Inspeção Ultrassônica para Detecção de Descargas Parciais em Equipamentos Elétricos de Redes de Distribuição

Juliano S. Damiani* Aécio L. Oliveira* Ghendy Cardoso, Jr.* Kaynan Maresch* Luiz F. Freitas-Gutierres* Guilherme B. da Costa* Cristian H. Correa Erick F. Martins****

** Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. (e-mails: julianodamiani02092000@ gmail.com; aecio.oliveira@ufsm.br; ghendy@ufsm.br; kaynan_maresch@hotmail.com; luiz.gutierres@ufsm.br).*
*** CPFL Transmissão, Porto Alegre, RS (e-mails: cristian.correa@cpfl.com.br; erick.martins@cpfl.com.br).*

Abstract: Acoustic inspection of distribution networks is seen as one of the main tools for identifying problems in electrical equipment at an early stage. As is often the case with predictive methods, the analysis of detected phenomena can reveal valuable information about the integrity of the equipment. Therefore, this article aims to evaluate the phenomena detected in a distribution network, with a primary focus on the occurrence of partial discharges identified through ultrasonic inspection. A digital ultrasonic testing device was used to detect acoustic signals emitted from an overhead distribution system, thereby gaining more experience in electrical equipment inspection and in the identification of partial discharges.

Resumo: A inspeção acústica em redes de distribuição é uma das principais ferramentas para constatar problemas incipientes em equipamentos elétricos em um estágio inicial. Por se tratar de um método preditivo, a análise dos fenômenos detectados pode revelar informações valiosas sobre a integridade do equipamento. Mediante a isso, este artigo objetiva descrever os fenômenos detectados em uma rede de distribuição, focando principalmente na ocorrência de descargas parciais por meio da inspeção ultrassônica. Utilizou-se um medidor ultrassônico de teste para detecção de sinais acústicos em redes elétricas de distribuição aéreas. Isso permitiu adquirir uma ampla experiência na avaliação da integridade de equipamentos, bem como na identificação de descargas parciais.

Keywords: Partial Discharges; Acoustic Inspection; Distribution Systems; Electrical Equipment; Predictive Analysis.

Palavras-chaves: Descargas Parciais; Inspeção Acústica; Sistemas de Distribuição; Equipamentos Elétricos; Análise Preditiva.

1. INTRODUÇÃO

Durante as etapas iniciais de um problema em equipamentos elétricos, descargas elétricas de baixa intensidade podem ocorrer antes que uma falha propriamente dita ou um eventual desastre sucedam (L.J. Zhou et al., 2019). Nesse contexto, concessionárias de energia buscam desenvolver e executar métodos de manutenção preditiva capazes de antecipar e prevenir danos severos aos equipamentos de redes elétricas de distribuição. Isso tende a aumentar a confiabilidade do sistema e a reduzir custos ao evitar a danificação ou, até mesmo, a perda completa de equipamentos, o que pode provocar, ainda, interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Atualmente, várias abordagens tecnológicas estão sendo utilizadas para a detecção de descargas elétricas. A detecção ultrassônica, a detecção térmica por infravermelho e a detecção por imagem ultravioleta são algumas delas (Sun et al., 2021). Esses métodos de diagnóstico preveem, antecipadamente, possíveis problemas no equipamento.

Durante o processo de fabricação do equipamento, podem surgir pequenas cavidades de ar ou vazios no isolamento elétrico, levando a problemas graves a médio e longo prazos, como o colapso da estrutura dielétrica e ocorrências de Descargas Parciais (DPs).

Além disso, os incidentes de DPs também podem resultar de danos ao equipamento durante o transporte e instalação, ou devido à deposição de poluição na superfície externa e à deterioração e ao envelhecimento do material isolante, conforme mencionado na pesquisa de Rathod et al. (2022).

Neste trabalho, uma abordagem preditiva por meio de uma análise ultrassônica em redes elétricas de distribuição é realizada. O objetivo é descrever e mostrar os comportamentos dos fenômenos detectados na rede elétrica.

Na Seção 2, são descritos os conceitos e fundamentos básicos sobre DPs. Na Seção 3, a inspeção ultrassônica é descrita. Nas Seções 4 e 5 são elucidados os resultados e as conclusões da análise realizada para cada estudo dos fenômenos detectados, além de apresentar direções para futuros trabalhos.

2. DESCARGAS PARCIAIS

Conforme define a norma ABNT NBR IEC 60270 (2015), as DPs são descargas elétricas que rompem, parcialmente, a isolação entre condutores, podendo ou não acontecer de maneira adjacente a um dos elementos condutivos. Essas descargas são, costumeiramente, pulsos com duração inferior a 1μs (IEC 60270, 2015). O surgimento de DPs está vinculado, diretamente, à alta intensidade do campo elétrico que excede a constante dielétrica do material de maneira localizada, sem proporcionar um isolamento completo entre os elementos condutivos. As DPs ocorrem, geralmente, em dispositivos de alta tensão. Entretanto, as DPs podem ocorrer, também, para tensões inferiores, como as encontradas em sistemas elétricos de distribuição.

Segundo Wadhwa (2007), as DPs são agrupadas em quatro categorias:

- **Descargas Internas:** Ocorrem quando há cavidades ou espaços vazios dentro dos materiais isolantes.
- **Descargas Superficiais:** Ocorrem na superfície do material isolante na presença de umidade, impurezas ou poluentes.
- **Descargas Corona:** Ocorrem quando campos não uniformes estão presentes nas bordas dos condutores submetidos a elevados gradientes de tensão, geralmente em pontas.
- **Arborescência Elétrica (do inglês, "*Electrical Treeing*"):** Ocorre quando DPs frequentes criam rachaduras em materiais isolantes que, por sua vez, geram trilhas de condução e degradação, levando à recorrência de DPs e caminhos carbonizados.

As DPs são frequentemente acompanhadas por vários efeitos, como os efeitos ópticos, acústicos, eletromagnéticos, químicos e térmicos (IEC 60060-1, 2010). A Fig. 1 apresenta exemplos de efeitos de DPs e seus respectivos métodos de detecção.

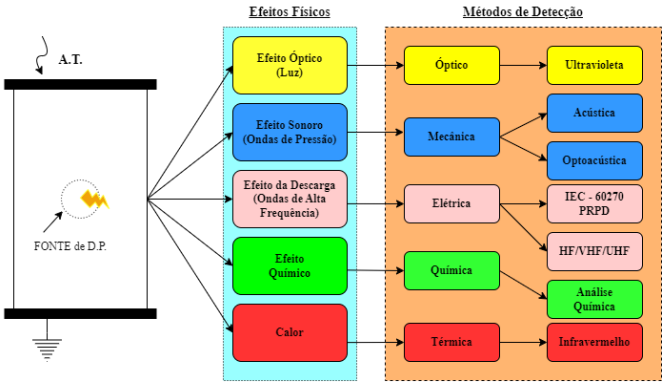

Fig. 1 Efeitos ocasionados por DPs e seus respectivos métodos de detecção. Fonte: (Rathod et al., 2022).

3. INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA

De acordo com Mondal e Kumbhar (2018), um dos métodos eficazes para prever possíveis falhas em equipamentos elétricos de distribuição é o uso de inspeção acústica (ultrassônica). Esse tipo de inspeção oferece várias vantagens, incluindo a capacidade de realizar medições enquanto o sistema está funcionando normalmente (energizado) e ser imune à interferência eletromagnética.

Existem também desvantagens da inspeção ultrassônica, como a sensibilidade a outras emissões acústicas; os sinais nem sempre são propagados pela isolação; e a interferência por ruído externo. O presente trabalho visa mitigar esses efeitos por meio do desenvolvimento de uma metodologia para a inspeção acústica de equipamentos elétricos.

Na Seção 2, observamos que as ondas sonoras são emitidas por fontes de DPs e podem ser detectadas por dispositivos especializados. Um desses dispositivos é o Sensor BS30 (SONOTEC, 2023a), que é mostrado na Fig. 2 e foi usado para realizar uma inspeção acústica de uma rede elétrica de distribuição neste estudo. Conforme indica Jermendy et al. (1998), as técnicas de detecção ultrassônica são recomendadas como métodos de diagnósticos para redes elétricas.

Fig. 2 Sensor BS30 com prato parabólico focal para a detecção de sinais de ultrassom. Fonte: (SONOTEC, 2023a).

O sensor BS30 foi projetado no formato de uma pistola e possui um prato parabólico focal que captura ondas ultrassônicas. O sensor transmite os sinais captados a um dispositivo digital (Sonaphone III) para processamento. A Fig. 3 apresenta a tela inicial do dispositivo.

Fig. 3 Sonaphone III – Dispositivo digital de teste ultrassônico. Fonte: (SONOTEC, 2023b).

Um dos aplicativos que o Sonaphone III disponibiliza é o LevelMeter, que possibilita a análise dos sinais de pressão sonora em uma ampla faixa de frequências (de 20 a 100 kHz). Mediante a isso, uma das possíveis aplicações desse medidor é, justamente, realizar a detecção de DPs em equipamentos de sistemas elétricos de potência.

Por ser um método preditivo e que depende da propagação da onda sonora, ressalta-se que esse tipo de onda mecânica pode sofrer reflexão, difração e, inclusive, interferência por ruídos externos. Dessa forma, para realizar uma inspeção acústica adequada, buscam-se sempre diferentes pontos para focar a mira do sensor BS30. Para tanto, uma das estratégias de medição é realizar a triangulação ao redor do objeto em análise, como esboça a Fig. 4.

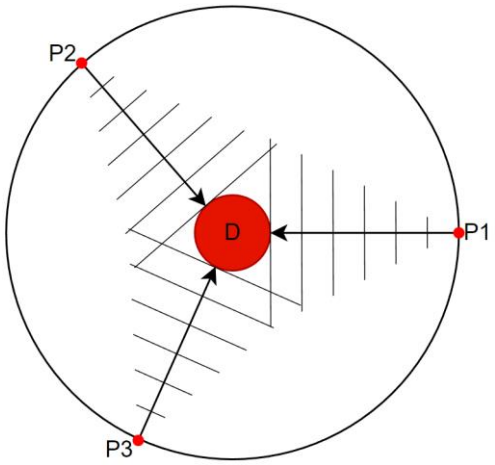

Fig. 4 Triangulação para a inspeção acústica adequada de um objeto em estudo (“D”).

Na Fig. 4, o ponto focal a ser medido (marcado como “D” em vermelho no centro da imagem) é destacado. Para realizar a triangulação em torno do elemento de interesse, os pontos P1, P2 e P3 podem ser considerados como possíveis posições de inspeção. Esse método é usado principalmente para atingir os seguintes objetivos:

- Minimizar as imprecisões do local inspecionado, permitindo a identificação precisa do ponto em que as emissões acústicas ocorrem na faixa ultrassônica.
- Reduzir o impacto do ruído externo de outros dispositivos ou do próprio ambiente.
- Identificar a posição onde está presente o maior nível de pressão sonora (em dB).
- Evitar depender única e exclusivamente da sensibilidade e do conhecimento do operador para identificar pontos problemáticos.

3.1 Rede Elétrica de Distribuição Inspecionada

Este trabalho realizou a inspeção acústica em 160 pontos na rede elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com tensão de 13,8 kV. A rede elétrica foi dividida em 13 trechos. Dentre os equipamentos inspecionados, citam-se: transformadores de distribuição, muflas, isoladores, chaves fusíveis, chaves seccionadoras, isoladores de ancoragem, banco de capacitores e religadores. A Fig. 5 mostra o diagrama unifilar da rede de distribuição inspecionada.

Fig. 5 Diagrama unifilar da rede elétrica de distribuição da UFSM.

Todos os equipamentos da rede elétrica de distribuição foram analisados e inspecionados. Além disso, temperatura e umidade relativa do ar foram mensuradas durante as inspeções. Os pontos em que foram encontradas anormalidades nos níveis de pressão sonora foram em um condutor protegido sobre cruzeta, em uma cobertura protetora em ancoragem de rede compacta, em uma chave seccionadora do tipo faca e em uma chave fusível.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisou-se cada ponto citado na seção anterior onde anormalidades ultrassônicas foram identificadas. Nas próximas subseções, cada ponto é analisado em detalhe.

4.1 Estudo de Caso I – Condutor protegido sobre cruzeta

Um dos problemas descobertos durante a inspeção foi a existência de um condutor protegido acima da cruzeta, conforme ilustrado na Fig. 6. Além disso, observou-se que havia sinais com frequências abaixo de 20 kHz nesse local específico. Esses sinais emitiam um ruído audível, semelhante ao produzido por um centelhamento. Observe que, caso o equipamento fosse considerado “saudável”, não existiria a emissão de sinais acústicos nesta faixa de frequências.

A deterioração do revestimento de XLPE que protege o condutor é uma preocupação significativa nesse caso. A situação poderia levar a um curto-circuito, o que provocaria uma queda de energia para os consumidores ligados a esse transformador.

Tendo em vista a possível gravidade do problema, a solução mais indicada para este caso específico é a realização da manutenção ativa/corretiva no ponto problemático.

Fig. 6 Ocorrência de DPs em condutor sobre cruzeta em ancoragem de rede.

A Fig. 7 mostra os componentes de frequência obtidos após a inspeção acústica no ponto mencionado acima. É importante observar que o espectrograma analisa a intensidade e a frequência do sinal sonoro gravado em um determinado período de tempo, geralmente em torno de dez segundos.

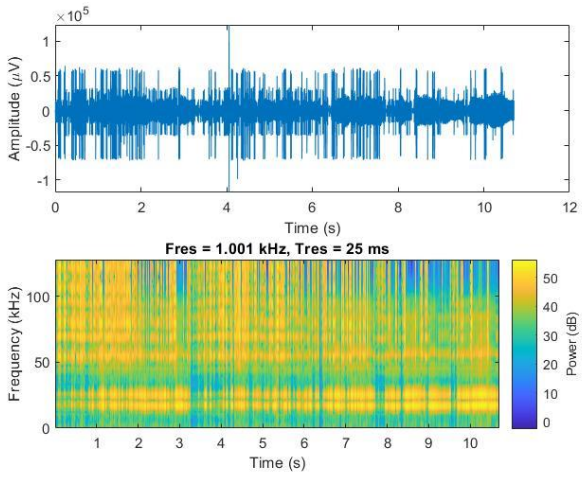

Fig. 7 Componentes de frequência do sinal analisado para o Estudo de Caso I.

Observe no espectrograma da Fig. 7 que existem componentes nas mais diversas faixas de frequência. Além disso, os valores de pressão sonora estão altos (50 dB). Esse comportamento, na faixa ultrassônica visto na Fig. 7, indica que um problema severo está ocorrendo. Além disso, conforme desenvolvido por Maresch et al. (2023), a presença de componentes de frequência na faixa ultrassônica pode indicar a existência de DPs.

4.2 Estudo de Caso II – Ponta de condutor de ancoragem

Em uma determinada seção de uma rede compacta, foi descoberto um caso que tem sido observado com regularidade em cenários de ancoragem de redes elétricas. Esse caso envolve a presença de um "rabicho" ou ponta de condutor, conforme mostrado na Fig. 8. Esse rabicho é conhecido por promover a ocorrência de DPs, especialmente do tipo corona, se tiver impurezas ou uma curvatura acentuada.

Fig. 8 Ocorrência de DPs em cobertura protetora em ancoragem de rede compacta.

A Fig. 9 esboça as componentes de frequência que foram analisadas para os sinais emitidos na região da cobertura protetora da ancoragem de rede.

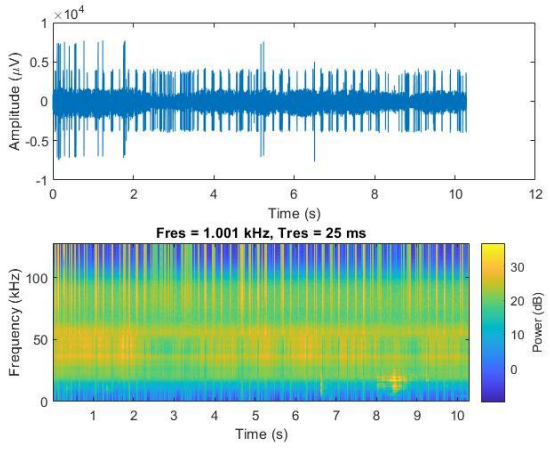

Fig. 9 Componentes de frequência do sinal analisado para o Estudo de Caso II.

Além disso, foi observada uma alta incidência de sinais acústicos na conexão da chave fusível com o condutor protegido, abaixo da capa protetora localizada no meio. O espectrograma da Fig. 9 indica que a incidência de sinal ultrassônico está na região de 50 kHz. Possivelmente, a DP do tipo corona é resultado do efeito das pontas e da ionização da região, nas proximidades da região pontiaguda.

4.3 Estudo de Caso III – Chave seccionadora

Durante a inspeção da rede elétrica da UFSM, foi observado que uma chave seccionadora do tipo faca apresentava um fenômeno interessante. A chave em questão é mostrada na Fig. 10. A área em que foram detectados níveis incomuns de pressão sonora está localizada no meio da chave seccionadora.

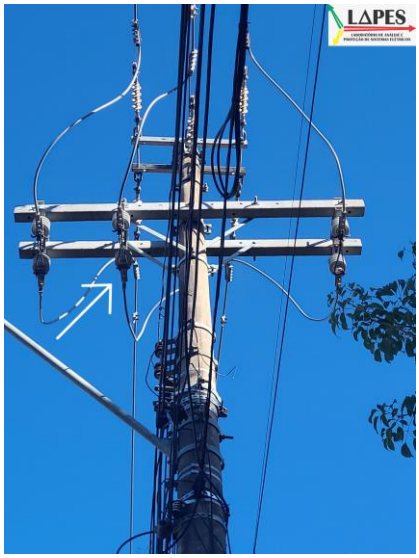

Fig. 10 Ocorrência de DPs em chave seccionadora.

Essa observação está alinhada com a pesquisa conduzida por Silva De Sá et al. (2019), onde foi constatado que o ponto de maior ocorrência de descarga nesse tipo de chave está precisamente entre os eletrodos dos terminais de linha e a base aterrada. Esse estudo também destaca os locais onde são encontradas as maiores intensidades de campo elétrico na chave seccionadora.

Além disso, como o método é baseado em triangulação para minimizar influências de ruídos, ainda assim é possível ter um indício da localização da DP em virtude da capacidade de localizar o ponto com maior incidência de emissões ultrassônicas.

Ao analisar o sinal gerado com suas componentes de frequência, notou-se a presença de componentes abaixo de 20 kHz (sinal audível e similar a um centelhamento), vide Fig. 11.

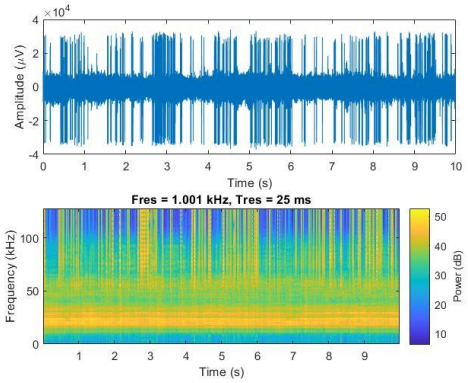

Fig. 11 Componentes de frequência do sinal analisado para o Estudo de Caso III.

É interessante notar que o espectrograma mostra que a incidência de sinal ultrassônico está precisamente na faixa de 20 kHz. A causa desse fenômeno pode estar relacionada, também, à corrente de carga dessa seção de rede, que indiretamente causa vibrações na chave seccionadora por aquecimento e dilatação.

4.4 Estudo de Caso IV – Chave Fusível

Outro ponto inspecionado, em que aconteceu anormalidade nos níveis de pressão sonora, foi em uma chave fusível de uma ramificação da rede elétrica. Detectou-se a presença de anormalidade na chave fusível do meio, ilustrada na Fig. 12.

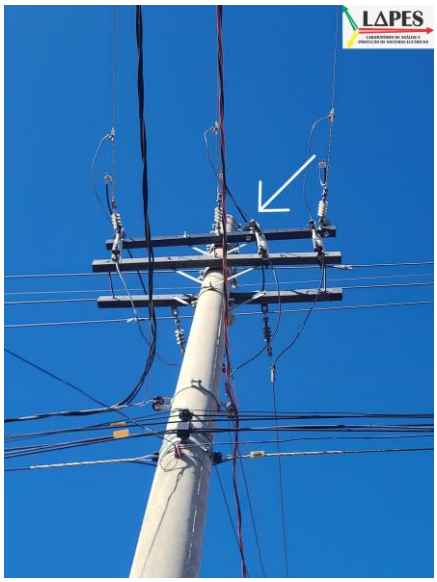

Fig. 12 Ocorrência de DPs em chave fusível.

Uma ressalva em relação aos outros casos é que não existe nenhum estudo específico que indique qual o local da chave fusível mais susceptível para ocorrência de DPs. Ao realizar a inspeção, notou-se que o ponto de maior intensidade em dB estava no isolador polimérico da chave. A Fig. 13 esboça as componentes de frequências obtidas após processamento dos sinais acústicos obtidos na inspeção da chave fusível.

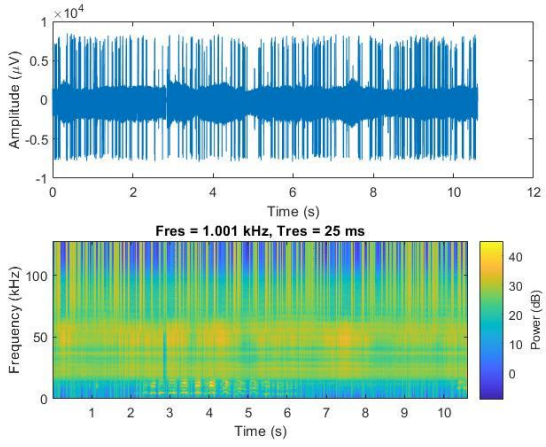

Fig. 13 Componentes de frequência do sinal analisado para o Estudo de Caso IV.

Nota-se que o espectrograma não indica uma grande tendência, existem componentes de frequência por volta dos 50 kHz. Ademais, um dos possíveis problemas é no gancho de engate da chave fusível ou no gancho próximo ao isolador polimérico. Necessita-se de uma abordagem fidedigna em um *software* que realize a implementação do método dos elementos finitos, levando em consideração, por exemplo, a intensidade do campo elétrico na chave fusível. Dessa forma, uma análise mais apurada do fenômeno poderá ser efetuada.

6. CONCLUSÕES

A importância da análise preditiva para equipamentos elétricos em redes de distribuição não pode ser subestimada. É altamente desejável que os agentes distribuidores prevejam possíveis distúrbios na rede elétrica para evitar qualquer dano aos equipamentos e garantir um fornecimento contínuo de energia.

No setor elétrico, as falhas geralmente ocorrem sem que os operadores tenham plena consciência do problema em estágios incipientes. Portanto, a análise ultrassônica em redes de distribuição oferece benefícios técnicos, conforme demonstrado nos casos analisados.

A metodologia de inspeção acústica, desenvolvida neste trabalho, permite ao operador obter uma noção de fenômenos que acontecem nos equipamentos de redes de distribuição que não são visíveis/audíveis ao ser humano. Possibilitando dessa forma, um auxílio e um mapeamento de possíveis pontos de interesse da rede de distribuição para monitoramento e previsão de eventuais falhas. Note que a ocorrência contínua de DPs pode deteriorar o equipamento ao longo do tempo.

Como pesquisas futuras, uma metodologia para examinar a gravidade das ocorrências de DPs em equipamentos e classificar os fenômenos observados está em desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por promover e viabilizar o 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, executado pelo Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em parceria com a CPFL Transmissão. Este estudo foi financiado, parcialmente, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

IEC 60060-1. (2010). High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements. *International Electrotechnical Commission*, 1–149.

IEC 60270. (2015). High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. *International Electrotechnical Commission*, 1–226.

Jermendy, L., Fogarasi, I., Simon, S. & Szabó, J., (1998). Insulation Diagnostic Methods. *Powercon '98. 1998 International Conference On Power System Technology. Proceedings (cat. No.98ex151)*, Beijing, 1-5.

L.J. Zhou, Y. Tian, W.J. Chen, S. Ling, Z. Fu, K. He, N.W. Xiang, & K. Bian. (2019). Study on the Discharge Characteristic and Detection Method on the Faulty of Distribution Insulators. *2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment.* https://doi.org/10.1109/ICEMPE.2019.8727302

Maresch, K., Freitas-Gutierres, L.F., Oliveira, A.L., Borin, A.S., Cardoso, G., Damiani, J.S., Morais, A.M., Correa, C.H. & Martins, E.F., (2023), 'Advanced Diagnostic Approach for High-Voltage Insulators: Analyzing Partial Discharges through Zero-Crossing Rate and Fundamental Frequency Estimation of Acoustic Raw Data', *Energies*, 16(16), 6033.

Mondal, M., & Kumbhar, G. B. (2018). Detection, Measurement, and Classification of Partial Discharge in a Power Transformer: Methods, Trends, and Future Research. In *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)* (Vol. 35, Issue 5, pp. 483–493). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/02564602.2017.1335244

Rathod, V. B., Kumbhar, G. B., & Bhalja, B. R. (2022). Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers based on Acoustic Emission: Theory, Methods, and Recent Trends. In *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)* (Vol. 39, Issue 3, pp. 540–552). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/02564602.2021.1871672

Silva De Sá, E., Ferreira, T. V., Andrade, A. F., Lopes, G. P., Henrique De Faria, G., Vidal, G., & Bezerra, N. (2019). Modelagem do fenômeno de ionização do ar mediante impulsos através do método dos elementos finitos. *Revista de Ingeniería Energética*, 40(2), 168–178. http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE

SONOTEC. (2023a). Broadband Parabolic Sensor for Leak Detection and Electrical Inspection up to 35 M. https://www.sonotec.eu/en/products/preventive-maintenance/ultrasonic-testing-devices/sonaphone/sensoren/bs30/

SONOTEC. (2023b). Digital Ultrasonic Testing Device for Preventive Maintenance. https://www.sonotec.eu/en/products/preventive-maintenance/ultrasonic-testing-devices/sonaphone/

Sun, Y., Chen, Y., Ci, W., Liang, J., Dong, J., Wang, H., & Zhang, B. (2021). Application of Robot Detection Equipped with Ultraviolet Imaging. IMCEC 2021 - *IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*, 408–411. https://doi.org/10.1109/IMCEC51613.2021.9482340.

Wadhwa, C. L. (2007). *High Voltage Engineering* (2nd Edition). New Age International (P) Ltd, Publishers.