomposição do sinal através da transformada wavelet, escolhida com o intuito de detectar o sinal elétrico característico injetado no trecho simulado do sistema elétrico.

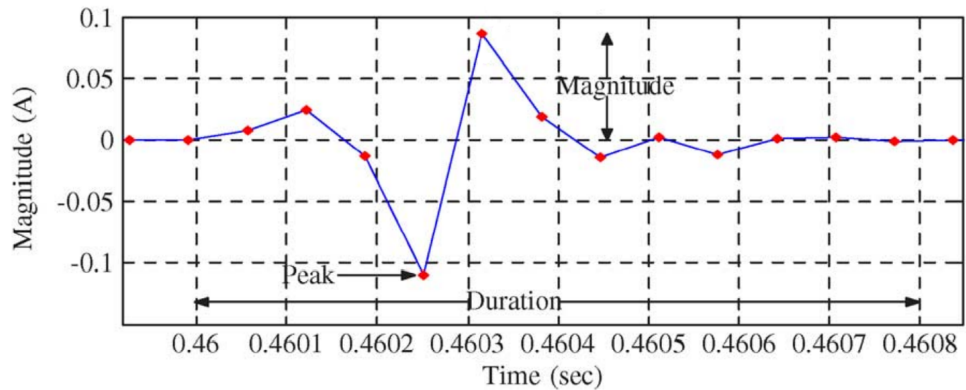
## **MODELAGEM DO FENÔMENO DE DESCARGA PARCIAL NO SIMULINK**

Como base para reproduzir o processo de eliminação do ruído por transformada wavelet, realizado por Mousavi et al. (2009), utilizou-se simulação de um trecho parcial do sistema de distribuição Radial Seletivo Subterrâneo (RSS) pertencente à CEEE-D/Equatorial. Esse trecho encontra-se no centro histórico de Porto Alegre – RS, e a simulação dele foi realizada na ferramenta Simulink® do software Matlab®.

A partir do sinal característico de uma descarga parcial, que pode ser observada na Figura 1, decomposta e apresentada por Mousavi et al. (2009), foi desenvolvido um modelo computacional por Lima et al. (2021).



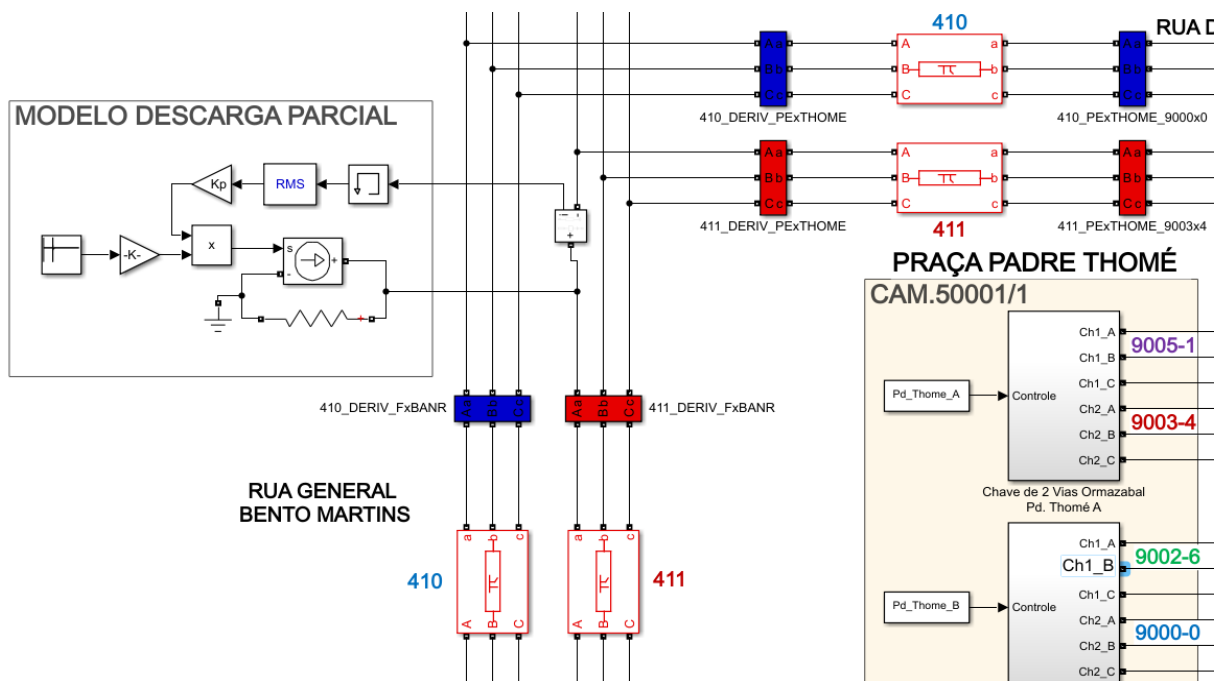
Figura 1 – Sinal característico de uma descarga parcial.



Fonte: Mousavi et al. (2009).

Na Figura 2, é apresentada a região na qual o modelo de descarga parcial foi inserido por Lima et al. (2021), na simulação do trecho do RSS. O local do sistema de distribuição foi escolhido para inserção do modelo de descarga parcial, por ser um ponto de derivação entre 3 câmaras de manobra, o que facilita a análise, visto que a simulação já conta com pontos de medição nessas câmaras.

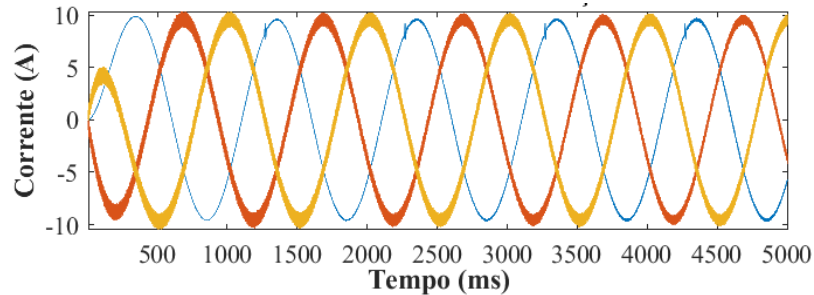
Figura 2 - Região da simulação do sistema de alimentação RSS onde o modelo foi inserido.



Fonte: Lima et al. (2021).

A partir dessa implementação, foi possível visualizar o fenômeno de descarga parcial no fluxo de corrente da simulação. Abaixo, na Figura 3, pode-se ver o pico de descarga parcial inserido na corrente da fase A da simulação.

Figura 3 – Resultados da simulação da ocorrência de descarga parcial.



Fonte: Lima et al. (2021).

Para o caso analisado neste trabalho, o modelo de descarga parcial foi incluído apenas na fase A do sistema. Blocos de ganho também foram adicionados no modelo de descarga parcial, de modo que é possível controlar a intensidade do sinal aplicado. Tais blocos auxiliam em estudos e análises de detecção destes picos em diversas condições distintas (LIMA et al, 2021).

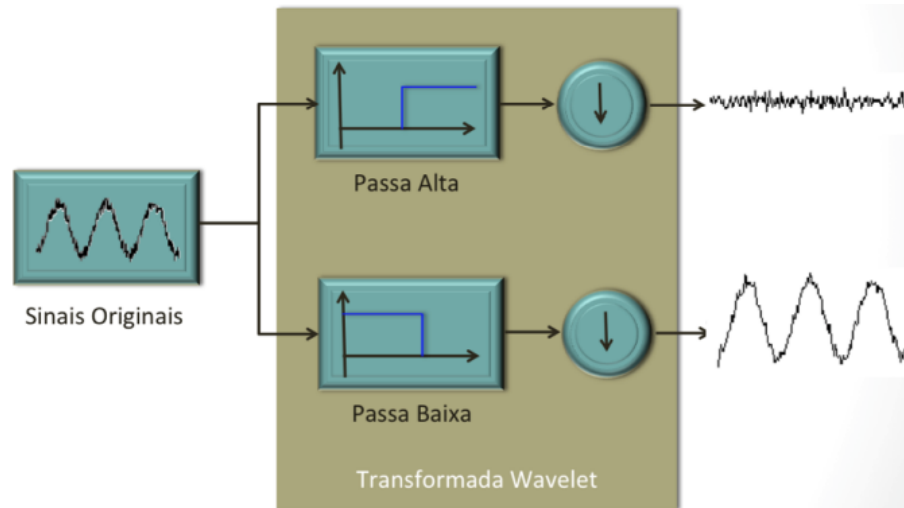
## TRANSFORMADA WAVELET

A partir da década de 80, com o desenvolvimento da transformada wavelet para a análise de sinais, muitos estudos perceberam esta, como alternativa à utilização da transformada de Fourier (CAMPOS, 2017).

A transformada wavelet é dividida em famílias distintas de funções wavelets mães. Estas são classificadas a partir das características das funções básicas. Existem as funções ortogonais, dentre elas estão as funções Daubechies, Coiflets e Symlets e Mayer. Também existem as funções bi-ortogonais, como a B-Spline e, por último, as não ortogonais como a Gaussiana, Morlet e Chapéu Mexicano.

Campos (2017) em seu trabalho, apresenta um diagrama de blocos, representado na Figura 4, para ilustrar como a transformada wavelet elimina o ruído em basicamente duas ou mais informações distintas, dependendo do nível utilizado na transformada.

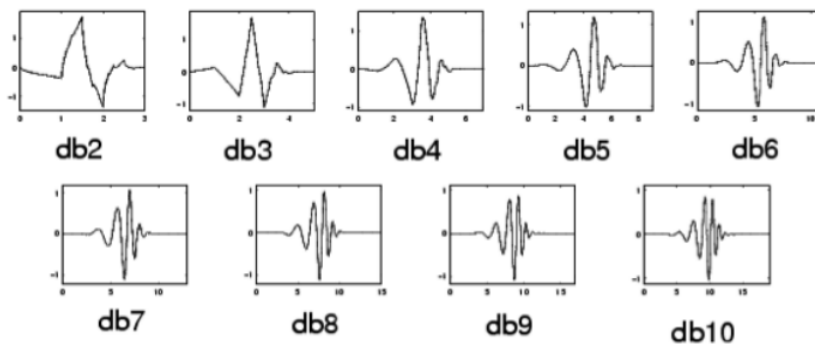
Figura 4 – Diagrama de Blocos da Transformada de Wavelet.



Fonte: Campos (2017).

Conforme exposto por Campos (2017), a partir do trabalho realizado por Ingrid Daubechies, foram criadas as wavelets Daubechies, as quais se caracterizam como uma família de wavelets ortogonais. Nesse caso, elas são definidas por uma transformada wavelet discreta, que possui um número máximo de níveis de precisão. Ingrid Daubechies, utilizando-se do trabalho de Stéphane Mallat (MALLAT, 1989), construiu um conjunto de bases ortonormais de wavelets suaves e com suportes compactos. Essas bases estão demonstradas na Figura 5.

Figura 5 – Transformada wavelet Daubechies.



Fonte: Campos (2017).



Os trabalhos de Ingrid Daubechies deram início a outras aplicações utilizando as transformadas wavelet. Conforme a Figura 5, a cada nível da transformada wavelet Daubechies, o filtro torna-se mais seletivo e dessa maneira mais etapas de filtragem são utilizadas.

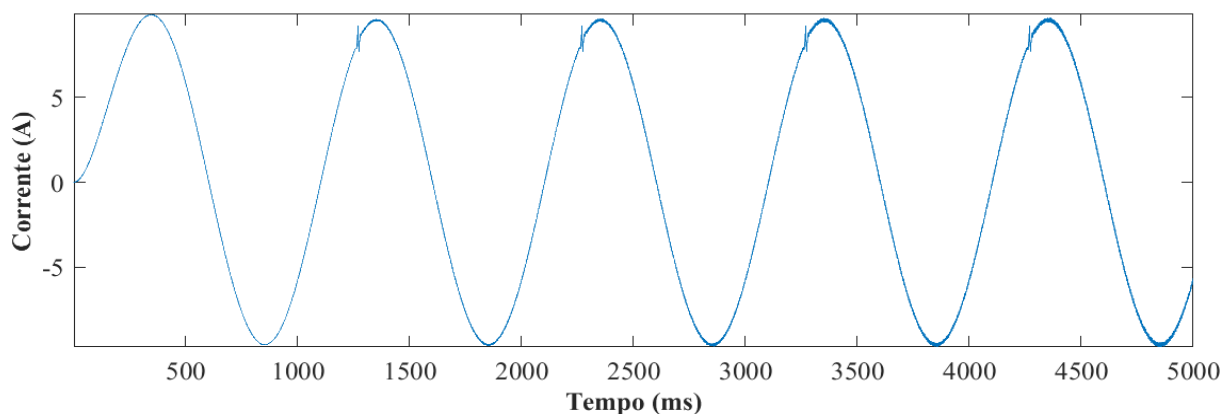
### REPRODUÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DE SINAIS UTILIZADA POR MOUSAVI

Para atingir o objetivo de reproduzir o processo de eliminação do ruído por uma transformada wavelet, realizado por Mousavi et al. (2009), foi utilizada a ferramenta Wavelet Analyzer™ do software Matlab®. Nela é possível escolher diversas formas para a análise de ondas. No caso da corrente elétrica da fase A da simulação, foi utilizada a função ortogonal desenvolvida por Daubechies.

Para realizar a análise desta curva, foram utilizados os mesmos parâmetros apresentados no artigo de Mousavi et al. (2009). A eliminação do ruído foi configurada no 4º nível usando wavelets “Db4”.

Nas figuras 6 e 7, estão apresentadas as correntes da fase A da simulação. Na Figura 6, está a corrente antes da aplicação de wavelet e na Figura 7, está a corrente da fase A depois da eliminação do ruído.

Figura 6 – Gráfico da corrente na fase A antes da decomposição.

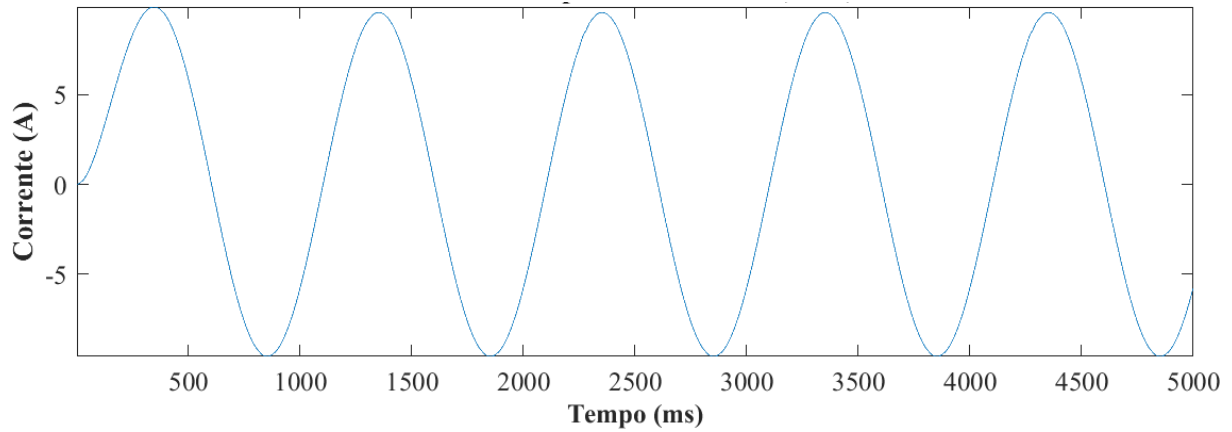


Fonte: Elaborado pelos autores.





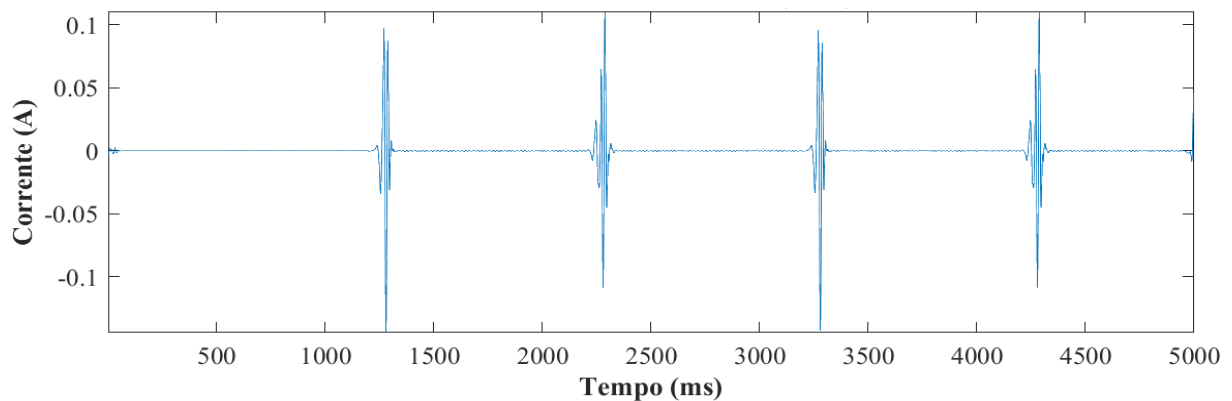
Figura 7 – Gráfico da corrente na fase A após decomposição.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A eliminação do ruído funciona como um filtro para separação do sinal de corrente elétrica. Dessa maneira, foi possível analisar os sinais filtrados do sinal original. Na Figura 8, é possível observar o sinal filtrado como produto da eliminação do ruído, configurada no 4º nível e usando wavelets “Db4”.

Figura 8 – Gráficos das correntes de ruído decomposta por wavelet (db4).

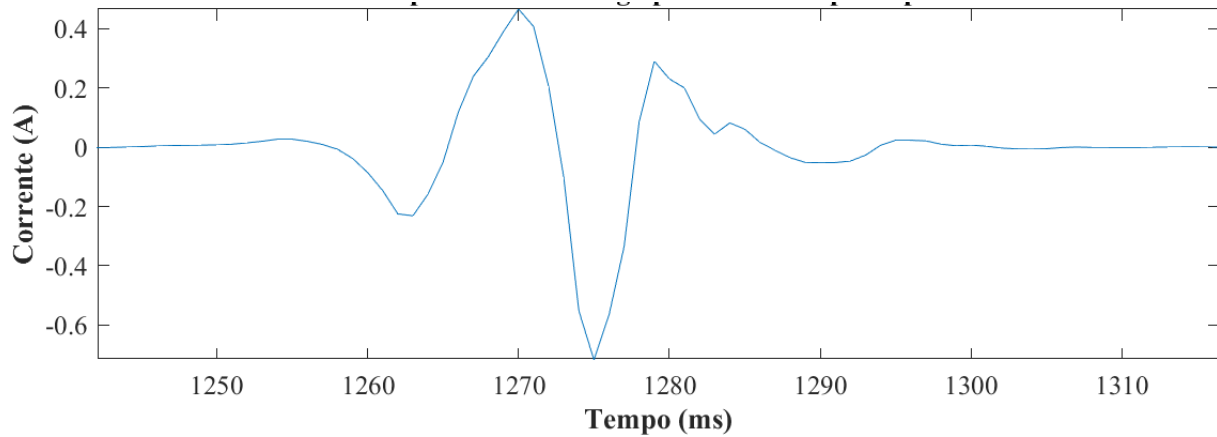


Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 8, pode-se visualizar o gráfico de corrente do sinal filtrado, conforme mencionado acima. Na Figura 9, é apresentado este mesmo gráfico com a ampliação do sinal da descarga parcial.



Figura 9 – Descarga parcial decomposta por wavelet.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Desse modo, é demonstrado através de simulação que é possível extrair dos sinais monitorados da corrente elétrica, informações que podem auxiliar na detecção de eventos de descargas parciais. No trabalho de Mousavi et al. (2009), a partir desse ponto, é feita uma série de classificações para distinguir as descargas parciais de outras informações no gráfico filtrado de wavelets 4º nível “Db4”. Classificando as descargas parciais em amplitude e frequência de ocorrência, para assim avaliar o envelhecimento dos cabos isolados de energia elétrica.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da importância da energia elétrica na vida cotidiana da população atualmente, ainda não é possível garantir a entrega aos consumidores finais com 100% de confiabilidade. Mesmo os tipos de redes que conseguem entregar índices maiores de confiabilidade, como os sistemas subterrâneos, sofrem com o envelhecimento de seus componentes. Buscar mitigar a duração e a frequência das faltas de energia elétrica para os usuários é uma das obrigações de qualquer agente envolvido na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Nesse contexto, o presente artigo aplicou uma metodologia que permite identificar, a partir da eliminação do ruído característico, uma descarga parcial. Esse modelo pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de identificação de processos de envelhecimento em cabos isolados de média tensão. Sistemas baseados nesses modelos podem auxiliar na localização e



prevenção de possíveis falhas na isolação dos cabos e seus componentes de forma menos intrusiva e destrutiva do que os métodos atualmente utilizados.

A utilização da transformada de wavelet a partir da família Daubechies, como uma das possibilidades para identificação de sinais, que pode demonstrar a existência do fenômeno real de descarga parcial em um cabo isolado de média tensão, instalado em rede subterrânea de distribuição de energia elétrica.

Esse processo de eliminação do ruído é a base para as etapas de avaliação do grau de envelhecimento de um cabo isolado. E, dessa forma, a transformada wavelet apresenta um bom desempenho nestes primeiros estudos no sentido de detectar a presença de descargas parciais. Como trabalhos futuros, pretende-se entender os cenários de simulação, incluindo valores de fluxo de carga real e ruídos para que se possa propor uma metodologia abrangente para diagnosticar se o material avaliado está em um nível de envelhecimento avançado e próximo a uma possível falha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGGS, S.; DENSLEY, J.. Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 13-18, set. 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/57.871416>.

CAMPOS, Maurício de. **Detecção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Primários de Energia Elétrica**. 2017. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

CASAZZA, Jack; DELEA, Frank. **Understanding Electric Power Systems: an overview of technology, the marketplace, and government regulation**. 2. ed. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc, 2011.

CAVALLINI, A.; MONTANARI, G.C.; CONTIN, A.; PULLETTI, F. A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 23-30, mar. 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mei.2003.1192033>.

JANNATI, Mohsen; VAHIDI, Behrooz; HOSSEINIAN, Seyed Hossein. Incipient Faults Monitoring in Underground Medium Voltage Cables of Distribution Systems Based on a Two-Step Strategy. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 1647-1655,



ago. 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).  
<http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2019.2917268>.

KULKARNI, Saurabh; SANTOSO, Surya; SHORT, Thomas A.. Incipient Fault Location Algorithm for Underground Cables. **IEEE Transactions On Smart Grid**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 1165-1174, maio 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).  
<http://dx.doi.org/10.1109/tsg.2014.2303483>.

LIMA, Abilio da Silva; ECKHARDT, Gustavo; SAUSEN, Airam Teresa Z. R.; SAUSEN, Paulo Sérgio; CAMPOS, Maurício de. Modelagem matemática do comportamento dinâmico de descargas parciais em cabos de rede elétrica subterrânea em média tensão. **Salão do Conhecimento 2021: XXVI Jornada de Pesquisa, Ijuí, out. 2021. Anual**.

MALLAT, S.G.. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 674-693, jul. 1989. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).  
<http://dx.doi.org/10.1109/34.192463>.

MATHWORKS. Simscape – Matlab & Simulink. 2021. Disponível em:  
<https://www.mathworks.com/products/simscape.html>. Acesso em: 18 jul. 2021.

MOUSAVI, M.J.; BUTLER-PURRY, K.L.. A Novel Condition Assessment System for Underground Distribution Applications. **IEEE Transactions On Power Systems**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 1115-1125, ago. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).  
<http://dx.doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2022977>.

TLEIS, Nasser. **Power Systems Modelling and Fault Analysis: theory and practice**. 2. ed. London: Academic Press, 2019.