

## Avaliação de métodos para detecção de descargas parciais em transformadores

Fernando G. K. Guarda\*, Aécio de Lima Oliveira\*\*

João Vitor Maccari Brabo Castro\*\*\*, Artur Dala Nora Quatrin\*\*\*, Kaynan Maresch\*\*\*, Guilherme Dhein\*, Ghendy Cardoso Jr.\*\*\*, Cristian Hans Corrêa\*\*\*\*, Erick Finzi Martins\*\*\*\*

\*Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, RS, Brasil ([fernando.guarda@ufsm.br](mailto:fernando.guarda@ufsm.br)) ([gdhein@redes.ufsm.br](mailto:gdhein@redes.ufsm.br))

\*\*Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, ([aecio.oliveira@ufsm.br](mailto:aecio.oliveira@ufsm.br))([ghendy@ufsm.br](mailto:ghendy@ufsm.br))

\*\*\*Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil, CEESP-LAPES

([jvbrabo@outlook.com](mailto:jvbrabo@outlook.com))([dalanoraquatrin.eng@gmail.com](mailto:dalanoraquatrin.eng@gmail.com))([msc.maresch@gmail.com](mailto:msc.maresch@gmail.com))

\*\*\*\*CPFL Transmissão, Porto Alegre, Brasil ([cristianc@cee.com.br](mailto:cristianc@cee.com.br)) ([Erick.martins@cee.com.br](mailto:Erick.martins@cee.com.br))

---

**Abstract:** In this paper, several methods for detecting partial discharges in transformers will be discussed. The occurrence of partial discharges in electrical equipment is of great concern to energy companies, as they are defects that are often not noticeable during a visual inspection. This causes the partial discharge to evolve into a more severe defect, often causing the need to remove equipment from service. The different methods for detecting partial discharges will be discussed and their characteristics and applicability will be investigated. In addition, the main advantages and disadvantages of each method will be presented.

**Resumo:** Neste artigo diversos métodos para detecção de descargas parciais em transformadores serão abordados. A ocorrência de descargas parciais em equipamentos elétricos é de grande preocupação para empresas de energia, pois são defeitos que muitas vezes não são perceptíveis durante uma inspeção visual. Isso faz com que a descarga parcial evolua para um defeito mais severo, muitas vezes causando a necessidade de remover o equipamento de serviço. Os diferentes métodos para detecção de descargas parciais serão abordados e terão suas características e aplicabilidade investigados. Além disso, serão apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada método.

**Keywords:** Partial Discharges; Transformers; Ultrasound; Artificial Intelligence; Wavelet Transform.

**Palavras-chaves:** Descargas parciais; Transformadores; Ultrassom; Inteligência artificial; Transformada Wavelet.

---

### 1. INTRODUÇÃO

A manutenção de equipamentos elétricos em subestações são indicadores de reestruturação e qualidade gerencial do setor elétrico brasileiro. Estender o tempo de vida útil de equipamentos, bem como otimizar o tempo entre manutenções são imposições prioritárias para as empresas de energia.

A REN 643/2014 (ANEEL,2014) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) impulsionou as tratativas de renovação das instalações e equipamentos do sistema interligado nacional (SIN). Portanto, a avaliação preditiva de equipamentos permite avaliar sua integridade, possibilitando o planejamento de ações futuras para estender a vida útil destes.

Considerando as características operativas das subestações de energia, seus equipamentos estão sujeitos a diversos tipos de defeitos. Esses defeitos podem ser aparentes, como curtos-circuitos e descargas atmosféricas ou não aparentes ou

silenciosos, como falhas em enrolamentos de transformadores, rachaduras em isoladores, entre outros.

As descargas parciais (DP) são rupturas dielétricas localizadas causadas por sobretensões transitórias de alta frequência que causam a degradação acelerada da isolação de transformadores de instrumentos (TI), podendo inclusive ocasionar falhas (Zhou et al., 2020). Essas DP devem ser medidas, analisadas e previstas para que uma manutenção preventiva seja realizada, a fim de evitar o escalonamento do defeito, o que causará consequências muitas vezes desastrosas.

Nesse sentido, a disponibilização de uma nova técnica não-invasiva para detecção de descargas parciais é capaz de auxiliar na avaliação da condição de isolamento em transformadores, sejam eles transformadores de instrumentos (Transformadores de potencial – TP e Transformadores de corrente – TC) bem como transformadores de potência e para-raios. Isso pode ser realizado por meio da medição e comparação de padrões espectrais de ruído ultrassônico sem a

necessidade de desligamento de instalações elétricas permite a redução do tempo de indisponibilidade desses equipamentos na instalação elétrica.

Tradicionalmente os métodos para detecção de DP em transformadores são divididos em: Método elétrico, que detecta pulsos elétricos nos terminais ou no aterramento do transformador (Kweon et al., 2005), Método ultrassônico, que faz uso de sinais acústicos obtidos através de sensores acoplados no tanque do transformador (Cavalcante, 2015) (Akiyoshi, 2020) ou, mais recentemente, através da aquisição de sinais ultrassônicos através de pistolas medidoras de ultrassom. Outro método é o Método Ótico, que utiliza sensores para detecção de DP à distância através de inspeção visual e também a análise de gases dissolvidos, muito utilizado para monitoramento de transformadores em serviço (Oliveira, 2008) (Cheng et al, 2021). Outro método bastante utilizado para obtenção de sinais para detecção de DP é o Método radiométrico, onde são utilizadas antenas de ultra alta frequência para detecção dos pulsos eletromagnéticos gerados pelas DP (Tenbohlen et al., 2008) (Lopez-Roldan et al., 2008) (Yoshida et al., 2011) (Li et al, 2012).

A maioria dos sinais obtidos através dos diversos métodos de medição de DP trazem consigo uma série de características transitórias, como alterações abruptas do início ao fim do sinal medido. Por isso, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de não apenas identificar a ocorrência dessas DP, mas também identificar padrões nos sinais medidos (ANEEL, 2014).

Este trabalho primeiramente apresentará conceitos sobre a detecção de descargas parciais em transformadores. Esses conceitos abordarão detalhes sobre a obtenção dos sinais característicos de DP, bem como o detalhamento sobre o tratamento desses sinais e então serão avaliados os diversos métodos propostos na literatura, analisando sua aplicabilidade e eficiência. Por fim, será apresentada uma comparação entre os principais métodos de detecção de descargas parciais, salientando as vantagens e desvantagens da aplicação de cada método.

## 2. DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES

De acordo com as normas IEC 60270 (IEC 60270, 2000) e NBR 6940 (NBR, 2017), descargas parciais (DP) são definidas como uma descarga elétrica localizada que rompe parcialmente o dielétrico entre dois meios condutores. Essas DP ocorrem devido a imperfeições presentes nos materiais isolantes, que geram intensos campos elétricos tanto nas superfícies quanto internamente. Portanto, a ocorrência de uma descarga parcial depende da intensidade do campo elétrico próximo a essas imperfeições e também do tipo de tensão aplicada (alternada ou contínua), bem como tensões transitórias de chaveamento e impulsos (Lemke, 2008).

Para o estudo das DP, muitos autores propõem métodos que envolvem a remoção de serviço do equipamento a ser avaliado. Isso traz transtornos para as empresas concessionárias de energia, visto que muitas vezes o equipamento a ser avaliado é um transformador responsável

por grande parcela da carga de uma subestação. Portanto, métodos não-invasivos para determinação e avaliação da ocorrência de DP estão sendo cada vez mais pesquisados e utilizados. Tais métodos podem utilizar sensores externos a tanques de transformadores para obtenção de sinais mecânicos ou sonoros, bem como sensores de ultrassom, que captam os sinais sonoros emitidos pelos equipamentos avaliados em determinada faixa de frequência.

A detecção de DP em transformadores envolve não só o procedimento de detecção. Primeiramente são utilizados métodos para obtenção dos sinais das descargas parciais. Após a obtenção dos sinais, através de técnicas especiais, eles devem ser tratados e analisados para verificar a caracterização de uma descarga parcial. Sendo caracterizada a DP, alguns métodos também avaliam a severidade do defeito, como mostrado no fluxograma da Fig.1.

Os métodos mais utilizados na detecção de descargas parciais podem ser divididos em quatro tipos:

- Detecção utilizando transdutores piezelétricos;
- Detecção utilizando técnicas radiométricas;
- Detecção ótica;
- Detecção ultrassônica;

Esses métodos empregados diferem principalmente em como os sinais de descargas parciais são obtidos. Após obtidos os sinais, são utilizadas técnicas para o tratamento desses sinais. Os métodos mais modernos utilizam aprendizagem de máquina, porém métodos mais tradicionais que utilizam transformadas de Fourier (Lemke, 2008), Wavelet (Kweon et al., 2005) e mais recentemente a transformada Hilbert-Huang (Chen et al. 2018).

O tratamento desses sinais possibilita a verificação de padrões presentes no domínio da frequência, tais como coeficientes da Transformada Wavelet (Chen, 2007), diferentes picos do sinal filtrado (Zhang et al., 2020), entre outros. Para a verificação desses padrões, redes neurais artificiais (RNA) são largamente utilizadas (Al-Geelani, 2015) (Peng, 2019) (Wang, 2020) (Liu, 2021). Porém, para garantir um grau aceitável de assertividade das redes neurais no reconhecimento dos padrões das DP, são necessárias muitas entradas para a rede, ou seja, diversas medições, o que muitas vezes pode tornar inviável a utilização de RNA na classificação de DP. Para contornar essa necessidade de grande volume de dados de entrada, muitos autores desenvolveram redes neurais convolucionais (Peng, 2019) (Wang, 2020), onde estas necessitam uma quantidade menor de dados de entrada para o aprendizado das redes.

Posteriormente, é possível realizar uma avaliação da severidade das DP (Petri, 2020), onde é fornecido para a equipe de manutenção da concessionária uma ferramenta de apoio à tomada de decisões, permitindo um agendamento eficiente de rotinas de manutenção, prevenindo assim interrupções prolongadas no fornecimento de energia elétrica. O grau de severidade das DP é relacionado com meio onde o equipamento está instalado. É possível perceber que em

ambientes onde a poluição superficial dos equipamentos influencia diretamente na intensidade da DP (Barrios, 2019). Outro fator determinante para o acréscimo do grau de severidade de DP é a salinidade depositada nos equipamentos. Portanto, zonas litorâneas estão diretamente suscetíveis a DP de maior intensidade do que zonas de interior.

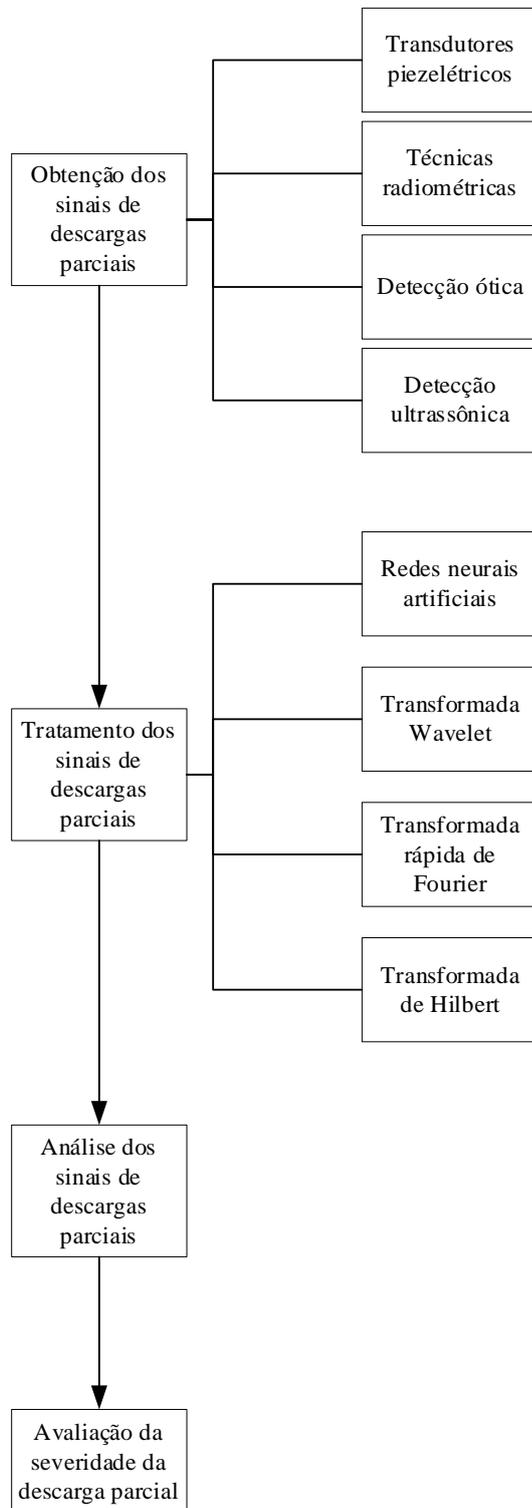


Fig.1: Procedimento de detecção, tratamento, filtragem, análise e avaliação de severidade de descargas parciais.

### 3. MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Nessa seção serão abordados os principais métodos para detecção de descargas parciais em transformadores e para-raios.

#### 3.1 Detecção de Descargas Parciais Através de Transdutores Piezelétricos

Essa técnica utiliza o efeito piezelétrico para detectar DP no interior de transformadores. Essas descargas são detectadas por sensores acústicos acoplados na carcaça do transformador. Uma das principais vantagens desse método é a localização da DP, onde é obtida pelo sensor ao converter os sinais mecânicos obtidos pelo sensor piezelétricos em sinais elétricos. Um exemplo de sensor consolidado na indústria é o R15I-AST da *Physical Acoustic South America* (PASA), mostrado na Fig. 2.



Fig. 2: Sensor Piezelétrico R15I-AST da PASA

Outra vantagem desse método é sua imunidade a interferências eletromagnéticas, sendo possível um monitoramento contínuo do estado operativo do equipamento.

Entretanto, existe um *trade-off* entre o número de sensores que devem ser instalados e a complexidade computacional necessárias para localização da falha. Caso sejam utilizados um número baixo de sensores, o erro médio na localização será considerável, provocando uma menor assertividade do método.

#### 3.2 Método de Radiofrequência

A detecção de DP utilizando técnicas radiométricas utiliza o fato de que essas descargas geram ondas eletromagnéticas na forma de interferência estática. Esses pulsos geram ondas eletromagnéticas que alcançam a faixa de Gigahertz de frequência. Na detecção de DP por *Ultra High Frequency* (UHF), onde a frequência pode variar de 300MHz a 3GHz, são acoplados sensores capacitivos similares a antenas na parede do transformador tendo acesso a sua parte interna.

Na faixa de frequência UHF os sensores são usualmente antenas de campo próximo, em forma de discos ou cones, como mostra a Fig.3.



Fig. 3: Sensor UHF comercial instalado no dreno do transformador a óleo.

Os sinais de saída para os sensores são na forma de pulsos oscilantes de alta frequência, como tensões transitórias ou pulsos de corrente exibidos no domínio do tempo como pulsos oscilantes.

Esses sensores UHF funcionam na detecção das ondas eletromagnéticas emitidas pela DP, que atingem o sensor aplicado após refletirem dentro do tanque.

Mesmo tendo um potencial de aplicação real, a instalação dos sensores de emissão eletromagnética apresentam a desvantagem de necessitarem uma linha direta do tanque, onde o número de posições disponíveis para instalação do sensor são limitadas, tanto pela presença ou não de janelas no dielétrico quando por questões de segurança.

### 3.3 Método da detecção ótica

A detecção ótica de descargas parciais utiliza sensores de fibra ótica, onde é realizada uma correlação entre a onda ultrassônica e o sinal da DP. Então, o sinal no domínio do tempo da DP é complementado pelos dados do sensor de fibra ótica, realizando uma detecção multi-pontos (Liu et al, 2021).

Essa técnica é uma tentativa de detecção de DP de forma não invasiva, utilizando uma combinação de efeito ultrassônico juntamente com deformação mecânica e transmissão de ondas através de fibra ótica.

É um método que se mostra eficiente e com boa precisão, pois é pouco suscetível a interferências do meio onde o equipamento se localiza para a obtenção dos sinais das DP.

O mecanismo de sensibilização dos sensores de fibra ótica é mostrado na Fig. 4.

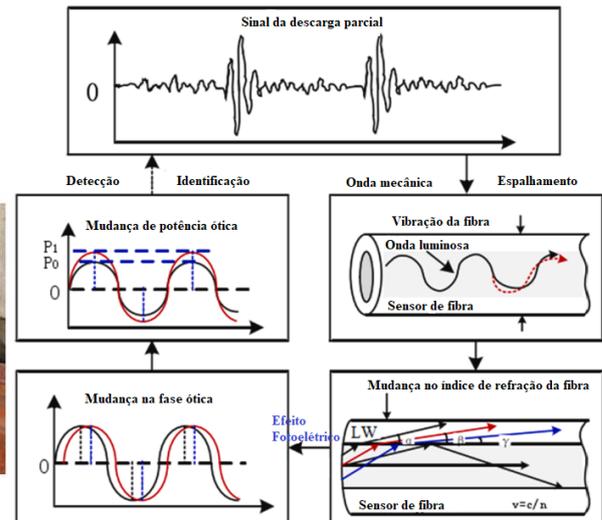


Fig.4: Diagrama de funcionamento do sensor de fibra ótica

O sinal de ultrassom gerado pela DP causa uma vibração mecânica na fibra ótica através da propagação de ondas mecânicas. Isso causará uma mudança no índice refratário da fibra. A fase da luz na fibra muda devido ao efeito fotoelétrico, o que causa uma alteração na potência ótica. Essa alteração na potência ótica é utilizada para detecção e classificação da DP.

### 3.4 Método da detecção ultrassônica

Nessa técnica, o sensor de ultrassom (pistola) mostrado na Fig.5, permite a captação direcionada, captando sinais de frequências altas e baixas, de acordo com sua frequência de amostragem.

O sensor ultrassônico ou pistola é apontado na direção do equipamento ao qual se deseja realizar a inspeção de DP a uma distância de até 25 metros.

A principal vantagem na utilização de uma pistola é que a necessidade de desenergização do equipamento pode ser dispensada.

Com a utilização desses dispositivos é também possível prever a ocorrência de uma falha quando as leituras são comparadas com manutenções tradicionais baseadas em imagens térmicas.



Fig. 5: Pistola de ultrassom Ultraprobe 15000 da UE System

Os sinais ultrassônicos são obtidos pela pistola, sua saída é armazenada em um arquivo em uma escala temporal através do uso de um osciloscópio, como mostrado na Fig. 6.



Fig.6: Medição de DP utilizando pistola e osciloscópio.

Após a obtenção dos dados no domínio do tempo, esses dados são tratados utilizando uma das técnicas mencionadas anteriormente (Transformada Rápida de Fourier, Transformada Wavelet, Transformada de Hilbert-Huang), obtendo assim os dados no domínio da frequência.

A Tabela I mostra a comparação entre os métodos utilizados para fins de comparação entre eles.

#### 4. CONCLUSÕES

Através da análise dos métodos utilizados para detecção de descargas parciais, foi possível apontar vantagens e desvantagens de cada um dos métodos estudados. O mais simples e barato é o que utiliza sensores piezelétricos para captar vibrações no núcleo dos transformadores, porém, não é indicado para detecção de DP quando uma alta precisão é necessária. Também, a utilização desses sensores para triangulação do local de ocorrência da descarga parcial é promissora, porém demanda métodos eficientes capazes de captar e tratar os sinais enviados por todos os sensores.

As técnicas radiométricas para detecção de descargas parciais utilizam uma tecnologia de antenas já consolidada, porém, se mostra inflexível, podendo ser aplicada apenas ao equipamento específico.

A detecção de descargas parciais pelo método ótico apresenta boa precisão, sendo sua principal vantagem é a pouca interferência que os sinais sofrem devido ao meio onde o equipamento se encontra. Porém, tem um elevado custo de implementação, além da dificuldade de instalação do sistema de detecção de DP.

Já a detecção utilizando pistolas de ultrassom se mostra extremamente promissora, visto que é uma técnica não invasiva e, com as tecnologias atuais de captação de ultrassom, é uma ferramenta eficiente para detecção de falhas tanto em transformadores quanto em para-raios. Apesar de sofrer com a influência de ruídos do meio onde o equipamento se localiza, métodos para a filtragem dos sinais

obtidos para eliminação desses ruídos já estão sendo implementados em diversas situações.

**Tabela I: Vantagens e Desvantagens dos métodos de detecção de descargas parciais.**

<b>Transdutores Piezelétricos</b>	Vantagens	- Simples implementação - Custo reduzido
	Desvantagens	- Baixa precisão
<b>Técnicas radiométricas</b>	Vantagens	- Fácil implementação - Quando bem calibrado, apresenta boa precisão; - Tecnologia de antenas consolidada, porém restrita;
	Desvantagens	- Impossível calibrar para a magnitude da DP; - Equipamentos operam em frequências mais altas; - Custo elevado; - Sensores de aplicação restrita e inflexível
<b>Técnicas de detecção ótica</b>	Vantagens	- Boa precisão; - Pouca interferência do meio onde ocorre a DP; - Correlação entre ultrassom, vibração mecânica e sinal ótico;
	Desvantagens	- Custo elevado; - Dificil implementação;
<b>Técnicas de detecção ultrassônica</b>	Vantagens	- Técnica de medição não invasiva; - Não necessita desenergização do equipamento;
	Desvantagens	- Grande influência dos ruídos do ambiente; - Custo Moderado; - Necessidade de tratamento eficiente dos sinais sonoros;

#### AGRADECIMENTOS

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 isolação 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

- Al-Geelani, N. A., M. Piah, M. A., & Bashir, N. (2015). A review on hybrid wavelet regrouping particle swarm optimization neural networks for characterization of partial discharge acoustic signals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45(2013), 20–35.
- Barrios, S. et al. Partial Discharge Classification Using Deep Learning Methods— Survey of Recent Progress. *Energies* 2019, 12, 2485, doi: 10.3390/en12132485.
- 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, X., & Yang, Y. (2018). Analysis of the partial discharge of ultrasonic signals in large motor based on Hilbert-Huang transform. *Applied Acoustics*, 131(August 2017), 165–173.
- IEC 60270. High-voltage test techniques – partial discharge measurements. Third edition, 2000.
- J. Lopez-Roldan; T. Tang; M. Gaskin, "Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method", *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, 2008.
- Jian Li; Tianyan Jiang; Caisheng Wang; Changkui Cheng, "Optimization of UHF Hilbert Antenna for Partial Discharge Detection of Transformers", *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, Vol. 60, 2012;
- Lemke, E. "Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270", Paris: CIGRÉ, 2008;
- Liu, Z., Wang, Y., Chen, X., Meng, X., Liu, X., & Yao, J. (2021). An optical fiber sensing method for partial discharge in the HVDC cable system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 128(January), 106749.
- Norma Técnica ABNT NBR 6940:1981 - Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Medição de descargas parciais, 2017.
- 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.
- Petri, L. de P. S. (2020). *Algoritmo para Estimativa do Grau de Severidade de Descargas Parciais em Isoladores de Alta Tensão*.
- Tenbohlen, S.; D. Denissov; S. M. Hoek; S.M. Markalous, "Partial discharge measurement in the ultra-high frequency (UHF) range", *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, 2008;
- Wang, Y., Yan, J., Yang, Z., Zhao, Y., & Liu, T. (2021). Optimizing GIS partial discharge pattern recognition in the ubiquitous power internet of things context: A MixNet deep learning model. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 125(July 2020), 106484.
- Yoshida, M.; H. Kojima; N. Hayakawa; F. Endo; H. Okubo, "Evaluation of UHF method for partial discharge measurement by simultaneous observation of UHF signal and current pulse waveforms", *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, 2011;
- Zhang, F., Wei, B., Liang, B., Wang, H., Wang, B., & Feng, G. (2020). Simulation comparison of SSE and TDOA methods for UHF direction finding of partial discharge in substation area. *Energy Reports*, 6, 416–423.