



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

João Batista Soares Feitosa

**Realidade Virtual para Visualização de Descargas Parciais  
em Transformadores pela Técnica de Emissão Acústica**

Uberlândia  
2025

João Batista Soares Feitosa

**Realidade Virtual para Visualização de Descargas Parciais  
em Transformadores pela Técnica de Emissão Acústica**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Dr. Hélder de Paula

Uberlândia  
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

F311r Feitosa, João Batista Soares.  
2025 Realidade virtual para visualização de descargas parciais em transformadores pela técnica de emissão acústica [recurso eletrônico] / João Batista Soares Feitosa. - 2025.

Orientador: Hélder de Paula.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5041>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia Elétrica. I. Paula, Hélder de (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

---

CDU: 621.3

André Carlos Francisco  
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408

João Batista Soares Feitosa

**Realidade Virtual para Visualização de Descargas Parciais  
em Transformadores pela Técnica de Emissão Acústica**

Esta dissertação de mestrado foi considerada apta como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Uberlândia.

Uberlândia, 5 de março de 2025.

**Banca Examinadora:**

Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Hélder de Paula  
(Orientador)

Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Gerson Flávio Mendes de Lima  
(Examinador Interno)

Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Arismar Moraes Gonçalves Júnior  
(Examinador Interno)

Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Fernando de Souza Brasil  
(Examinador Externo)

Eletrobras/Eletronorte



### UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - [www.posgrad.feelt.ufu.br](http://www.posgrad.feelt.ufu.br) - [copel@ufu.br](mailto:copel@ufu.br)



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

|                                    |  |                 |       |                       |
|------------------------------------|--|-----------------|-------|-----------------------|
| Programa de Pós-Graduação em:      | Engenharia Elétrica  |                 |       |                       |
| Defesa de:                         | Dissertação de Mestrado, 802 PPGEELT   |                 |       |                       |
| Data:                              | Cinco de março de dois mil e vinte e cinco   | Hora de início: | 14h00 | Hora de encerramento: |
| Matrícula do Discente:             | 12312EEL006  |                 |       |                       |
| Nome do Discente:                  | João Batista Soares Feitosa  |                 |       |                       |
| Título do Trabalho:                | Realidade Virtual para a Visualização de Descargas Parciais em Transformadores pela Técnica de Emissão Acústica  |                 |       |                       |
| Área de concentração:              | Sistemas de Energia Elétrica   |                 |       |                       |
| Linha de pesquisa:                 | Sistemas Elétricos de Potência   |                 |       |                       |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Coordenador do Projeto: Alexandre Cardoso. Título Do Projeto: EUso de Realidade Virtual e Aumentada Aplicadas às Fases de Engenharia, Manutenção e Conrole do Sistema HVDC da Eletronorte. Instituição Parceira, se houver: Eletrobrás/Eletronorte e CGW. Número do Processo na Instituição Parceira, se houver: 4500062446 (P&D ANEEL). Vigência Do Projeto: 22/12/2022 a 22/12/2024. |                 |       |                       |

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Gerson Flávio Mendes de Lima (UFU/CGW), Arismar Moraes Gonçalves Júnior (UFU/UEMG), Fernando de Souza Brasil (Eletrobrás/Eletronorte) e Hélder de Paula, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Hélder de Paula, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Arismar Moraes Gonçalves Júnior, Usuário Externo**, em 06/03/2025, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hélder de Paula, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/03/2025, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gerson Flavio Mendes de Lima, Usuário Externo**, em 10/03/2025, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando de Souza Brasil, Usuário Externo**, em 10/03/2025, às 14:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6097741** e o código CRC **44CDEB16**.

À minha esposa Ana Karine de Lira Soares  
e ao meu filho João Henrique de Lira Soares.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de toda força e inspiração, que guiou cada passo desta jornada e renovou minha fé face aos desafios.

À minha família, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de ausência e amor inabalável que sempre me impulsionou a seguir em frente. Sem vocês, esta conquista não teria sido possível.

À Eletrobras Eletronorte, manifesto meu sincero reconhecimento pelo apoio e pelas oportunidades que contribuíram significativamente para meu crescimento profissional e acadêmico. Agradeço especialmente aos colegas do laboratório de ensaios elétricos, cujas instruções práticas foram essenciais para o desenvolvimento do estudo de caso desta pesquisa.

A Universidade Federal de Uberlândia (UFU) merece igualmente meu apreço pela infraestrutura e recursos disponibilizados, que tornaram esta pesquisa viável. Expresso também minha gratidão à CGWORKS e GRVA - Grupo de Pesquisas em Realidade Virtual e Aumentada, cuja colaboração foi decisiva para o avanço deste trabalho.

Por fim, expresso minha profunda gratidão ao Professor Dr. Hélder de Paula, meu orientador, por sua dedicação, sabedoria e compromisso com a excelência acadêmica. Sua orientação precisa, paciência e motivação constante foram fundamentais para superar os desafios desta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta caminhada, meu sincero e emocionado obrigado!

*"Todo tempo é tempo de acreditar que as pessoas vão se renovar."*  
São João Paulo II.

## RESUMO

Nos últimos anos, soluções para a detecção, localização e visualização de descargas parciais (DPs) em transformadores de potência têm despertado o interesse das empresas de energia elétrica. Atualmente, dentre as soluções disponíveis no mercado, a técnica de emissão acústica (EA) tem sido largamente utilizada para detectar DPs em transformadores. Com essa solução, torna-se possível, além de detectar, localizar as DPs. No entanto, a visualização das DPs localizadas pela técnica de EA é uma parte da solução que ainda carece de melhorias. Atualmente, os resultados das técnicas de EA costumam ser representados em figuras com um baixo grau de detalhamento. De fato, as soluções existentes no mercado geralmente representam o transformador, por exemplo, apenas como um hexaedro sem detalhamento dos componentes internos. Tal pobreza de detalhamento resulta em uma maior exigência do ensaísta para identificar a real localização da DP, além de dificultar a identificação de qual componente do transformador ocorreu a DP. Nesse contexto, a realidade virtual (RV) pode servir como suporte para tornar essa visualização e prognóstico ser melhor realizada. Em outras palavras, a associação da RV com a técnica de EA pode gerar uma combinação que propicie ao ensaísta uma melhor visualização dos possíveis focos de DP. Diante do exposto, nesta dissertação de mestrado, propõe-se uma metodologia baseada em RV aplicada à técnica de EA para visualizar a localização de DPs em transformadores de potência. Para fins de comparação com a solução proposta, utilizou-se como solução atual o *software* AEwin™ da *Physical Acoustics Corporation* (PAC). De acordo com os resultados, a *interface* proposta mostra-se ser vantajosa em relação a solução atual, fornecendo uma visualização mais completa do transformador e dos focos de DPs, sendo possível até a identificação do provável componente interno do transformador afetado pela DP. Dessa forma, ao utilizar a metodologia proposta, a visualização de DPs em transformadores torna-se mais fácil. Sendo assim, a solução proposta apresenta-se como uma alternativa útil e viável para aplicações reais, possibilitando melhores práticas por parte das equipes de manutenção.

**Palavras-chave:** Realidade virtual; emissão acústica; descargas parciais; transformadores, manutenção, falha, visualização, diagnóstico.

## ABSTRACT

In recent years, solutions for detecting, locating and visualizing partial discharges in transformers have been of great interest to power utilities. Among the solutions currently available on the market, the acoustic emission technique has been widely used in power transformers. By using this solution it is possible not only to detect, but also to locate the likely points where partial discharges occur. However, the visualization of the location of partial discharges detected by the acoustic emission technique still needs improvement. At present, partial discharges are usually depicted in figures with a low level of detail. In fact, the solutions available on the market generally represent, for example, the transformer as a hexahedron without detailing the internal components. This lack of specificity makes it more difficult for the tester to identify the actual location of the partial discharge, and also makes it more difficult to identify in which component of the transformer the partial discharge has occurred. In this context, virtual reality can be used as an aid to improve this visualization and prognosis. In other words, the combination of virtual reality with acoustic emission techniques can create a solution that provides the inspector with a better visualization of possible partial discharge points. In view of the above, this master's dissertation proposes a methodology based on virtual reality for application to the acoustic emission technique in the process of visualizing the location of partial discharges in transformers. For comparison purposes with the proposed solution, the *software* AEwin™ from *Physical Acoustics Corporation* (PAC) was used as the current solution. According to the results, the proposed interface proves to be advantageous in comparison with the current solution, as it allows a more complete visualization of the transformer and the partial discharge points, and even makes it possible to identify the probable internal component of the transformer affected by the partial discharge. The proposed methodology thus facilitates the visualization of partial discharges in transformers. Therefore, the proposed solution presents itself as a useful and viable alternative for real applications, allowing better practices by maintenance teams.

**Keywords:** Virtual reality; acoustic emission; partial discharges; transformers; maintenance; failure; visualization; diagnosis.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Probabilidade da Localização de Falhas em Transformadores de Potência.   | 17 |
| Figura 2 – Tipos de DP.   | 21 |
| Figura 3 – Técnicas de Detecção de DPs em Transformadores.  | 24 |
| Figura 4 – Representação de um sinal discreto de EA (Adaptado de (FILIPPIN <i>et al.</i> , 2017)).                        | 26 |
| Figura 5 – Esquema de Detecção de DPs usando a Técnica de EA.   | 27 |
| Figura 6 – Método TDoA para localização de DPs em transformador.  | 29 |
| Figura 7 – Exemplo 1: Localização de potencial falha no transformador com o AEwin <sup>TM</sup> .                         | 37 |
| Figura 8 – Exemplo 2: Localização de potencial falha no transformador com o AEwin <sup>TM</sup> .                         | 37 |
| Figura 9 – Primeiros registros da imersão sensorial - <i>interface</i> Homem-Máquina.                                     | 39 |
| Figura 10 – Visualização EA de um transformador com uma possível falha detectada.   | 44 |
| Figura 11 – Fluxograma do processo de desenvolvimento da <i>interface</i> RV.   | 45 |
| Figura 12 – Fluxograma do processo de modelagem 3D paramétrica.   | 46 |
| Figura 13 – Visualização da estrutura interna e externa do transformador utilizando a metodologia proposta.               | 47 |
| Figura 14 – Exemplo de representação de um transformador na plataforma RV, demonstrando a visualização em perspectiva 3D. | 48 |
| Figura 15 – Desenho bidimensional do projeto do transformador submetido ao ensaio EA.                                     | 50 |
| Figura 16 – Fotografia do transformador submetido ao ensaio EA.   | 51 |
| Figura 17 – Diagrama elétrico de ligações do transformador submetido ao ensaio EA.  | 51 |
| Figura 18 – Visualização do posicionamento dos sensores EA.   | 53 |
| Figura 19 – Variação de Potência.   | 54 |
| Figura 20 – Registro Hora 3.  | 58 |
| Figura 21 – Registro Hora 4.  | 60 |
| Figura 22 – Recursos de Interação da Visualização 3D com Uso da RV.   | 62 |
| Figura 23 – Registro Hora 6.  | 63 |
| Figura 24 – Registro Hora 7.  | 65 |
| Figura 25 – Registro Acumulado 24h.   | 67 |
| Figura .1 – Mapas de Atividades Acústica - 24 horas de medição.   | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação entre Técnicas de Detecção de DPs em Transformadores. . .     | 25 |
| Tabela 2 – Resumo das Revisões Bibliográficas sobre a Técnica de EA e sobre a RV. . | 42 |
| Tabela 3 – Localização dos Sensores. . . . .  | 52 |
| Tabela 4 – Resumo dos dados de medição dos Registros 3h, 4h, 6h e 7h. . . . .       | 55 |
| Tabela 5 – Coordenadas dos <i>clusters</i> para o Registro Hora 3. . . . .          | 57 |
| Tabela 6 – Coordenadas dos <i>clusters</i> gerados no Registro Hora 4. . . . .      | 59 |
| Tabela 7 – Coordenadas dos <i>clusters</i> gerados no Registro Hora 6. . . . .      | 61 |
| Tabela 8 – Coordenadas dos <i>clusters</i> gerados no Registro Hora 7. . . . .      | 64 |
| Tabela 9 – Comparação entre as Metodologias de Visualização de DPs. . . . .         | 68 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| 3D   | <i>Tridimensional</i>                 |
| AT   | Alta Tensão Elétrica                  |
| AV   | Ambiente Virtual                      |
| BT   | Baixa Tensão Elétrica                 |
| CAD  | <i>Computer-Aided Design</i>          |
| DGA  | <i>Dissolved Gas Analysis</i>         |
| DP   | Descarga Parcial                      |
| EA   | Emissão Acústica                      |
| HMD  | <i>Head-Mounted Display</i>           |
| HVDC | <i>High Voltage Direct Current</i>    |
| PAC  | <i>Physical Acoustics Corporation</i> |
| RA   | Realidade Aumentada                   |
| RV   | Realidade Virtual                     |
| SEE  | Sistema de Energia Elétrica           |
| TDoA | <i>Time Difference of Arrival</i>     |
| UHF  | <i>Ultra High Frequency</i>           |
| V    | Visualização                          |
| VHF  | <i>Very High Frequency</i>            |

# SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                    | <b>16</b> |
| 1.1      | CONTEXTUALIZAÇÃO . . . . .                                     | 16        |
| 1.2      | MOTIVAÇÃO . . . . .  | 18        |
| 1.3      | OBJETIVO . . . . .   | 18        |
| 1.4      | CONTRIBUIÇÃO . . . . .   | 18        |
| 1.5      | ESTRUTURA . . . . .  | 19        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>                         | <b>20</b> |
| 2.1      | DESCARGA PARCIAL (DP) . . . . .                                | 20        |
| 2.2      | TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE DPs . . . . .                        | 23        |
| 2.3      | PRINCÍPIOS DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA (EA) . . . . .       | 25        |
| 2.4      | REALIDADE VIRTUAL (RV) . . . . .                               | 30        |
| 2.5      | SÍNTESE DO CAPÍTULO . . . . .                                  | 34        |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>                         | <b>35</b> |
| 3.1      | EMISSÃO ACÚSTICA (EA) . . . . .                                | 35        |
| 3.2      | REALIDADE VIRTUAL (RV) . . . . .                               | 38        |
| 3.3      | RV APLICADA À EA . . . . .                                     | 39        |
| 3.4      | SÍNTESE DO CAPÍTULO . . . . .                                  | 41        |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA . . . . .</b>                                   | <b>43</b> |
| 4.1      | METODOLOGIA ATUAL . . . . .                                    | 43        |
| 4.2      | METODOLOGIA PROPOSTA . . . . .                                 | 45        |
| 4.3      | SÍNTESE DO CAPÍTULO . . . . .                                  | 49        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>                       | <b>50</b> |
| 5.1      | O ENSAIO DE EA . . . . .                                       | 50        |
| 5.2      | ANÁLISE GRÁFICA DO ENSAIO EA . . . . .                         | 56        |
| 5.2.1    | Registro Hora 3 (12/01/2022 11:35:03 - 12/01/2022 12:35:03)    | 56        |
| 5.2.2    | Registro Hora 4 (12/01/2022 12:35:03 - 12/01/2022 13:35:03)    | 59        |
| 5.2.3    | Registro Hora 6 (12/01/2022 14:35:03 - 12/01/2022 15:35:03)    | 61        |
| 5.2.4    | Registro Hora 7 (12/01/2022 15:35:03 - 12/01/2022 16:35:03)    | 64        |
| 5.2.5    | Registro Total 24h (12/01/2022 09:35:03 - 13/01/2022 09:35:03) | 66        |
| 5.3      | SÍNTESE DO CAPÍTULO . . . . .                                  | 68        |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .        | 70 |
|   | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .            | 71 |
|   | APÊNDICE A – Publicações . . . . .              | 78 |
|   | APÊNDICE B – Parametrização do AEwin™ . . . . . | 79 |
|   | APÊNDICE C – Mapas EA . . . . .                 | 80 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente demanda pela tecnologia na sociedade moderna exige um fornecimento contínuo e confiável<sup>1</sup> de eletricidade (MARQUES *et al.*, 2013). Nesse contexto, os sistemas de energia elétrica (SEEs) assumem um papel central, integrando os equipamentos responsáveis pelas etapas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Portanto, a garantia da disponibilidade e do funcionamento adequado dos equipamentos dos SEEs é estratégico para os países (ANDERS; VACCARO, 2011).

A manutenção é um dos pilares da estratégia de funcionamento dos SEEs, fundamental para assegurar o desempenho e a longevidade dos equipamentos elétricos (MARQUES *et al.*, 2013). De acordo com a (NBR 5462, 2001), as atividades de manutenção envolvem medidas e ações técnicas voltadas para a preservação e o desempenho otimizado dos sistemas elétricos. Tradicionalmente, as manutenções corretivas e preventivas predominavam. Contudo, a evolução tecnológica tem impulsionado a adoção de técnicas preditivas, como monitoramento contínuo por sensores, que permitem diagnosticar condições operacionais e antever possíveis falhas, principalmente de equipamentos críticos ou de alto custo de reparo (FILHO; CARNEIRO, 2008).

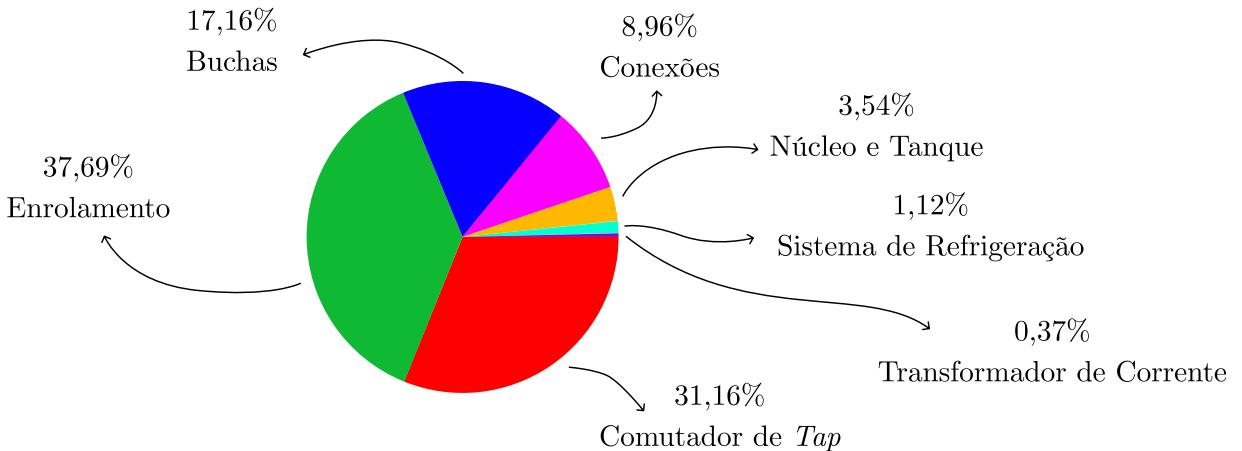
Entre os ativos críticos dos Sistemas Elétricos de Energia (SEE), os transformadores de potência se destacam pela sua função essencial na interligação entre as fases de transmissão e distribuição de energia. Esses equipamentos, caracterizados por seu alto custo e grandes dimensões, são projetados com elevada robustez para garantir confiabilidade e eficiência operacional. Contudo, os transformadores são suscetíveis a falhas, que podem resultar em interrupções no fornecimento e prejuízos econômicos significativos (FILHO; CARNEIRO, 2008).

Na Figura 1, é apresentada a distribuição percentual das localizações onde as falhas de desempenho ocorrem em transformadores (TENBOHLEN *et al.*, 2015) *apud* (HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021). Observa-se que as três principais regiões de falha são: o enrolamento (37,69%), o comutador de tape (31,16%) e as buchas (17,16%). Juntas, essas áreas representam 86,01% das ocorrências registradas. As demais falhas, totalizando 13,99%, ocorrem nas conexões (8,96%), no núcleo e tanque (3,54%), no sistema de refrigeração (1,12%) e no transformador de corrente (0,37%). Portanto, essa análise estatística da distribuição de falhas em transformadores é extremamente valiosa para direcionar os esforços de manutenção preditiva. Ela permite identificar o componente onde a falha se inicia e realizar reparos e intervenções necessárias em tempo hábil, com base na causa do problema.

As falhas em transformadores são frequentemente atribuídas a fatores como des-

<sup>1</sup> De acordo com a (NBR 5462, 2001), o termo "confiável" refere-se à capacidade de um equipamento operar sem falhas em um determinado período e sob condições definidas.

Figura 1 – Probabilidade da Localização de Falhas em Transformadores de Potência.



**Fonte:** (TENBOHLEN *et al.*, 2015) *apud* (HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021).

cargas parciais (DPs), sobrecargas térmicas e estresse mecânico. Assim, o monitoramento preditivo desses ativos é essencial para mitigar riscos e otimizar a confiabilidade do sistema (KESSLER, 2020). As DPs são fenômenos elétricos que ocorrem em regiões defeituosas do sistema de isolamento dos transformadores, como vazios, fissuras e delaminações (MOHAMMADI *et al.*, 2009). Essas descargas podem ser tanto um sintoma quanto uma causa de degradação do isolante, potencialmente levando a falhas catastróficas no equipamento.

Uma das técnicas preditivas mais utilizadas para detectar DPs é a análise de gases dissolvidos no óleo (DGA), que identifica alterações químicas nos fluidos isolantes. No entanto, a localização das fontes de DPs muitas vezes requer a utilização da emissão acústica (EA), uma técnica que permite monitorar e localizar as descargas dentro dos transformadores (STONE *et al.*, 2023). A EA utiliza sensores que captam sinais acústicos gerados pelas DPs, empregando métodos como a diferença de tempo de chegada, do inglês *Time Difference of Arrival* (TDoA) para determinar a posição das falhas (BARTNIKAS; MCMAHON, 1984).

Apesar de sua eficácia, a aplicação da EA enfrenta desafios como a complexidade das interfaces e a necessidade de *expertise* para a correta interpretação dos resultados. Em situações onde a visualização das fontes de EA é limitada ou inconclusiva, inspeções internas podem ser necessárias para um diagnóstico preciso. Essa alternativa, no entanto, eleva os custos operacionais e expõe os inspetores a riscos de segurança adicionais. Diante desse cenário, esta pesquisa propõe a integração de técnicas de realidade virtual (RV) ao monitoramento por EA, criando um ambiente interativo e imersivo que otimiza a visualização tridimensional das fontes de DPs. O objetivo principal é aumentar a precisão dos diagnósticos, reduzindo a dependência de inspeções internas e atenuando os riscos associados. Ainda, a RV pode ser integrada ao planejamento de manutenção, permitindo que as equipes visualizem rotas seguras e ferramentas necessárias, contribuindo para uma

execução mais organizada e eficaz das atividades. Estudos, como os de (BUETTNER *et al.*, 2022), demonstram que essa abordagem não apenas aprimora a segurança, mas também otimiza os processos de manutenção, reduzindo custos e aumentando a produtividade nas operações.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A representação gráfica dos resultados de EA nos *softwares* tradicionais de monitoramento de transformadores de potência apresenta limitações que comprometem a interpretação da localização das fontes dos defeitos. Mesmo as *interfaces* que incorporam visualizações tridimensionais não conseguem representar de forma clara a posição espacial exata das DPs. A RV surge como uma alternativa inovadora para superar essas limitações, proporcionando um ambiente imersivo e interativo que aprimora a análise dos mapas acústicos. A utilização de representações tridimensionais em RV permite uma visualização espacial mais intuitiva das regiões afetadas por DPs, auxiliando na identificação precoce de defeitos e facilitando a tomada de decisão. Ao integrar essa tecnologia ao monitoramento de transformadores, espera-se um aumento na eficiência diagnóstico e prognóstico, reduzindo o tempo de resposta e mitigando os riscos operacionais associados às potenciais falhas elétricas.

## 1.3 OBJETIVO

Propor uma metodologia baseada em RV para melhorar a visualização e análise dos resultados da técnica de EA em transformadores. Como objetivos específicos, definiu-se:

- Comparar a solução atual com a *interface* em RV;
- Avaliar a usabilidade e precisão da solução proposta.
- Validar a nova abordagem com dados reais de ensaios de EA.

## 1.4 CONTRIBUIÇÃO

As principais contribuições deste trabalho são:

- Abordagem inovadora baseada em RV para a visualização de DPs, que supera as limitações das metodologias tradicionais.
- Melhoria na precisão e eficiência na detecção e localização espacial de falhas em transformadores, resultando em uma manutenção mais eficaz.
- Revisão abrangente dos conceitos relacionados às DPs e à técnica de EA, oferecendo um referencial teórico para futuras pesquisas na área.

Essas contribuições não apenas visam aprimorar as práticas atuais de monitoramento em transformadores, mas também abrem novas perspectivas para a aplicação da RV

na engenharia elétrica. No Apêndice A, apresentam-se as publicações científicas resultantes desta pesquisa de mestrado.

## 1.5 ESTRUTURA

Esta dissertação de mestrado está organizada da seguinte forma:

- Introdução.
- Motivação.
- Objetivo e contribuição.
- Capítulo 2: Aborda os conceitos fundamentais sobre EA, identificação de defeitos em transformadores e os princípios da RV, estabelecendo a base teórica necessária para a compreensão da metodologia proposta.
- Capítulo 3: Apresenta uma análise crítica das pesquisas anteriores relacionadas à EA e à detecção de DPs, bem como as aplicações de RV na visualização de dados, contextualizando a pesquisa dentro do estado atual do conhecimento na área.
- Capítulo 4: Detalha a abordagem tradicional de visualização de mapas acústicos e a proposta inovadora baseada em RV, incluindo os métodos de validação.
- Capítulo 5: Analisa o desempenho da metodologia desenvolvida em comparação com abordagem atual, discutindo as implicações dos resultados obtidos.
- Capítulo 6: Resume as contribuições da pesquisa e sugere direções para pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo, apresentam-se os conceitos de descargas parciais (DPs) em transformadores, destacando suas características e tipos. Em seguida, são discutidas as principais técnicas de detecção de DPs. Além disso, abordam-se os fundamentos da técnica de emissão acústica (EA) utilizada para detectar e localizar DPs em transformadores. Por fim, são apresentados os princípios da realidade virtual (RV), com ênfase em suas capacidades avançadas de imersão e interação, que a tornam cada vez mais relevante e aplicada aos processos de diagnóstico e manutenção de transformadores.

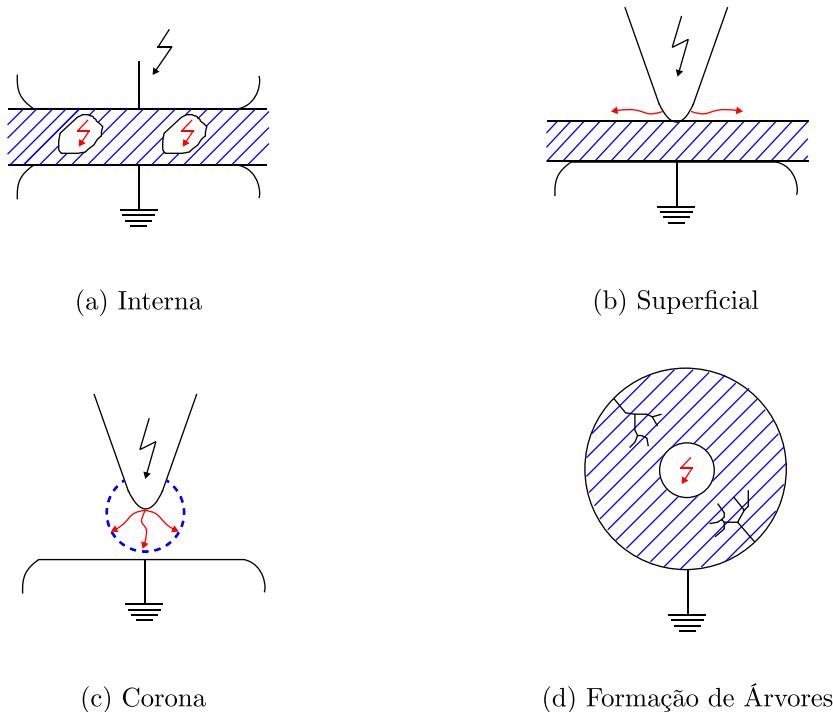
### 2.1 DESCARGA PARCIAL (DP)

A norma internacional (IEC 60270, 2000) define uma DP como uma descarga elétrica localizada que preenche parcialmente o isolamento entre os condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. Essas descargas, conforme essa definição, são geralmente consequência da concentração de tensão elétrica local no isolamento ou em sua superfície, manifestando-se como pulsos de curta duração, tipicamente inferiores a  $1 \mu\text{s}$ . Complementando essa abordagem, (MOHAMMADI *et al.*, 2009) descreve as DPs como pequenas faíscas elétricas resultantes da ruptura elétrica de um gás confinado em um vazio ou em um campo elétrico altamente não uniforme.

Dessa forma, ambas as definições convergem para a ideia de que a DP é uma falha dielétrica localizada em uma pequena região de um meio isolante elétrico, seja ele sólido, líquido ou gasoso, sob estresse de alta tensão. A presença de imperfeições nesse meio compromete sua resistência dielétrica, tornando-o suscetível a falhas quando a tensão aplicada ultrapassa esse limite. Esse fenômeno gera descargas de alta frequência, acompanhadas pela liberação instantânea de energia. Como consequência, ocorrem alterações químicas e estruturais no material, além de efeitos eletromagnéticos, térmicos e acústicos. Nesse contexto, (NICOARĂ; MARINESCU; PĂTRU, 2016) destaca a importância da medição das DPs ao longo da vida útil de equipamentos elétricos de alta tensão, reforçando seu papel no monitoramento da degradação do isolamento.

As DPs podem ser classificadas em quatro tipos principais: internas, superficiais, corona e formação de árvore. A Figura 2 ilustra essas categorias. As descargas do tipo internas ocorrem em vazios ou cavidades dentro do material isolante sólido ou líquido, sendo muito severas quando não tratadas a tempo. Enquanto as descargas do tipo superficiais se manifestam na interface entre diferentes materiais isolantes. Já as DPs do tipo corona resultam de campos elétricos não uniformes em pontos agudos dos eletrodos submetidos a alta voltagem, podendo ocorrer no ar, em líquidos ou em materiais isolantes gasosos. Por fim, as descargas do tipo formação de árvore (*treeking*) surgem devido ao impacto contínuo de descargas no material isolante sólido, levando à formação progressiva de canais condutores.

Figura 2 – Tipos de DP.



**Fonte:** (RATHOD; KUMBHAR; BHALJA, 2023)

De acordo com (STONE *et al.*, 2023), DPs em transformadores podem surgir por diversas razões, incluindo falhas no processo de fabricação, envelhecimento do sistema de isolamento, operação inadequada ou falta de manutenção. Durante o complexo processo de fabricação, esses materiais podem ser contaminados por partículas metálicas ou outros resíduos. Um controle de qualidade rigoroso é essencial para garantir a pureza desses materiais e evitar a presença de impurezas metálicas. Além disso, o processo de secagem deve ser realizado com precisão, evitando umidade ou danos aos materiais devido a temperaturas inadequadas. Em outras palavras, a ausência de DP em materiais isolantes depende diretamente da pureza dos materiais de base e dos cuidados adotados durante a fabricação. Componentes críticos, como anéis de pressão, espaçadores, cilindros e conexões de saída dos enrolamentos, estão sujeitos a tensões elétricas elevadas, tornando sua qualidade fundamental para evitar DP. Por isso, esses componentes devem ser livres de resíduos de processamento, suportar altas temperaturas e estar isentos de contaminantes.

As principais causas de DPs em transformadores de potência são (IEC 60270, 2000):

- **Durante a fabricação:** Pequenas cavidades ou vazios no isolamento sólido ou defeitos de projeto durante a fabricação do equipamento podem provocar atividade de descarga parcial em seu interior.
- **Transporte e instalação:** Ruptura mecânica ou danos ao isolamento durante a instalação ou transporte do equipamento podem provocar atividade de descarga

parcial em seu interior.

- **Envelhecimento e deterioração:** Devido à deterioração dos materiais isolantes com o tempo, reduzindo a capacidade de suportar estresse elétrico e enfraquecendo o isolamento, pode ocorrer atividade de descarga parcial em seu interior.
- **Sobrecarga em serviço:** Uma corrente de curto-círcuito ou sobretensão devido a um impulso de raio impõe um estresse ao isolamento, podendo resultar em atividade de descarga parcial em seu interior.
- **Danos em serviço:** Danos físicos ao equipamento elétrico durante o serviço podem resultar em atividade de descarga parcial em seu interior.

Quanto as normas aplicáveis, a medição de DPs em transformadores é amplamente documentada por padrões internacionais, como os das normas IEC, IEEE e documentos do CIGRÉ. Esses materiais têm o objetivo de padronizar as características dos sistemas de medição, garantir a correta execução dos ensaios com repetibilidade e reproduzibilidade e definir procedimentos técnicos aplicáveis. Entre os documentos mais relevantes, a norma (IEC 60270, 2000) se destaca como um padrão genérico para medições de DPs baseadas em carga aparente (pC ou nC) em frequências abaixo de 1 MHz, sendo frequentemente usada em testes de fábrica. No entanto, não fornece orientações específicas para transformadores em operação. Já a norma IEC 62478 complementa a (IEC 60270, 2000) ao abordar tecnologias de medição de DP usando técnicas acústicas e faixas de frequência VHF e UHF, especialmente para medições online em GIS (Subestação Isolada a Gás), transformadores e máquinas rotativas, embora essas medições não sejam calibradas em termos de carga aparente.

Para transformadores imersos em óleo, a IEC 60076-3 detalha os procedimentos para ensaios dielétricos e testes de sobretensão induzida em frequência elevada, enquanto a IEC 60076-11 aborda transformadores a seco, especificando critérios de aceitação e limites de carga de DPs permitidos. Nos padrões da norma internacional IEEE, o C57.12.90 estabelece diretrizes para testes de fábrica, indicando os níveis de tensão de ensaio e critérios de aceitação. O documento recomenda ações corretivas quando os limites de DPs são excedidos, priorizando investigações adicionais antes de rejeitar o equipamento. Além disso, o guia IEEE C57.127 fornece uma abordagem específica para métodos acústicos na detecção e localização de DPs em transformadores cheios de líquido isolante, incluindo orientações sobre instrumentação, instalação de sensores e interpretação dos resultados. Esses documentos representam uma base técnica essencial para práticas de medição de DPs em transformadores, garantindo confiabilidade e precisão nos testes.

## 2.2 TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE DPs

A análise da presença de DPs é amplamente utilizado como um teste de garantia de qualidade para o isolamento elétrico em equipamentos de média e alta tensão (STONE *et al.*, 2023). Ainda segundo (STONE *et al.*, 2023), proprietários de equipamentos de alta tensão, como transformadores, comutadores, cabos de alimentação e máquinas rotativas, também estão usando o ensaio de DP como uma ferramenta para determinar se há risco de falha de isolamento em equipamentos que estão em serviço. Esta última aplicação explodiu na última década com a disponibilidade de sistemas de detecção de DPs que medem durante a operação normal de equipamentos de média e alta tensão (STONE *et al.*, 2023). Todavia, as DPs não podem ser medidas diretamente porque são eventos rápidos e de baixa magnitude, ocorrendo em regiões de imperfeição de dielétricos. A medição é indireta, usando instrumentos que detectam a carga aparente ou pulsos de corrente gerados pelas descargas (IEC 60270, 2000; IEEE STD C57.127-2018, 2019a). Nos últimos quarenta anos, várias técnicas foram desenvolvidas para detectar DPs em transformadores de potência. Essas técnicas podem ser agrupados em categorias com base nos efeitos físicos da DP e como ela pode ser medida: detecção Química (DGA), Elétrica, Óptica e Acústica (EA) (MOHAMMADI *et al.*, 2009; PHUKAN; KARMAKAR, 2013; HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021), ver Figura 3. Cada uma dessas técnicas de detecção de DPs tem vantagens, desvantagens e limitações que precisam ser selecionadas de acordo com o contexto da aplicação.

O método de detecção Elétrico, conforme a norma IEC 60270, é altamente sensível a pulsos de corrente, mas suscetível a interferências eletromagnéticas, o que pode comprometer sua precisão em ambientes de alta tensão, como sistemas HVDC e instalações elétricas complexas (YAACOB *et al.*, 2014; HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021). Além disso, ele requer conexão direta ao sistema, limitando seu uso em ensaios de campo.

Por outro lado, a técnica Óptica oferece imunidade a interferências eletromagnéticas, tornando-se uma alternativa viável para ambientes com alta atividade eletromagnética. No entanto, enfrenta desafios significativos relacionados ao alto custo de implementação e à complexidade da instalação de sensores de fibra óptica. Além disso, a calibração e a testabilidade são complexas em condições operacionais reais.

A técnica Química, que analisa subprodutos como hidrogênio e metano no óleo isolante, demonstra eficácia na identificação da degradação cumulativa do dielétrico. Contudo, sua aplicação não permite detecção em tempo real e apresenta limitações na avaliação da severidade das DPs (YAACOB *et al.*, 2014; HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021).

Já o método VHF/UHF, que detecta emissões em um amplo espectro (300-1500 MHz), oferece uma boa relação sinal/ruído e é imune a interferências de baixa frequência. No entanto, sua aplicação exige acesso a pontos específicos do equipamento para a instalação de antenas, além de ser potencialmente limitada pela presença de estruturas metálicas internas.

A técnica Acústica, ou EA, destaca-se como uma solução eficaz para monitoramento contínuo, pois permite a localização das fontes de DPs de forma não invasiva. No entanto, para garantir a eficácia dessa técnica, é essencial que os profissionais possuam um conhecimento aprofundado das características construtivas e operacionais do transformador. Esse conhecimento permite otimizar a disposição dos sensores e interpretar corretamente os sinais acústicos, minimizando detecções falsas causadas pela alta sensibilidade a reflexões e difrações das ondas ultrassônicas no tanque e no óleo isolante (HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais técnicas de detecção de DPs em transformadores. Na prática, a combinação de métodos é recomendada para compensar limitações individuais e obter um diagnóstico mais preciso e confiável. Por exemplo, a integração de VHF/UHF com EA pode fornecer tanto a identificação espectral quanto a localização espacial das DPs.

Figura 3 – Técnicas de Detecção de DPs em Transformadores.

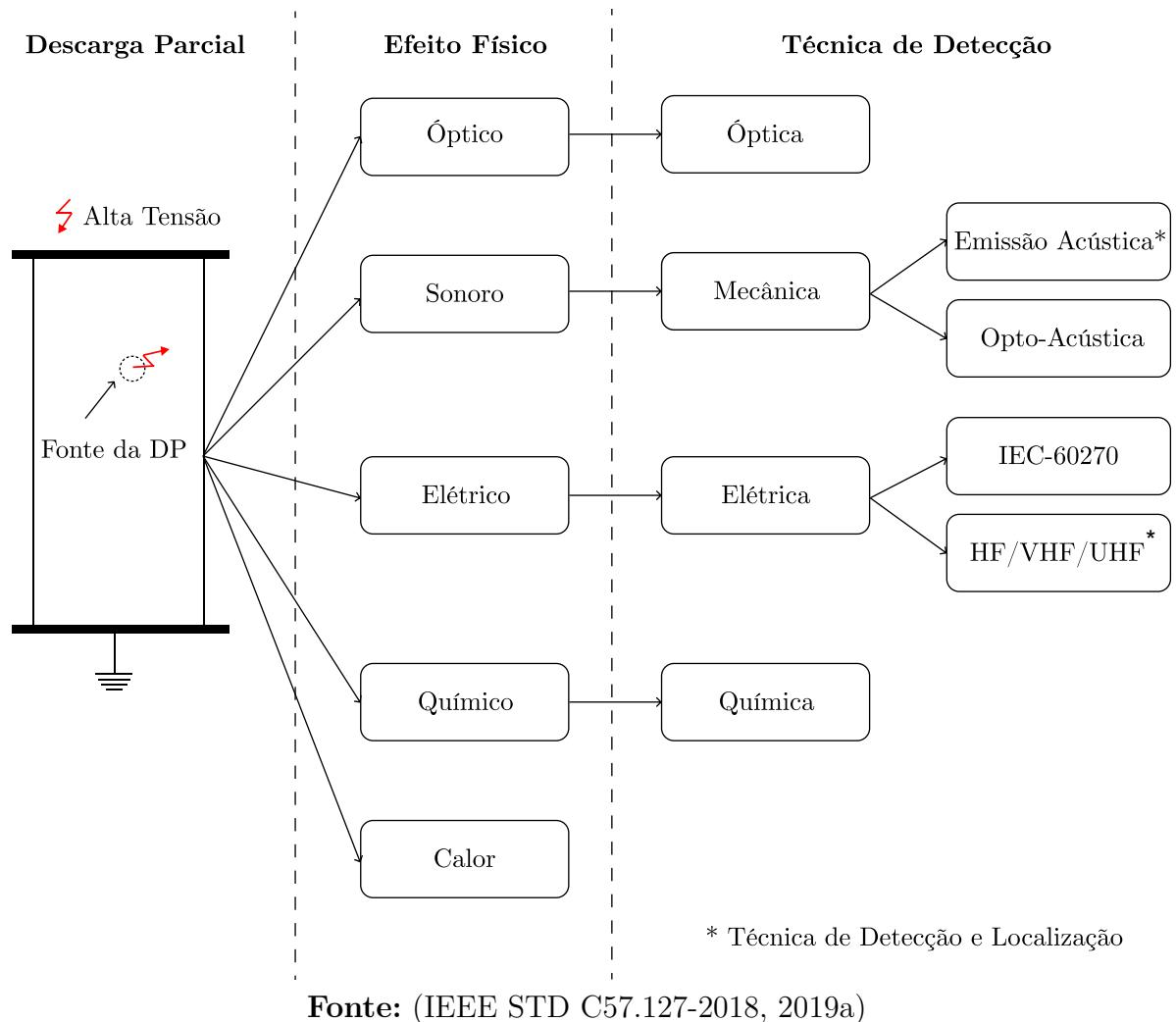


Tabela 1 – Comparaçao entre Técnicas de Detecção de DPs em Transformadores.

| Técnica               | Vantagens   | Desvantagens  |
|-----------------------|---|---|
| Elétrica              | Alta sensibilidade a pulsos de corrente, conforme norma IEC 60270.          | Suscetível a ruídos eletromagnéticos, requer conexão direta ao sistema.                 |
| Química               | Identifica degradação acumulativa, não invasiva.                            | Detecção tardia, complexidade na análise cromatográfica.                                |
| Óptica                | Imunidade a interferências eletromagnéticas, precisão na localização.       | Alto custo de implementação, dificuldade de instalação de sensores.                     |
| VHF/UHF               | Detecta emissões em amplo espectro (300-1500 MHz), boa relação sinal/ruído. | Requer acesso a pontos específicos no equipamento, limitação de posições de instalação. |
| Emissão Acústica (EA) | Localização das DPs, técnica não invasiva.                                  | Sensibilidade a reflexões/ruídos mecânicos, atenuação do sinal no óleo.                 |

**Fonte:** (HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021)

### 2.3 PRINCÍPIOS DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

A Emissão Acústica (EA) é um fenômeno caracterizado pela geração de ondas elásticas transientes, resultantes da liberação rápida de energia proveniente de fontes localizadas em materiais (FILIPPIN *et al.*, 2017). Essa liberação de energia pode ocorrer por diversos mecanismos, incluindo a presença de DPs em equipamentos de alta tensão (AT). A técnica de EA é um método de ensaio não destrutivo, versátil e não invasivo, amplamente utilizado para monitorar a integridade de materiais e estruturas em diversos setores, como a inspeção de tubulações, vasos de pressão, pontes e aeronaves. No setor elétrico, a caracterização dos sinais de EA é uma ferramenta valiosa para identificar falhas e detectar DPs em transformadores e outros equipamentos de AT.

Uma das principais vantagens da técnica de EA é sua capacidade de detectar e localizar defeitos de origem elétrica e mecânica em estruturas de grande porte, sem interromper a operação do equipamento. Quando ocorre uma EA, um *hit* é registrado, correspondente à detecção de uma onda acústica por um sensor. Um conjunto de *hits* próximos no tempo e espacialmente localizáveis é denominado, nas literaturas pesquisadas, como um evento (ou *event*, termo frequentemente utilizado nos *softwares* de EA), representando uma ocorrência significativa de atividade acústica. A partir da análise de múltiplos eventos, podem ser aplicados métodos de agrupamento, como o *clustering*, para identificar padrões de similaridade. Esses padrões de maior interesse geralmente estão relacionados a DPs. O **k-means clustering**, por exemplo, é uma técnica amplamente utilizada para organizar esses eventos em *clusters*, permitindo distinguir entre ruídos esporádicos e atividades recorrentes associadas a falhas estruturais.

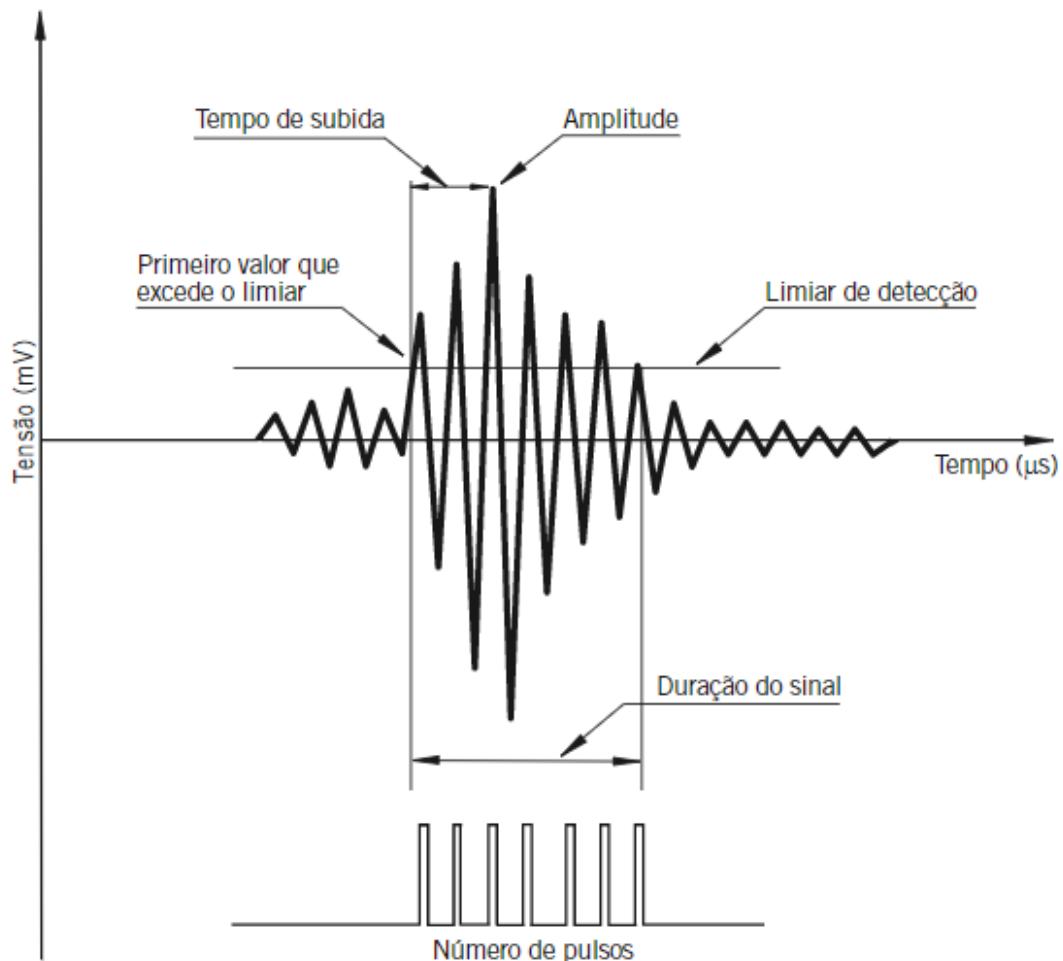
Os sinais acústicos detectados pelos sensores apresentam padrões específicos que podem fornecer informações sobre sua origem, seja ela térmica, elétrica ou mecânica. A

correta interpretação desses sinais é fundamental para distinguir eventos relevantes de ruídos ambientais, aprimorando a confiabilidade do diagnóstico. A Figura 4, adaptada de (FILIPPIN *et al.*, 2017), ilustra um sinal discreto de EA, destacando seus principais parâmetros para a classificação da origem.

Os principais parâmetros para análise EA são:

- **Amplitude:** Sinais de DP apresentam amplitudes mais elevadas devido à rápida ionização do meio isolante.
- **Tempo de subida e duração:** Pulsos associados a DPs possuem um tempo de subida abrupto e curta duração, enquanto pulsos térmicos apresentam um crescimento gradual e uma duração prolongada.
- **Conteúdo espectral do sinal:** Pulsos de DPs são predominantemente de alta frequência (acima de 100 kHz), enquanto pulsos térmicos possuem componentes em faixas mais baixas (< 50 kHz).
- **Taxa de repetição:** As DPs geram pulsos recorrentes e sincronizados com a

Figura 4 – Representação de um sinal discreto de EA (Adaptado de (FILIPPIN *et al.*, 2017)).



Fonte: (FILIPPIN *et al.*, 2017)

frequência da rede elétrica (50/60 Hz), enquanto eventos térmicos ocorrem de forma aleatória e esporádica.

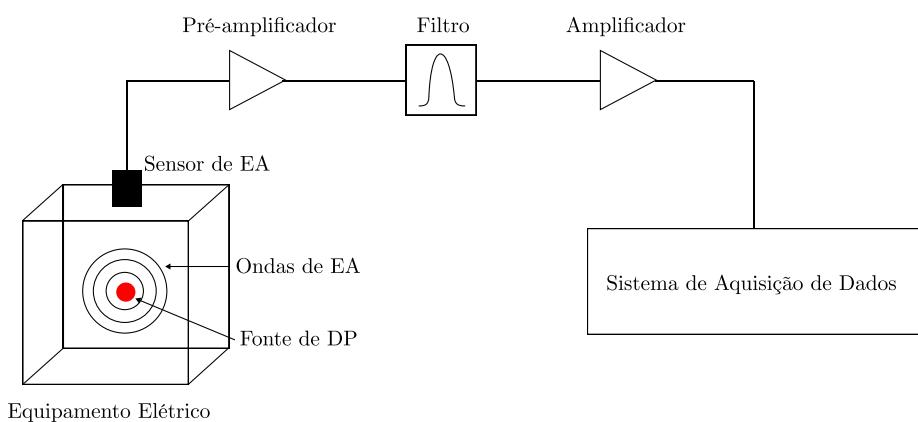
- **Forma de onda do sinal:** Pulsos de DPs possuem um formato impulsivo e energético, enquanto pulsos térmicos exibem um padrão mais difuso e distribuído no tempo.

A norma (IEEE STD C57.127-2018, 2019a) descreve métodos acústicos para detectar e localizar DPs em transformadores preenchidos com líquidos isolantes, abordando o processamento dos sinais acústicos, as especificações da instrumentação, a instalação de sensores e os critérios de interpretação dos resultados. A localização da fonte de DP é realizada por meio da técnica de diferença de tempo de chegada entre os sinais captados por sensores, um método amplamente utilizado para triangulação da posição das descargas (RATHOD; KUMBHAR; BHALJA, 2023).

A norma mencionada, juntamente com as melhores práticas adotadas no ensaio de EA, pode ser complementada pelo uso de sensores auxiliares instalados no próprio transformador, como medidores de corrente, sensores de temperatura e dispositivos responsáveis pelo monitoramento de operações, como os comutadores de tapes. Adicionalmente, o acompanhamento das variações de potência do transformador contribui para a interpretação dos sinais detectados durante o ensaio. Esses sensores residentes no transformador, juntamente com as informações operativas permitem confirmar que os sinais de DPs coincidem com as variações observadas, facilitando uma associação mais precisa dos padrões de origem com defeitos de natureza elétrica, térmica e mecânica. A análise integrada dessas informações resulta em uma classificação mais confiável dos pulsos de EA, aprimorando, assim, o monitoramento das DPs em transformadores.

A Figura 5 apresenta um modelo típico de sistema de medição EA por meio da captação de sinais acústicos propagados numa estrutura que imita o tanque de um transformador. O sistema é composto pelos seguintes elementos principais:

Figura 5 – Esquema de Detecção de DPs usando a Técnica de EA.



**Fonte:** Autoria Própria.

- **Sensores acústicos:** Captam os sinais acústicos gerados pelas descargas.
- **Dispositivo de transmissão de dados:** Coleta e encaminha os sinais para processamento e análise.
- **Filtros de sinal:** Eliminam ruídos indesejados.
- **Memória para armazenamento de dados:** Registra medições para análises históricas.
- **Plataforma de análise de dados:** Processa as informações recebidas, identifica padrões e anomalias, e gera relatórios gráficos.

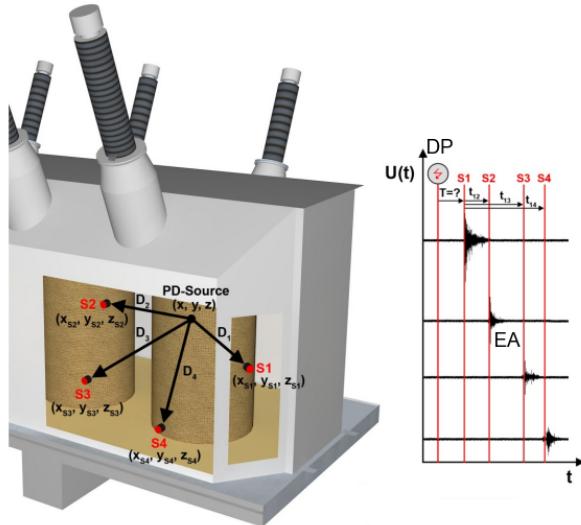
O funcionamento desse sistema de medição EA ocorre de forma contínua e em tempo real. Os sensores captam os sinais acústicos, que são filtrados e transmitidos para a plataforma de análise. O *software* associado emprega algoritmos de reconhecimento de padrões e ferramentas de exibição gráfica para a interpretação dos resultados com base em parâmetros predefinidos. Os dados armazenados permitem comparações históricas e análises detalhadas, possibilitando a identificação de tendências e o planejamento de ações corretivas.

A técnica de EA se destaca por sua capacidade de não apenas detectar e classificar os sinais acústicos, mas também de determinar sua localização. Esse processo, contudo, exige cuidados específicos na preparação, execução e interpretação dos dados. A medição acústica requer um acoplamento adequado entre o sensor e a estrutura do transformador, utilizando materiais específicos para garantir uma transmissão eficiente da energia acústica durante a emissão e o monitoramento (STONE *et al.*, 2023). Fatores como a quantidade e disposição dos sensores, bem como os recursos computacionais da plataforma de análise, são determinantes para a eficácia do ensaio (AMÉRICO *et al.*, 2017).

Devido à grande quantidade de sinais EAs gerados, o sistema registra apenas aqueles dentro da faixa de frequência de interesse. Uma das principais vantagens dessa técnica é a possibilidade de empregar o tempo de chegada do pulso em múltiplos sensores para determinar a localização da fonte emissora, utilizando princípios trigonométricos. Em síntese, a matemática envolvida na localização espacial das DPs requer a definição de variáveis e parâmetros específicos, tais como:

- **Coordenadas dos Sensores Conhecidas:** As coordenadas exatas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de cada sensor devem ser conhecidas para calcular as diferenças de tempo entre os sinais recebidos.
- **Geometria da Estrutura:** A geometria da estrutura sob ensaio deve ser bem compreendida para prever como as ondas se propagam e se refletem no ambiente.
- **Filtragem e Parametrização dos Sinais:** A filtragem dos sinais é necessária para remover ruídos e interferências. A parametrização ajuda a caracterizar os sinais de interesse, como as DPs.

Figura 6 – Método TDoA para localização de DPs em transformador.



Fonte: (SIKORSKI; WALCZAK, 2013)

- **Velocidade de Propagação da Onda:** Conhecer a velocidade de propagação da onda no meio monitorado é vital para calcular as distâncias com base nas diferenças de tempo.

Um dos métodos mais comuns para essa localização, especialmente em grandes transformadores de potência, é a técnica TDoA (Time Difference of Arrival), conforme apontado por (SIKORSKI; WALCZAK, 2013). Essa técnica exige no mínimo quatro sensores para localização em ambientes tridimensionais, onde cada diferença de tempo entre um sensor e um sensor de referência define um hiperboloide, e são necessárias três equações independentes para resolver as três incógnitas ( $x, y, z$ ) da posição do emissor. A redundância proporcionada por sensores adicionais ajuda a mitigar erros devido a ruídos ou imperfeições na sincronização, melhorando a precisão da localização.

A posição exata do defeito é estimada com base nas diferenças de tempo de chegada dos sinais acústicos captados pelos sensores, resultando em um sistema de equações não lineares. Para ilustrar o princípio, considere um cenário com pelo menos quatro sensores de EA, posicionados de forma a permitir a localização espacial do defeito dentro do tanque do transformador, como mostrado na Figura 6.

As equações (1) a (4) fornecem uma representação matemática da localização da DP para este caso de quatro sensores:

$$(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2 = (v_{oleo} \cdot T)^2 , \quad (1)$$

$$(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2 = (v_{oleo} \cdot (T + t_{12}))^2 , \quad (2)$$

$$(x - x_{s3})^2 + (y - y_{s3})^2 + (z - z_{s3})^2 = (v_{oleo} \cdot (T + t_{13}))^2 , \quad (3)$$

$$(x - x_{s4})^2 + (y - y_{s4})^2 + (z - z_{s4})^2 = (v_{oleo} \cdot (T + t_{14}))^2 , \quad (4)$$

Onde:

- $x, y, z$  são as coordenadas desconhecidas da fonte DP no espaço.
- $T$  é o tempo de propagação da onda acústica desconhecida da fonte DP para o sensor mais próximo, numerado como s1.
- $x_{s1\dots 4}, y_{s1\dots 4}, z_{s1\dots 4}$  são as coordenadas cartesianas dos quatro sensores EA s1... S4.
- $t_{12}, t_{13}, t_{14}$  são os tempos de propagação entre o sensor 1 e os sensores 2, 3 e 4, respectivamente ( $t_{12} < t_{13} < t_{14}$ ).
- $v_{oleo}$  é a velocidade de propagação da onda acústica no óleo do transformador (aproximadamente 1413 m/s a 20°C, 1300 m/s a 50°C, e 1200 m/s a 80°C).

O sistema não linear de equações pode ser resolvido com algoritmos solucionadores diretos ou iterativos de mínimos quadrados. A eficiência desses algoritmos depende fortemente dos valores iniciais selecionados pelo usuário.

Conforme apontado por (SIKORSKI; WALCZAK, 2013), os erros mais comuns na localização precisa das coordenadas da fonte DP usando a técnica TDoA em grandes transformadores de potência resultam de:

1. Suposição simplificadora de que a onda acústica se propaga apenas em óleo, ignorando a propagação na parede do tanque do transformador, onde a velocidade é significativamente maior.
2. Estimativa incorreta do tempo de chegada do sinal devido à propagação da onda acústica também na parede do tanque, que chega primeiro ao sensor.
3. Medição imprecisa das coordenadas dos sensores EA devido à estrutura complexa do tanque do transformador.
4. Necessidade de filtragem e parametrização dos sinais de interesse, como os de origem elétrica, para eliminar ruídos e interferências.

A heterogeneidade do meio de propagação dentro do transformador impõe desafios à precisão do método TDoA. Reflexões e difrações acústicas, causadas por componentes como o núcleo e os enrolamentos, afetam os tempos de chegada dos sinais, introduzindo erros na localização da fonte de DP. Além disso, a velocidade de propagação das ondas acústicas no óleo isolante é influenciada pela temperatura, o que exige monitoramento constante para reduzir os erros no cálculo da localização da DP.

## 2.4 REALIDADE VIRTUAL (RV)

A Realidade Virtual (RV) é uma tecnologia avançada que imerge o usuário em ambientes tridimensionais gerados por computador, proporcionando experiências interativas e sensoriais que simulam a realidade ou criam cenários totalmente novos (SLATER;

WILBUR, 1997; SHERMAN; CRAIG, 2018). A RV transcende a visualização passiva de conteúdo, permitindo a interação em tempo real com o ambiente virtual, o que a torna uma ferramenta poderosa para diversas aplicações.

Para que uma experiência de RV seja eficaz, três componentes principais devem estar presentes: imersão, interação e presença (ANATOLE LÉCUYER JEAN-MARIE BURKHARDT, 2008; JERALD, 2015).

- **Imersão:** Refere-se ao grau em que a tecnologia RV isola o usuário do mundo real, substituindo seus estímulos sensoriais por estímulos gerados pelo computador. Dispositivos como *Head-Mounted Displays* (HMDs) desempenham um papel fundamental na imersão, fornecendo *displays* visuais que ocupam todo o campo de visão do usuário, além de fones de ouvido que oferecem áudio espacializado.
- **Interação:** Diz respeito à capacidade do usuário de influenciar e modificar o ambiente virtual(AV) em tempo real. A interação pode ocorrer por meio de diversos dispositivos, como controles manuais, luvas de dados, rastreadores de movimento e até mesmo o próprio corpo do usuário. A qualidade da interação é ponto importante para o engajamento do usuário e para a eficácia da experiência RV.
- **Presença:** É a sensação subjetiva de estar inserido no aAV, ou seja, a percepção de que o AV é real e que o usuário é parte integrante dele. A presença é influenciada por diversos fatores, como a qualidade visual e sonora do ambiente, a precisão do rastreamento de movimentos e a coerência entre os estímulos sensoriais. Uma forte sensação de presença aumenta o realismo da experiência e potencializa seus benefícios em diferentes contextos (TORI; KIRNER; SISCOUTTO, 2006).

A RV pode ser classificada em diferentes tipos, dependendo do nível de imersão e interação que oferece:

- **Não Imersiva:** O usuário interage com o AV por meio de uma tela de computador ou um projetor, sem o uso de HMDs ou outros dispositivos de imersão. A interação é geralmente limitada ao uso de teclado e mouse.
- **Semi-Imersiva:** O usuário é parcialmente imerso no AV, geralmente por meio de uma tela grande ou um sistema de projeção que ocupa parte de seu campo de visão. A interação pode ser feita por meio de controles manuais ou rastreadores de movimento.
- **Totalmente Imersiva:** O usuário é completamente imerso no AV, utilizando HMDs, fones de ouvido e outros dispositivos sensoriais que bloqueiam os estímulos do mundo real. A interação é geralmente feita por meio de controles

manuais, luvas de dados ou rastreadores de movimento, permitindo uma ampla gama de ações no ambiente virtual.

A RV tem sido aplicada em diversas áreas, desde o entretenimento até a indústria e a ciência (BUETTNER *et al.*, 2022; CYRINO *et al.*, 2022). Algumas das aplicações mais comuns incluem:

- **Entretenimento:** Jogos, filmes, passeios virtuais e experiências imersivas em museus e parques temáticos.
- **Treinamento e Simulação:** Treinamento de pilotos, cirurgiões, engenheiros e outros profissionais em ambientes virtuais seguros e controlados. Simulação de situações de emergência, como incêndios e desastres naturais, para preparar equipes de resposta.
- **Engenharia e Arquitetura:** Visualização e projeto de edifícios, máquinas e outros sistemas complexos em ambientes virtuais interativos. Colaboração remota entre equipes de projeto, permitindo a visualização e a manipulação de modelos 3D em tempo real.
- **Medicina:** Tratamento de fobias e transtornos de ansiedade, reabilitação física e neurológica, planejamento cirúrgico e educação médica.
- **Marketing e Vendas:** Apresentação de produtos e serviços em AVs interativos, permitindo que os clientes experimentem e personalizem os produtos antes de comprá-los.
- **Educação:** Criação de experiências de aprendizado imersivas e interativas, permitindo que os alunos explorem conceitos e ambientes complexos de forma mais intuitiva e envolvente.

Para que a sensação de presença seja efetiva, algumas condições técnicas devem ser atendidas (NUNES; COSTA, 2008; JAMES J. CUMMINGS, 2012):

- **Qualidade dos Objetos Tridimensionais:** Os objetos devem apresentar realismo em cores, volumes, texturas e comportamentos, para que o AV seja visualmente convincente.
- **Correlação Espacial entre Objetos Físicos e Virtuais:** A escala e a localização dos elementos no mundo virtual devem estar em conformidade com o mundo real, para evitar dissonâncias que quebrem a sensação de presença.
- **Controle Realista da Interação:** As ações do usuário no AV devem considerar as leis físicas e o comportamento dos objetos, para que a interação seja natural e intuitiva.
- **Aspectos de Usabilidade:** A modelagem e a geração das cenas devem garantir conforto ao usuário, evitando elementos que causem fadiga visual, tontura ou outros desconfortos.

- **Qualidade da Imagem:** A fidelidade da síntese de imagem, considerando resolução, frequência de atualização e detalhamento, é peça fundamental para a imersão visual.
- **Campo de Visão:** A amplitude da visão disponível ao usuário dentro do AV deve ser o mais ampla possível, para aumentar a sensação de estar presente no ambiente.
- **Estereoscopia:** A capacidade do sistema de proporcionar visão tridimensional é fundamental para a percepção de profundidade e para o realismo da experiência.
- **Rastreamento:** A precisão, o tempo de resposta e os graus de liberdade do sistema de captura de movimentos são essenciais para que a interação do usuário com o AV seja natural e intuitiva.
- **Abrangência Sensorial:** A quantidade de estímulos sensoriais disponíveis, como visão, audição e tato, aumenta a imersão e o realismo da experiência.
- **Combinação Sensorial:** A coerência entre diferentes modalidades sensoriais (visual, auditiva, tátil, etc.) é fundamental para que a experiência seja convincente e imersiva.
- **Envolvimento do Usuário:** A extensão da participação sensorial do usuário na experiência RV influencia o nível de imersão e a sensação de presença.
- **Vivacidade da Simulação:** A qualidade da simulação em termos de realismo, tanto visual quanto comportamental, é crucial para que o usuário acredite que está realmente presente no AV.
- **Interatividade do Ambiente:** A capacidade do usuário de modificar o ambiente e obter respostas em tempo real aumenta o engajamento e a sensação de controle sobre a experiência.
- **Enredo da Experiência:** A fluidez e a coerência narrativa dentro da experiência virtual contribuem para o envolvimento do usuário e para a imersão na história.

O desenvolvimento de aplicações de RV eficientes e realistas requer a consideração cuidadosa de todos esses aspectos, para que a experiência do usuário seja imersiva, interativa e envolvente. Apesar dos avanços significativos na tecnologia RV, ainda existem desafios a serem superados para que ela se torne uma ferramenta disseminada e acessível a todos. Alguns dos principais desafios incluem:

- **Custo:** Os dispositivos de RV de alta qualidade ainda são relativamente caros, o que limita o acesso a essa tecnologia.
- **Conforto e Usabilidade:** O uso prolongado de HMDs pode causar fadiga visual, tontura e outros desconfortos. Além disso, a interação com AV pode ser difícil e pouco intuitiva para alguns usuários.

- **Conteúdo:** A disponibilidade de conteúdo RV de alta qualidade ainda é limitada, especialmente em áreas específicas como treinamentos.
- **Latência:** O atraso entre os movimentos do usuário e a resposta do sistema RV pode comprometer a sensação de presença e causar desconforto.

As tendências futuras da RV incluem o desenvolvimento de dispositivos mais leves, confortáveis e acessíveis, a criação de conteúdo RV mais rico e diversificado, a melhoria da qualidade da imagem e do som, e a integração de novas tecnologias, como inteligência artificial e computação espacial. Com o avanço contínuo da tecnologia, a RV tem o potencial de transformar a forma como interagimos com o mundo e como realizamos diversas atividades em nossas vidas.

## 2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste Capítulo, apresenta-se os conceitos fundamentais necessários para a compreensão do tema da pesquisa, abordando as DPs, suas características, causas e técnicas de detecção, com destaque para a EA e os fundamentos da RV. Inicialmente, define-se a DP como uma descarga elétrica localizada que ocorre em sistemas de isolamento elétrico sob alta tensão. As DPs são classificadas em quatro tipos principais: internas, superficiais, corona e formação de árvore. Essas descargas geram pulsos de alta frequência que podem levar ao envelhecimento acelerado e falhas em equipamentos, como transformadores de potência. Entre as principais causas das DPs estão falhas no processo de fabricação, envelhecimento do isolamento, sobrecarga e danos físicos. A detecção e controle das DPs são essenciais para evitar interrupções no fornecimento de energia e altos custos de manutenção.

Entre as técnicas de detecção de DPs, destacam-se métodos químicos, elétricos, ópticos e acústicos. A técnica de EA é amplamente utilizada devido à sua capacidade de monitoramento em tempo real, imunidade a interferências eletromagnéticas e habilidade para localizar a fonte das DPs. Essa técnica utiliza sensores estratégicos para captar sinais acústicos gerados pelas descargas, permitindo identificar a posição da falha com precisão por meio da análise do tempo de chegada dos sinais. No Capítulo também aborda as normas técnicas aplicáveis à medição de DPs, como as normas (IEC 60270, 2000) e (IEEE STD C57.127-2018, 2019b), que padronizam os procedimentos para garantir confiabilidade nos testes. Por fim, são apresentados os fundamentos da RV, uma tecnologia que permite criar ambientes tridimensionais imersivos. A RV é destacada por suas capacidades de imersão, interação e presença, sendo cada vez mais aplicada na engenharia elétrica para diagnóstico e manutenção. A integração da RV com a técnica de EA oferece novas possibilidades para visualização e análise das DPs em transformadores.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, apresentam-se duas revisões bibliográficas: uma sobre a técnica de emissão acústica (EA), e outra sobre a realidade virtual (RV). O objetivo é entender a evolução e o estado da arte dessas tecnologias, isto é, o que há de mais avançado de cada solução na literatura, para, então, propor uma metodologia baseada em RV que supere os desafios encontrados na atualidade pela técnica de EA.

#### 3.1 EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

A EA tem sido amplamente estudada e aplicada na detecção de descargas parciais (DPs) em transformadores de potência. A evolução dessa técnica pode ser traçada desde suas observações empíricas iniciais até os modernos métodos instrumentais. Esta seção apresenta uma revisão sobre o desenvolvimento histórico e científico da EA, destacando sua relevância na manutenção preditiva de equipamentos elétricos.

Registros históricos indicam que, por volta de 6500 a.C., oleiros percebiam sons emitidos por materiais defeituosos durante o resfriamento, caracterizando um dos primeiros exemplos documentados de análise acústica (FILIPPIN *et al.*, 2017). Além disso, eventos naturais, como terremotos, fraturas em gelo e rochas, e sons associados a descargas atmosféricas, foram identificados como fontes naturais de EA e objeto de estudo ao longo do tempo (PALACIOS, 1997). Durante a era da navegação, a propagação de ondas sonoras em líquidos passou a ser investigada mais sistematicamente. Leonardo da Vinci, em 1490, observou que conexões acústicas eficientes com a água, como canos, permitiam ouvir sons de navios a longas distâncias, demonstrando uma das primeiras aplicações práticas da EA (HARROLD, 1985). Nos estágios iniciais, a EA era predominantemente baseada em percepções empíricas e descrições qualitativas de fenômenos sonoros (DROUILLARD, 1987).

Com o advento da energia elétrica em 1874, as DPs foram identificadas como fontes de EA prejudiciais ao isolamento elétrico, inicialmente detectadas por meio da audição humana (FILIPPIN *et al.*, 2017). Na década de 1920, o pesquisador alemão Erich Schell realizou estudos pioneiros sobre EA no contexto da metalurgia, relatando em 1929 que a formação de martensita em aços era acompanhada por um ruído característico, semelhante ao "grito do estanho" (FILIPPIN *et al.*, 2017). Este foi um dos primeiros estudos a correlacionar eventos acústicos com transformações metalúrgicas.

Em 1939, pesquisadores japoneses como Kimura, Tsumura e Yokosuka, realizavam medições pioneiras de EA em frequências ultrassônicas (acima de 20 kHz). Eles utilizaram microfones piezoelétricos imersos em óleo para captar essas emissões, contribuindo significativamente para o desenvolvimento da técnica de EA no contexto da detecção de falhas em materiais e equipamentos elétricos (KIMURA; TSUMURA; YOKOSUKA, 1940) apud (HARROLD, 1985). Suas pesquisas são frequentemente citadas como um marco na

transição para métodos instrumentais mais avançados na análise de EA, permitindo uma melhor compreensão dos fenômenos acústicos associados a processos industriais e elétricos. Essa fase da transição empírica para a fase instrumental da EA ocorreu de fato na metade do século XX, com a tese de doutorado de Josef Kaiser (1950), que estabeleceu princípios fundamentais da EA, incluindo o efeito "Kaiser", caracterizado pela ausência de novas emissões acústicas até que a tensão aplicada a um material ultrapasse um nível anterior (KAISER, 1950) *apud* (FILIPPIN *et al.*, 2017).

Entre o final da década de 1960 e o início da década de 1970, quatro transformadores da *New Brunswick Electric Power Commission* falharam devido a DPs. Em 1974, pesquisadores relataram que o diagnóstico dessas falhas foi dificultado pelo ruído externo e pela limitação dos instrumentos da época (TRAIN; MERCIER; THORNE, 1974). Em 1984, houve um grande avanço significativo no monitoramento de DPs com o desenvolvimento de um monitor automático capaz de diferenciar DPs internas de ruídos externos, aumentando a precisão do diagnóstico (KAWADA *et al.*, 1984).

Diante desse progresso, estudos mais recentes têm demonstrado a crescente eficácia da EA na detecção de DPs em transformadores. Trabalhos como o de (A. OLIVIERI; MANNHEIMER; RIPPER-NETO, 2000) avaliaram a capacidade dessa técnica na localização de DPs, mostrando sua alta assertividade em chaves comutadoras e falhas mecânicas. Além disso, pesquisas como a de (JIANG *et al.*, 2000) foram pioneiras na aplicação de técnicas de reconhecimento de padrões para análise de DP, estabelecendo uma base para abordagens posteriores baseadas em inteligência computacional.

Seguindo essa linha de evolução, a pesquisa de (NUNEZ, 2006) evidenciou a relevância da EA na identificação precoce de falhas em autotransformadores, demonstrando que sua aplicação poderia ter evitado danos severos caso a concessionária tivesse adotado uma estratégia de manutenção preditiva. O estudo apresentou casos de degradação do isolamento nos Estados Unidos, onde o monitoramento acústico indicou falhas potenciais, posteriormente confirmadas por inspeção interna. Nas Figuras 7(a) e 8(a), observa-se a formação de *clusters* acústicos, sugerindo regiões de maior atividade, enquanto as Figuras 7(b) e 8(b) revelam os danos detectados na fase de inspeção. A falha catastrófica foi associada ao superaquecimento excessivo, resultando no derretimento das laminações do núcleo de aço de silicone, comprometendo a integridade estrutural do equipamento e a confiabilidade do sistema elétrico. Essa pesquisa de (NUNEZ, 2006) conclui ainda que se um sistema de monitoramento *on-line* tivesse sido instalado ao final do teste EA (conforme recomendado a concessionária elétrica, mas rejeitou com base no conselho do fabricante), poderia ter sido possível detectar um incremento na intensidade da atividade acústica proveniente das áreas com falhas e evitar a falha deste autotransformador.

Esses achados ressaltam a importância da EA como ferramenta essencial para manutenção preditiva, contribuindo para a mitigação de riscos operacionais, a extensão da vida útil dos transformadores e a garantia da continuidade do fornecimento de energia.

Figura 7 – Exemplo 1: Localização de potencial falha no transformador com o AEwin<sup>TM</sup>.

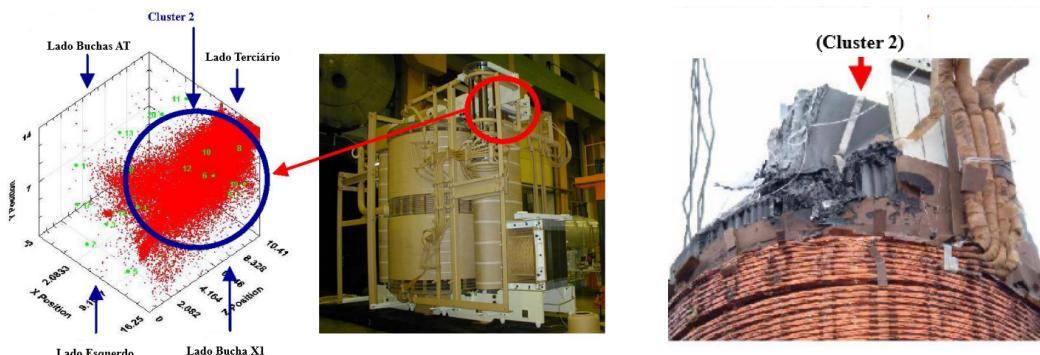
(a) EA alertando potencial falha. (b) Falha não evitada.



Fonte: (NUNEZ, 2006)

Figura 8 – Exemplo 2: Localização de potencial falha no transformador com o AEwin<sup>TM</sup>.

(a) EA alertando potencial falha. (b) Falha não evitada.



Fonte: (NUNEZ, 2006)

Dando continuidade a esses estudos, pesquisas posteriores, como as de (SIKORSKI; WALCZAK, 2013), também demonstraram a eficácia da EA na detecção e localização de DPs, reforçando sua importância como uma ferramenta essencial para a manutenção preditiva de transformadores de potência. Além disso, estudos aplicados, como os conduzidos por (NASCIMENTO *et al.*, 2023), compararam diferentes técnicas de detecção de DP e evidenciaram a EA como a mais eficaz para diagnósticos em transformadores em operação, consolidando sua aplicabilidade no monitoramento contínuo desses equipamentos críticos.

Com os avanços nas tecnologias de inteligência artificial, pesquisas recentes, como as de (BEURA; BELTLE; TENBOHLEN, 2023), propuseram o uso de redes neurais para aprimorar a localização das fontes de DP, aumentando a automação e a precisão da técnica. Além disso, estudos como os de (HEKMATI, 2015) e (LI *et al.*, 2013) têm explorado métodos matemáticos avançados para otimizar a interpretação dos sinais acústicos, aprimorando ainda mais a confiabilidade e a assertividade da EA no diagnóstico de falhas. Esse cenário evidencia a evolução contínua da técnica, que se posiciona como um pilar fundamental para a prevenção de falhas catastróficas e a extensão da vida útil dos transformadores.

Apesar dos avanços significativos na aplicação da EA para detecção e diagnóstico das DPs em transformadores de potência, desafios permanecem. A melhoria na localização das fontes de DPs e a redução da dependência de especialistas na interpretação dos dados são áreas que necessitam atenção contínua. Superar essas limitações pode tornar a EA uma ferramenta ainda mais eficaz e acessível no monitoramento da condição dos transformadores.

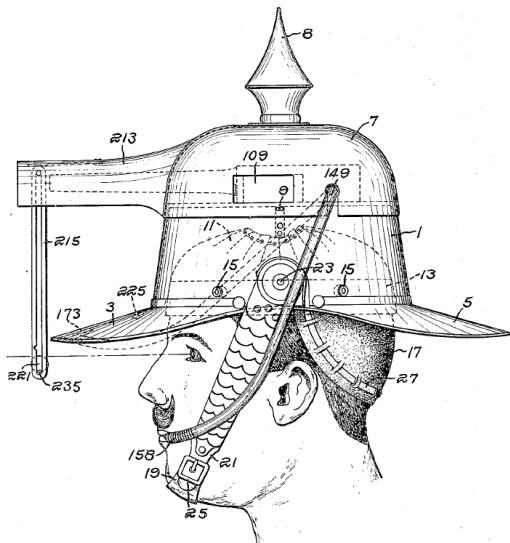
### 3.2 REALIDADE VIRTUAL (RV)

A Realidade Virtual (RV) é um campo tecnológico dinâmico, cujo desenvolvimento tem sido impulsionado por avanços computacionais e inovações em *interfaces* homem-máquina. Suas raízes conceituais remontam a experimentos do início do século XX, com dispositivos como o *display* periscópico patenteado por Albert B. Pratt em 1929 (Figura 9(a)) e o simulador de voo mecânico de Edward Link, criado em 1946 para o treinamento de pilotos. Esses primeiros sistemas, apesar de rudimentares, estabeleceram as bases para aplicações imersivas e interativas, demonstrando a viabilidade de ambientes sintéticos para treinamento e simulação (BASU, 2019).

Nos anos 1960, a RV começou a tomar forma com avanços notáveis em visualização e interação. Ivan Sutherland, frequentemente referido como o "pai da RV", desenvolveu o primeiro *head-mounted display* (HMD), conhecido como *Sword of Damocles*, permitindo a visualização de ambientes tridimensionais gerados por computador (BASU, 2019). Embora ainda experimental, essa inovação introduziu conceitos fundamentais, como a rastreabilidade da posição do usuário e a projeção de gráficos dinâmicos, que mais tarde se tornariam pilares da RV moderna. Paralelamente, Morton Heilig introduziu o Sensorama (Figura 9(b)), um sistema multissensorial que combinava imagens tridimensionais, som estéreo e estímulos táteis, demonstrando o potencial da RV para experiências imersivas e interativas (TORI; KIRNER; SISCOUTTO, 2006).

A década de 1980 representou um marco na consolidação da RV, com o desenvolvimento de tecnologias que começaram a tornar a experiência imersiva mais sofisticada e acessível. Jaron Lanier, fundador da VPL Research, foi um dos pioneiros na introdução de dispositivos interativos, como luvas sensoriais e óculos RV, que possibilitaram um maior nível de interação com os ambientes virtuais. Esses avanços trouxeram um novo paradigma para a computação gráfica e a simulação digital, despertando o interesse de setores como medicina, engenharia e defesa.

Durante os anos 1990, a tecnologia da RV começou a ser integrada ao mercado de entretenimento e treinamentos industriais. No entanto, restrições técnicas, como a baixa capacidade de processamento gráfico e os altos custos de hardware, limitaram sua adoção em larga escala. A maioria dos sistemas ainda apresentava dificuldades em proporcionar uma experiência imersiva fluida, devido a problemas como latência elevada e baixa resolução de imagem.

Figura 9 – Primeiros registros da imersão sensorial - *interface* Homem-Máquina.(a) *Interface* de (PRATT, 1915).

(b) Sensorama de Morton Heilig em 1956.



**Fonte:** (BASU, 2019)

Somente no início dos anos 2000, com o avanço das placas gráficas e sensores de movimento mais precisos, a RV passou a ganhar maior adesão comercial. O lançamento do *Oculus Rift* por Palmer Luckey em 2012 marcou um ponto de inflexão, ao apresentar um dispositivo com rastreamento de cabeça aprimorado e um campo de visão mais amplo, reduzindo algumas das limitações anteriores (LAVIOLA *et al.*, 2017). A partir desse período, melhorias significativas em *hardware* e *software* permitiram que a RV expandisse suas aplicações para além do entretenimento (AZUMA, 1997).

Apesar dos avanços, desafios ainda persistem, incluindo o fenômeno do *motion sickness*, causado pela desconexão entre movimento real e virtual, e a exigência de *hardware* avançado para proporcionar experiências imersivas de alta fidelidade (JAMES J. CUMMINGS, 2012). No entanto, a crescente acessibilidade e sofisticação dos dispositivos, aliadas a inovações como aprendizado de máquina e integração com *gêmeos digitais*, indicam um futuro promissor para a RV, consolidando-a como uma ferramenta essencial para diversas áreas da ciência e tecnologia. Gêmeos digitais são réplicas virtuais de objetos, processos ou sistemas físicos, utilizadas para simulação, monitoramento e otimização em tempo real.

### 3.3 RV APLICADA À EA

A RV tem se consolidado como uma ferramenta promissora em diversos setores, incluindo saúde, educação, manufatura e engenharias (AZUMA, 1997; KIM *et al.*, 2018; KESSLER, 2020). Seu impacto é particularmente notável em ambientes que exigem trei-

namento especializado, simulações complexas e análises interativas, onde a imersão e a interatividade proporcionadas pela tecnologia oferecem vantagens significativas sobre métodos tradicionais.

No campo da aplicação na Engenharia Elétrica, estudos demonstram que sua integração com ferramentas preditivas pode aprimorar significativamente a detecção de falhas em equipamentos elétricos, devido à análise mais intuitiva dos dados coletados (CYRINO *et al.*, 2022). A RV é utilizada para simulações de sistemas elétricos de alta potência, permitindo que os usuários observem o comportamento do sistema em tempo real e interajam com o AV de forma segura. Além disso, a RV é empregada no treinamento de profissionais, permitindo que eles pratiquem procedimentos em AVs que simulam condições reais de trabalho, o que melhora a eficácia do aprendizado e prepara os futuros engenheiros elétricos para os desafios do mercado de trabalho. A aplicação da RV em subestações elétricas também é destacada, onde ela facilita a operação e manutenção de equipamentos críticos, como disjuntores e sistemas de controle, em um ambiente seguro e controlado (CYRINO *et al.*, 2022).

A eficácia da RV em aplicações práticas é amplamente influenciada pelos avanços em dispositivos vestíveis e sistemas de rastreamento, conforme apontado por (LAVIOLA *et al.*, 2017). Esses aprimoramentos não apenas tornam as interações com AVs mais imersivas e precisas, mas também abrem caminho para o uso da RV no treinamento de funcionários e na realização de manutenções. De fato, estudos recentes reforçam a ideia de que a integração da RV com ferramentas preditivas pode aprimorar significativamente a detecção de falhas em equipamentos elétricos, como transformadores, graças à análise mais intuitiva dos dados coletados (CYRINO *et al.*, 2022).

Um exemplo relevante da aplicação dessas tecnologias é o Projeto de P&D Aneel Uso de RV e Aumentada Aplicadas às Fases de Engenharia, Manutenção e Controle do Sistema HVDC da Eletronorte, executado pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e pela empresa de tecnologia CGWorks. O projeto investigou soluções de software e hardware para aprimorar a operação e manutenção de sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC), destacando avanços significativos no uso da RV e da RA para treinamento e assistência em tempo real. No entanto, a pesquisa também evidenciou lacunas na aplicação dessas tecnologias para o diagnóstico avançado de falhas elétricas, especialmente na visualização e análise de DPs em transformadores de potência.

Apesar dos avanços já alcançados, o setor de energia elétrica ainda não explorou completamente o potencial da RV, principalmente quando integrada a ferramentas de manutenção preditiva, como softwares de aquisição e monitoramento da condição de transformadores. A integração da RV em ensaios preditivos, como o monitoramento da condição dos ativos, surge como um campo fértil para inovações (STONE *et al.*, 2023). Nesse sentido, esta pesquisa propõe uma metodologia que integra a RV ao campo da manutenção preditiva, com foco no monitoramento de DPs em transformadores de grande

porte. Ao explorar essa abordagem inovadora, este trabalho visa não apenas aprimorar a visualização 3D das fontes de DPs, mas também oferecer uma solução mais acessível e eficaz para os desafios enfrentados pelo setor de energia elétrica. Acredita-se que a utilização da RV, em conjunto com ferramentas de modelagem 3D, representa uma oportunidade única para otimizar processos de manutenção, aprimorar a segurança e aumentar a eficiência dos diagnósticos do ensaio preditivo (BEURA; BELTLE; TENBOHLEN, 2023; SIKORSKI; WALCZAK, 2013; JIANG *et al.*, 2000).

### 3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A revisão identificou 36 referências bibliográficas de especial relevância, de um total de 89 pesquisadas, abrangendo temas como transformadores de potência, DP, técnicas de EA e a aplicação de tecnologias emergentes, como a RV, em contextos industriais e no setor de energia. Esses estudos forneceram um panorama atualizado do estado da arte e evidenciaram lacunas significativas na integração dessas tecnologias para diagnósticos mais precisos e eficientes, especialmente no aprimoramento das instrumentações voltadas para o monitoramento da condição de ativos. Além disso, os trabalhos analisados ofereceram direcionamentos estratégicos para superar essas lacunas, enfatizando o desenvolvimento de soluções inovadoras que conciliem tecnologia avançada e validação prática. Esta proposta alinha-se às tendências emergentes no setor elétrico, que apontam para a quarta geração da tecnologia de medição de ensaio não intrusivos (STONE *et al.*, 2023). A Tabela 2 apresenta uma síntese das principais referências alinhadas a esta pesquisa, destacando a diversidade e a profundidade dos temas abordados, reforçando a relevância e a contribuição esperada desta dissertação.

Tabela 2 – Resumo das Revisões Bibliográficas sobre a Técnica de EA e sobre a RV.

| Referência                                   | Conteúdo Abordado |    |   |   |   |    |
|--|-------------------|----|---|---|---|----|
|  | DP                | EA | T | L | V | RV |
| (FILIPPIN <i>et al.</i> , 2017)              | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | —  |
| (PALACIOS, 1997)                             | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (HARROLD, 1985)                              | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (DROUILLARD, 1987)                           | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (KIMURA; TSUMURA; YOKOSUKA, 1940)            | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (KAISER, 1950)                               | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (TRAIN; MERCIER; THORNE, 1974)               | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (KAWADA <i>et al.</i> , 1984)                | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | ✓ | —  |
| (A. OLIVIERI; MANNHEIMER; RIPPER-NETO, 2000) | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (JIANG <i>et al.</i> , 2000)                 | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | ✓ | —  |
| (NUNEZ, 2006)                                | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | —  |
| (SIKORSKI; WALCZAK, 2013)                    | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | —  |
| (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2023)            | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (BEURA; BELTLE; TENBOHLEN, 2023)             | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | —  |
| (HEKMATI, 2015)                              | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (LI <i>et al.</i> , 2013)                    | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (BASU, 2019)                                 | —                 | —  | — | — | — | ✓  |
| (TORI; KIRNER; SISCOUTTO, 2006)              | —                 | —  | — | — | — | ✓  |
| (SHERMAN; CRAIG, 2018)                       | —                 | —  | — | — | ✓ | ✓  |
| (LAVIOLA <i>et al.</i> , 2017)               | —                 | —  | — | — | ✓ | ✓  |
| (JAMES J. CUMMINGS, 2012)                    | —                 | —  | — | — | — | ✓  |
| (AZUMA, 1997)                                | —                 | —  | ✓ | — | — | ✓  |
| (BUETTNER <i>et al.</i> , 2022)              | —                 | —  | ✓ | — | ✓ | ✓  |
| (KIM <i>et al.</i> , 2018)                   | —                 | —  | ✓ | — | ✓ | ✓  |
| (CYRINO <i>et al.</i> , 2022)                | —                 | —  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |
| (STONE <i>et al.</i> , 2023)                 | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (PRATT, 1915)                                | —                 | —  | — | — | — | ✓  |
| (KREUGER, 1989)                              | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (NUNES; COSTA, 2008)                         | -                 | —  | - | - | ✓ | ✓  |
| (KAŠKA, 2016)                                | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |
| (TIAN <i>et al.</i> , 2016)                  | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (NICOARĂ; MARINESCU; PĂTRU, 2016)            | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (NBR IEC 60270, 2017)                        | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (IEEE STD C57.127-2018, 2019a)               | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (HUSSAIN; REFAAT; ABU-RUB, 2021)             | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | — | —  |
| (RATHOD; KUMBHAR; BHALJA, 2023)              | ✓                 | —  | ✓ | ✓ | — | —  |
| <b>Esta Dissertação de Mestrado</b>          | ✓                 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |

**Legenda:**

DP = Descarga Parcial;

EA = Emissão Acústica;

T = DPs em Transformadores;

L = Localização de DPs;

V = Visualização de DPs;

RV = Realidade Virtual

**Fonte:** Autoria Própria.

## 4 METODOLOGIA

Neste Capítulo, propõe-se uma metodologia gráfica para a visualização de descargas parciais (DPs) em transformadores utilizando realidade virtual (RV). Primeiramente, apresenta-se a metodologia atual disponível no mercado. Na sequência, apresenta-se a metodologia proposta, que busca aprimorar a visualização e a interpretação dos sinais acústicos por meio da integração dos dados de EA em um ambiente RV. Por fim, comentam-se os ganhos da metodologia proposta em comparação com a solução atual.

### 4.1 METODOLOGIA ATUAL

A técnica de EA tem sido amplamente empregada no monitoramento de transformadores devido à sua capacidade de detectar falhas térmicas e elétricas enquanto o equipamento permanece em operação. Um dos diferenciais mais relevantes dessa técnica é sua habilidade de identificar e localizar as DPs, fornecendo subsídios importantes para a manutenção preditiva e a mitigação de falhas catastróficas.

Atualmente, várias empresas oferecem soluções baseadas na técnica de EA, incluindo a Physical Acoustics Corporation (PAC), Vallen Systeme, Omicron Electronics, Doble Engineering Company, Kepco, B&K, Megger e Tettex Instruments, além de fabricantes menores como Soundwel e Dittel. Essas ferramentas comerciais incluem interfaces gráficas que ajudam a identificar DPs, permitindo definir as regiões afetadas. No entanto, uma limitação significativa é a precisão na localização da fonte de emissão, pois a visualização gráfica geralmente não detalha a estrutura interna o suficiente para correlacionar sinais acústicos com componentes específicos, como enrolamentos, buchas e comutadores. Como resultado, a localização precisa das fontes de defeitos ainda exige análises complementares baseadas em desenhos técnicos e no conhecimento especializado de fabricantes e especialistas em transformadores.

Dentre os *softwares* existentes, o AEwin<sup>TM</sup> da PAC permite a aquisição e armazenamento contínuo de sinais acústicos, além de oferecer recursos gráficos para análise estatística e espacialização dos dados. Isso possibilita a identificação preliminar da região afetada pela DP, sendo um recurso valioso para o diagnóstico inicial. Para mais informações sobre a parametrização do *software* AEwin<sup>TM</sup>, o Apêndice B apresenta as principais configurações e ajustes utilizados para a geração do estudo de casos desta pesquisa.

A parametrização do AEwin<sup>TM</sup> requer ajustes importantes, incluindo a velocidade de propagação dos sinais acústicos, o número mínimo e máximo de sensores ativos, o limiar de aquisição e critérios de filtragem por amplitude e frequência. Além disso, é necessário inserir dados específicos do transformador, como dimensões físicas e o modelo geométrico adequado. O *software* permite configurar diferentes representações geométricas (prismas retangulares ou cilindros) para otimizar o cálculo das trajetórias acústicas e melhorar a visualização espacial dos eventos.

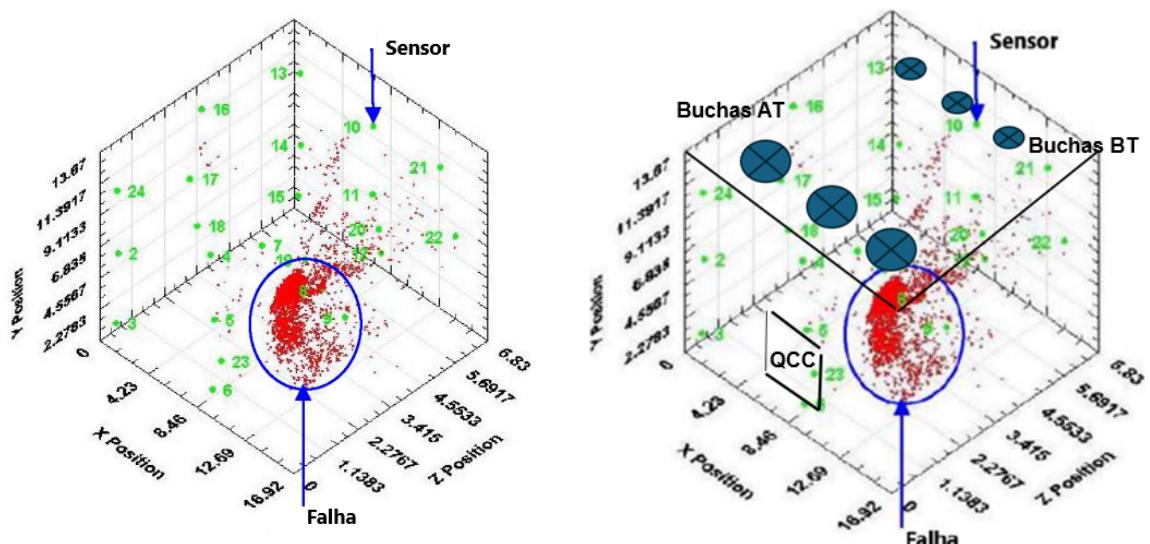
A Figura 10(a) ilustra uma representação tridimensional de um transformador de potência com uma falha detectada, conforme uma pesquisa aplicada de (NUNEZ, 2006). Embora a interface gráfica seja útil para visualizar atividades acústicas globalmente, ela tem limitações importantes. A modelagem geométrica do AEwin™ é simplificada, mostrando apenas os contornos externos do transformador, o que compromete a correlação entre sinais acústicos e componentes internos. Isso dificulta a identificação precisa da origem das DPs, levando a diagnósticos mais demorados e menos precisos, que dependem da experiência do operador e da consulta a esquemas técnicos.

Para mitigar essa limitação, é comum personalizar manualmente os modelos de análise, adicionando elementos de referência como a posição das buchas de AT e BT, além da localização do quadro central de comando. Em alguns casos, os ensaístas editam seus relatórios manualmente para indicar a posição de componentes críticos ou elementos prováveis de gerar sinais de EA, como as chaves comutadoras de tapes de regulação de tensão do transformador.

A Figura 10(b) exemplifica a customização manual do mapa acústico, utilizando a mesma base da Figura 10(a). Embora essa abordagem melhore a interpretação dos relatórios e ajude a localizar potenciais defeitos, ela não substitui a necessidade de uma modelagem geométrica mais detalhada e integrada. A representação simplificada do transformador pode comprometer a precisão da análise, dificultando a correlação entre sinais acústicos e componentes internos. Isso torna o diagnóstico mais subjetivo e dependente da experiência do analista, destacando a necessidade de métodos avançados de visualização e espacialização das fontes emissoras.

Figura 10 – Visualização EA de um transformador com uma possível falha detectada.

(a) Visualização gerada no *software EA*. (b) Visualização editada no *software EA*.



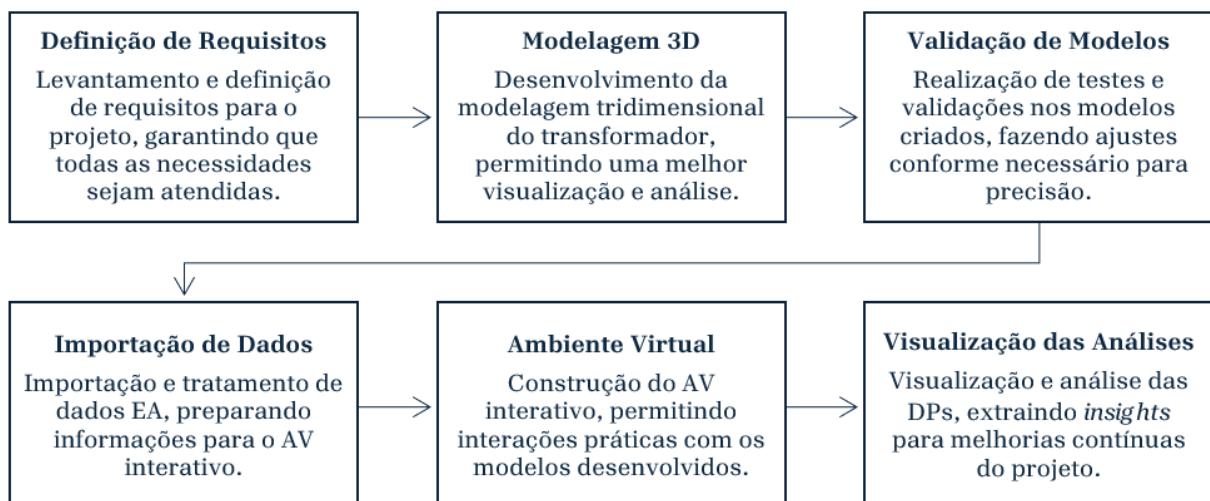
Fonte: (NUNEZ, 2006) com adaptação.

## 4.2 METODOLOGIA PROPOSTA

Visando superar as limitações na visualização de DPs em transformadores (Seção 4.1), propõe-se uma *interface* em RV como alternativa ao *software* AEwin™. O objetivo é ampliar o diagnóstico via EA, detalhando componentes internos e correlacionando sinais acústicos a defeitos, otimizando a identificação da origem das DPs. A solução integra RV ao fluxo de análise de EA, possibilitando a visualização 3D interativa dos dados acústicos georreferenciados, permitindo maior recurso visual dos mapas acústicos e agilidade na localização das fontes de DPs.

A pesquisa, apoiada pela equipe da GT00372 do Programa de P&D da Aneel, no contexto do projeto "Uso de RV e RA Aplicadas ao Sistema HVDC da Eletrobras Eletro-norte", contou com a participação da UFU e CGWorks. O processo de desenvolvimento, Figura 11, estruturou-se em seis etapas interdisciplinares (engenharia elétrica, modelagem 3D e engenharia de *software*) visando mitigar desafios técnicos e operacionais e expandir a aplicação para outros equipamentos.

Figura 11 – Fluxograma do processo de desenvolvimento da *interface* RV.



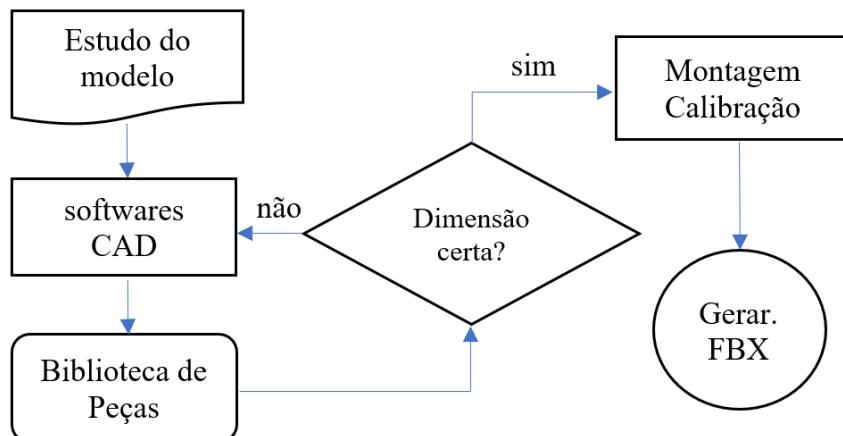
**Fonte:** Autoria Própria.

A fase inicial do processo de desenvolvimento, ilustrado na Figura 11, consistiu em um estudo aprofundado sobre os princípios da EA, a geometria do transformador e a localização dos sensores. A partir desse estudo, foram definidos requisitos funcionais (interação do usuário, precisão geométrica) e não funcionais (desempenho gráfico na RV). A avaliação da compatibilidade entre os modelos 3D e os dados acústicos georreferenciados foi priorizada para garantir que a solução superasse as limitações de visualização do AEwin™.

A modelagem 3D do transformador, etapa subsequente do processo, baseou-se em diversos insumos, incluindo desenhos CAD, manuais técnicos e registros fotográficos do equipamento. A escolha das ferramentas de modelagem levou em conta a necessidade de precisão geométrica e compatibilidade com a plataforma de desenvolvimento da

interface. Optou-se pelo Autodesk Inventor™ e SolidWorks™, softwares que oferecem modelagem paramétrica<sup>1</sup> e refinamentos estruturais, facilitando a montagem do modelo 3D. O fluxograma apresentado na Figura 12 detalha o processo sequencial de modelagem 3D paramétrica.

Figura 12 – Fluxograma do processo de modelagem 3D paramétrica.



Fonte: Autoria Própria.

Na modelagem, cada componente do transformador foi modelado individualmente, empregando cotas e ancoragens para viabilizar modificações dimensionais de forma ágil. O modelo final integrou tanto elementos externos (tanque principal, isoladores, buchas, radiadores e conectores) quanto internos (bobinas dos enrolamentos, núcleo ferromagnético e comutadores). Para atender às exigências do ensaio de EA, a parte interna do transformador foi modelada em maior detalhamento, abrangendo não apenas os componentes principais, mas também as buchas internas responsáveis pela conexão com o modelo externo.

Para assegurar a compatibilidade entre os modelos desenvolvidos por diferentes modeladores, os componentes foram subdivididos, facilitando a visualização e o controle individualizado de cada parte. Ademais, foram definidos parâmetros comuns para todos os modelos, garantindo a padronização e a integridade do projeto. Quando necessário, recorreu-se a técnicas como escalonamento de documentos (utilizando recursos do AutoCAD, por meio da aba *Insert* → *PDF Import*) e análise fotográfica detalhada para complementar informações ausentes, como contornos, dimensões e texturas.

Visando assegurar uniformidade na modelagem, foi desenvolvida uma biblioteca virtual de componentes padronizados do transformador. Essa biblioteca possibilitou a reutilização eficiente de elementos previamente modelados, promovendo maior agilidade e precisão na construção do modelo final.

<sup>1</sup> A modelagem paramétrica tridimensional é uma técnica de design CAD que cria modelos 3D com base em parâmetros, relações e restrições.

Esse processo de modelagem eletromecânica, ilustrada na Figura 12, incluiu um ciclo de validação para assegurar a qualidade de cada modelo criado. Realizou-se, portanto, uma auditoria dimensional rigorosa para validar a precisão geométrica dos modelos, garantindo sua correspondência com as estruturas reais. Todos os detalhes construtivos, propriedades dos materiais e especificações técnicas foram minuciosamente revisados, assegurando conformidade com os requisitos do projeto.

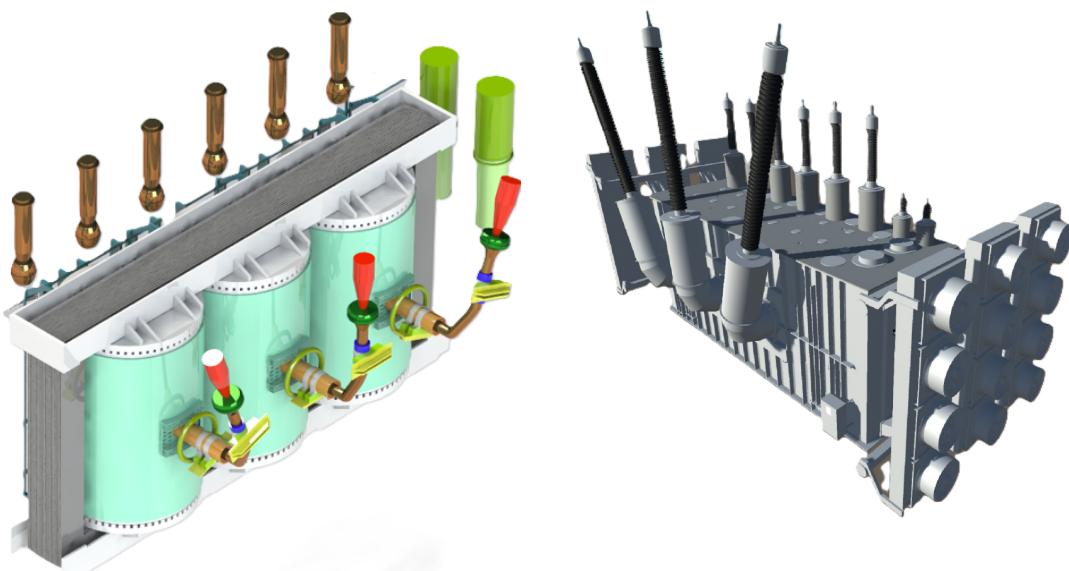
A exportação dos modelos nos formatos .fbx e .obj foi definida para garantir compatibilidade com o motor gráfico (Unity3D™) utilizado para criação do *interface* gráfica RV. A Figura 13 apresenta dois estágios do processo de modelagem: a estrutura interna do transformador (Figura 13(a)) e a estrutura externa (Figura 13(b)).

Após a otimização e adequação dos modelos, garantindo compatibilidade e formatação, iniciou-se a criação do AV na Unity3D™. Nesta etapa, implementamos funcionalidades interativas, permitindo ao usuário girar a visualização ao redor do transformador, aproximar e afastar a imagem (*zoom*) com comandos simples de *mouse* e teclado. Adicionalmente, foi disponibilizado o recurso da seleção interativa das DPs para consulta de coordenadas, além de ajustes de iluminação para aprimorar a percepção dos detalhes.

Na etapa de criação do AV, foram definidos pontos de ancoragem estratégicos, estruturados em uma hierarquia de *GameObjects*. As estruturas hierárquicas "pai-filho" organizaram os *GameObjects*, permitindo uma manipulação precisa dos elementos dentro de uma cena virtual. A conversão dos modelos para *GameObjects* possibilitou o controle individual de cada componente dentro da RV, facilitando interações dinâmicas no ambiente simulado.

Figura 13 – Visualização da estrutura interna e externa do transformador utilizando a metodologia proposta.

- (a) Vista isométrica da parte interna (núcleo e enrolamentos). (b) Vista isométrica da parte externa (tanque e acessórios).



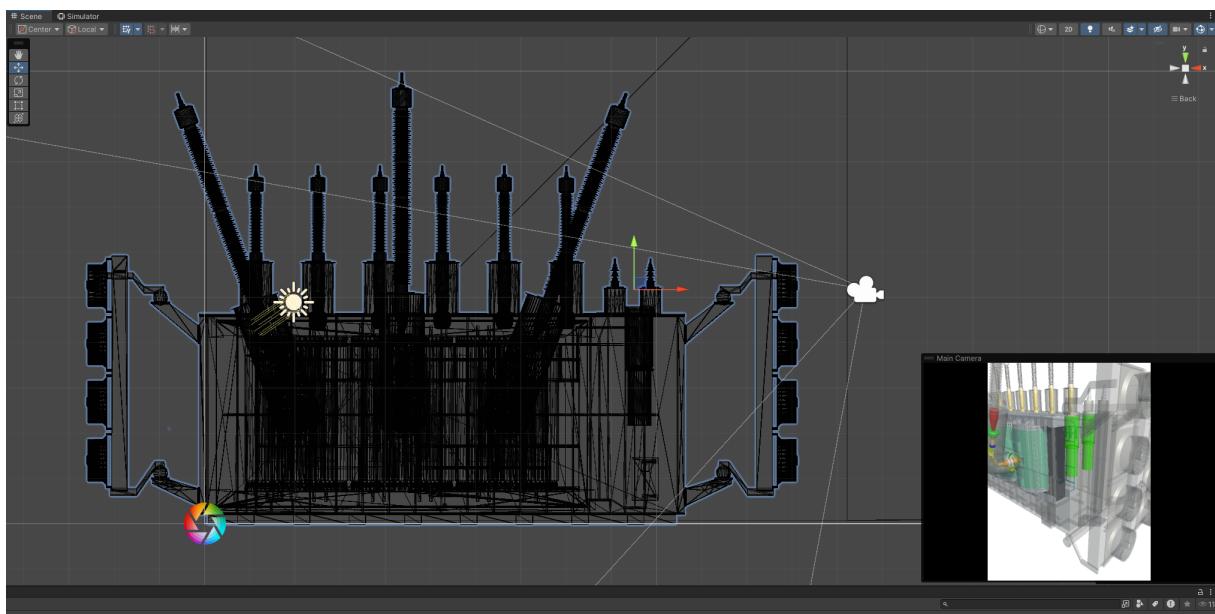
**Fonte:** Autoria Própria.

Os *GameObjects* são a estrutura fundamental para a RV e, por padrão, não possuem funcionalidades até que componentes específicos sejam adicionados. Esses componentes definem atributos essenciais do objeto, como: *Transform* (responsável por posição, rotação e escala), *MeshRenderer* (responsável pela renderização gráfica) e *Collider* (fundamental para interações físicas).

Um aspecto fundamental no desenvolvimento da metodologia foi a definição do processo de transferência dos dados do AEwin™ para a plataforma proposta. Os dados do ensaio EA, extraídos por meio do *software* AEwin™, foram organizados em arquivos no formato .CSV, contendo as coordenadas espaciais (x, y, z) dos fenômenos identificados, como *clusters* e *events*. Além dessas coordenadas, também foram incorporadas ao modelo as posições espaciais dos sensores acústicos utilizados na captação dos sinais. Essa etapa foi essencial para assegurar a correta correspondência entre os pontos de medição do ensaio EA representados no AEwin™ e na plataforma RV, possibilitando uma comparação equitativa entre as soluções atual e proposta para fins de validação do usuário.

A etapa final do processo de desenvolvimento envolveu a avaliação da usabilidade e do desempenho gráfico da *interface*. Essa fase é detalhada no Capítulo 5, onde exploramos os recursos gráficos da *interface* proposta e realizamos uma comparação qualitativa com o *software* AEwin™. A Figura 14 ilustra a representação de um transformador no ambiente RV, capturada pela câmera virtual em perspectiva 3D, demonstrando a aplicação prática da metodologia.

Figura 14 – Exemplo de representação de um transformador na plataforma RV, demonstrando a visualização em perspectiva 3D.



Fonte: Autoria Própria.

### 4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste Capítulo, propôs-se uma metodologia inovadora utilizando RV para a visualização de DPs em transformadores de potência. Inicialmente, discutiu-se sobre a técnica de EA. Em seguida, citou-se as principais soluções comerciais disponíveis, como PAC e Omicron, que disponibilizam *software* para monitoramento EA. Das soluções disponíveis, observou-se que existem soluções que fornecem uma detecção e localização precisa das DPs, por exemplo, o *software* AEwin™. Entretanto, notou-se que a visualização das DPs ainda carece de melhorias. Atualmente, para interpretar os locais de DPs requer conhecimento técnico especializado e análises complementares.

Diante dessas limitações, propôs-se uma nova abordagem baseada em RV, que possibilita uma interpretação da visualização espacial dos dados acústicos no transformador com maior nível de detalhamento em comparação com o recurso atualmente utilizado. O desenvolvimento da *interface* seguiu um processo estruturado, incluindo a modelagem 3D detalhada dos transformadores. Além disso, os dados dos ensaios EA foram transportados para a representação tridimensional no modelo em RV. Com isso, a metodologia proposta tem potencial de gerar maior recursos de visualização da análise acústica, tornando o diagnóstico mais eficiente e acessível.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

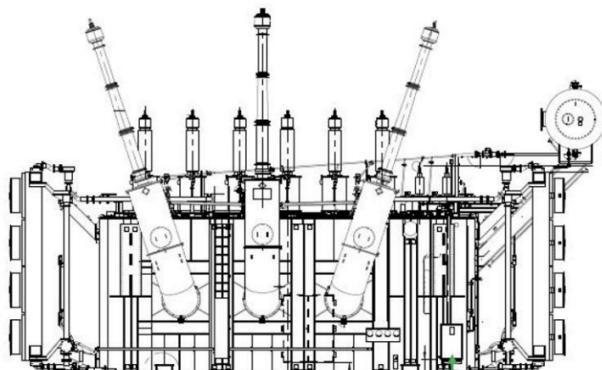
Neste Capítulo, apresenta-se uma análise comparativa entre as metodologias de visualização de sinais acústicos. Compara-se a *interface* gráfica do *software* AEwin<sup>TM</sup>, chamada aqui de solução atual, com a *interface* desenvolvida na plataforma RV, a solução proposta. Para tal, levou-se em consideração um ensaio de EA em um transformador. Para a análise comparativa, foram selecionados cinco registros de medições horárias, nos quais foram identificados sinais com padrões característicos de DPs. Esses registros permitiram destacar as vantagens e limitações das visualizações de sinais fornecidas por cada recurso gráfico sob diferentes perspectivas.

### 5.1 O ENSAIO DE EA

Em janeiro de 2022, realizou-se um ensaio de EA em um transformador do sistema HVDC Rio Madeira. O ensaio consistiu no monitoramento dos sinais acústicos em diferentes condições de carga do transformador durante 24 horas. O instrumento utilizado para a coleta dos sinais foi a versão V5.92 do *software* *Acoustic Emission Workstation* (AEwin<sup>TM</sup>), da empresa norte-americana *Physical Acoustics Corporation* (PAC), modelo DiSP. Esse *software* possui 24 canais de aquisição para a conexão dos *sensors*. O ensaio seguiu critérios da norma (IEEE STD C57.127-2018, 2019b).

O equipamento submetido ao ensaio EA é um transformador trifásico utilizado em subestações conversoras HVDC. Ele tem opera em 500 kV, potência nominal de 424 MVA e dimensões, altura = 4,60m, largura = 10,50m e profundidade = 3,30m e peso de 438 toneladas. Na Figura 15, apresenta-se o desenho bidimensional do projeto, evidenciando o arranjo dos principais componentes, como buchas de alta e baixa tensão e os enrolamentos das fases. Na Figura 16, mostra-se uma fotografia real do transformador, oferecendo uma perspectiva clara de sua configuração externa e dimensões. Por fim, na Figura 17, ilustra-se o diagrama de ligações elétricas dos principais componentes.

Figura 15 – Desenho bidimensional do projeto do transformador submetido ao ensaio EA.



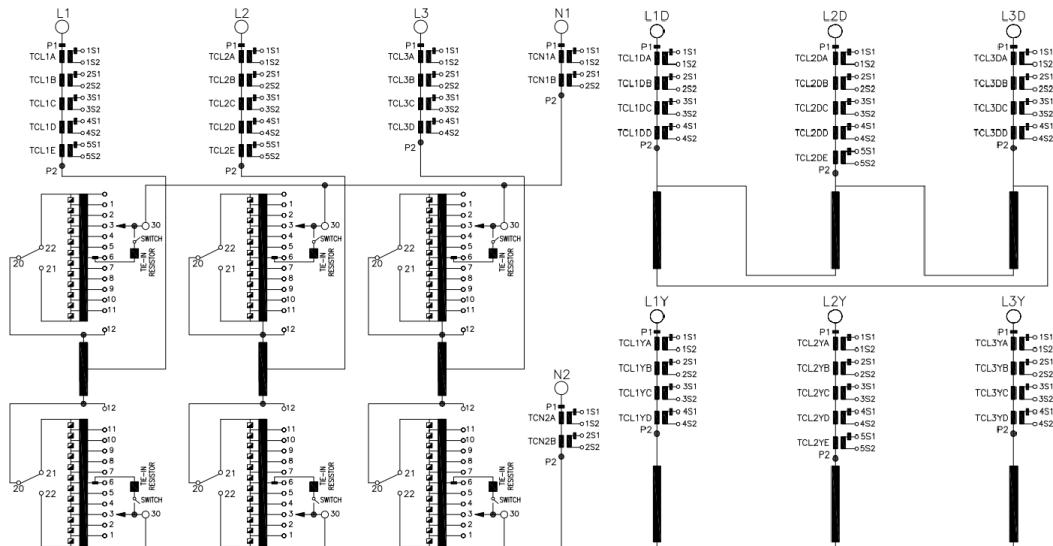
**Fonte:** Manual do fabricante.

Figura 16 – Fotografia do transformador submetido ao ensaio EA.



**Fonte:** Autoria Própria.

Figura 17 – Diagrama elétrico de ligações do transformador submetido ao ensaio EA.



**Fonte:** Manual do fabricante.

Neste ensaio EA foram utilizados 23 sensores. Esses foram dispostos de acordo com as coordenadas  $(x_s, y_s, z_s)$  apresentadas na Tabela 3. Essas coordenadas são dados de entrada no *software* AEwin<sup>TM</sup> e na solução proposta. Na Figura 18, representa-se a distribuição 3D dos sensores na superfície do transformador em as ambas metodologias: AEwin<sup>TM</sup>(solução atual) e a solução proposta baseada em RV. Na solução atual, os sensores são exibidos como pontos pretos numerados na superfície do modelo. Nota-se que a forma como é representada o transformador no *software* AEwin<sup>TM</sup> , ou seja, pobre em detalhes construtivos, pode exigir uma considerável experiência do ensaísta, incluindo o conhecimento técnico do fabricante e acesso às informações do projeto construtivo para a completa compreensão da alocação dos sensores nos pontos de maior probabilidade de falhas. Tal limitação, pode exigir que os especialistas editem manualmente o modelo para inserir informações adicionais, como a posição das buchas e conexões. Em contraste,

a representação proposta na Figura 18(b), oferece uma visualização mais detalhada e intuitiva, permitindo uma melhor compreensão do posicionamento dos sensores e dos componentes internos do transformador. A abordagem baseada em RV não apenas melhora a clareza da representação gráfica, mas também reduz a necessidade de consultas externas, facilitando a identificação das fontes de emissão acústica. Essa melhoria na visualização pode aumentar a eficiência na tomada de decisões sobre o posicionamento adequado dos sensores e contribuir para um monitoramento mais eficaz das condições operacionais do transformador. Outro aspecto vantajoso dessa interface proposta é o suporte que ela pode oferecer na montagem dos sensores, assegurando que as distâncias mínimas das partes energizadas sejam respeitadas e que os procedimentos de segurança sejam seguidos rigorosamente. Portanto, a visualização na solução proposta além de facilitar a interpretação dos dados, mas também contribui para uma tomada de decisão mais eficaz, otimizando o tempo de preparação do monitoramento acústico e promovendo melhores práticas no setor de manutenção de transformadores.

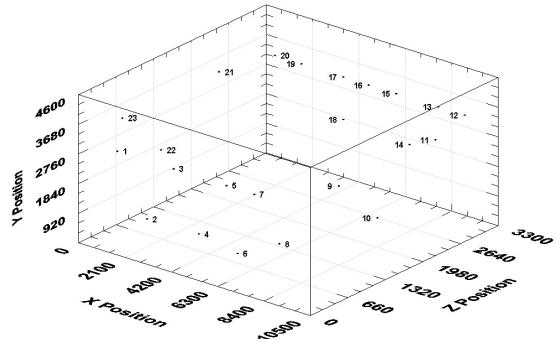
Tabela 3 – Localização dos Sensores.

| Sensor | $x_s$ (mm) | $y_s$ (mm) | $z_s$ (mm) |
|--------|------------|------------|------------|
| 1      | 1380       | 2240       | 0          |
| 2      | 2100       | 3800       | 0          |
| 3      | 2800       | 1150       | 0          |
| 4      | 3200       | 2240       | 0          |
| 5      | 4600       | 3800       | 0          |
| 6      | 6800       | 1150       | 0          |
| 7      | 6100       | 2240       | 0          |
| 8      | 6800       | 3800       | 0          |
| 9      | 10500      | 3000       | 860        |
| 10     | 10500      | 1900       | 1500       |
| 11     | 10500      | 3000       | 2380       |
| 12     | 9250       | 3500       | 3300       |
| 13     | 7900       | 4300       | 3300       |
| 14     | 6100       | 1020       | 3300       |
| 15     | 6600       | 4100       | 3300       |
| 16     | 5500       | 3300       | 3300       |
| 17     | 3750       | 4000       | 3300       |
| 18     | 3100       | 1550       | 3300       |
| 19     | 2550       | 3600       | 3300       |
| 20     | 1200       | 4300       | 3300       |
| 21     | 0          | 2850       | 2530       |
| 22     | 0          | 2000       | 1500       |
| 23     | 0          | 2850       | 810        |

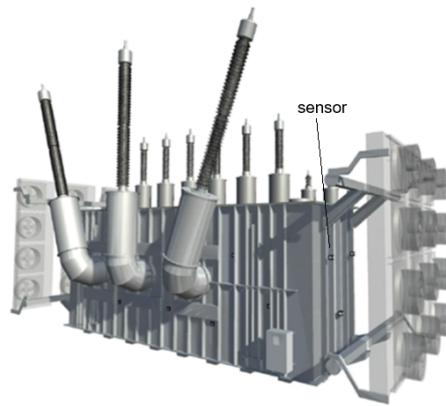
**Fonte:** Autoria Própria.

Figura 18 – Visualização do posicionamento dos sensores EA.

(a) Metodologia atual.



(b) Metodologia proposta.

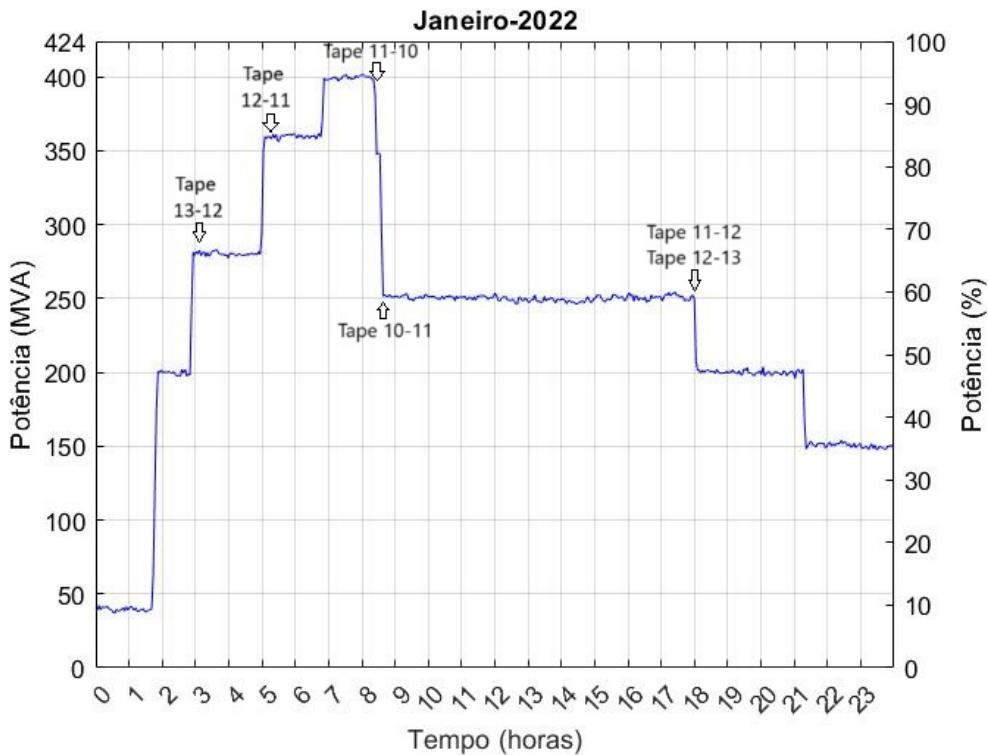


Fonte: Autoria Própria.

Para que o ensaio EA no transformador fosse eficaz, conforme a norma (IEEE STD C57.127-2018, 2019b), as medições abrangearam períodos representativos da operação do equipamento. Essa abordagem permite correlacionar a condição operacional do transformador com os padrões acústicos detectados, especialmente aqueles relacionados às DPs (KREUGER, 1989). A curva de carga, que representa graficamente a variação da potência elétrica ao longo do tempo (COTRIN, 2009), desempenha um papel importante nesse contexto. Ela possibilita o monitoramento das variações de carga, permitindo a identificação de períodos de maior ou menor demanda, que podem ser interpretados como estresses momentâneos. Isso oferece subsídios para uma análise da atividade acústica. Além disso, as comutações dos tapes de regulação de tensão têm um impacto significativo, pois não apenas atendem às mudanças na demanda, mas também geram transientes de tensão que podem criar campos elétricos não uniformes no isolamento. Essas condições favorecem a ocorrência de DPs, especialmente durante picos de carga, quando o estresse térmico e elétrico é mais intenso.

Na Figura 19, representa-se a curva de carga do transformador ao longo das 24 horas de monitoramento do ensaio EA. O eixo X indica os intervalos de tempo, enquanto o eixo Y representa a potência elétrica. Em destaque, os horários específicos em que ocorreram comutações de tapes, refletindo variações de tensão associadas às mudanças de carga. Como citado anteriormente, é importante conhecer no ensaio EA os eventos e momentos de mudança operacional, principalmente, quando são coincidentes, devido a esforço térmico e elétrico que a isolação do transformador fica submetidas. Portanto, pela Figura 19 destacam-se os momentos: entre a terceira e a quarta hora de medição, quando houve uma variação de carga de 200 para 280 MVA, juntamente com a comutação do tape 13 para o tape 12. O segundo momentos foi registrado entre as cinco e seis horas de medição, momento em que a potência do transformador se elevou para 360 MVA, enquanto

Figura 19 – Variação de Potência.



**Fonte:** Autoria Própria.

ocorreu a comutação do tape 12 para o tape 11. O terceiro e quarto momentos, foram razoavelmente considerados os de maior estresse térmico e elétrico, gerados entre a sétima e a nona hora de medição. Durante esse período, a potência do transformador atingiu aproximadamente sua capacidade nominal de potência (400 MVA), acompanhada por dois estágios quase sucessivos de comutações de tapes (11-10 e 10-11). Por fim, quando a potência do transformador foi reduzida para 200 MVA, ocorreram mais duas comutações sucessivas, totalizando os seis momentos relevantes onde houve as comutações de tapes nesse transformador sob ensaio. Cabe ressaltar que a redução do número do tape de regulação, indica que houve aumento da tensão de entrada. No entanto, o sistema de monitoramento não detectou fontes ativas de emissão nos dois últimos momentos não se mostraram significativos. Portanto, foram selecionados quatro momentos para a análise comparativa nesta dissertação, listados a seguir.

- Registro Hora 3: intervalo de medição entre a 2<sup>a</sup> e a 3<sup>a</sup> hora.
- Registro Hora 4: intervalo de medição entre a 3<sup>a</sup> e a 4<sup>a</sup> hora.
- Registro Hora 6: intervalo de medição entre a 5<sup>a</sup> e a 6<sup>a</sup> hora.
- Registro Hora 7: intervalo de medição entre a 6<sup>a</sup> e a 7<sup>a</sup> hora.

Na Tabela 4, resume-se as principais variáveis medidas nos intervalos selecionados para a análise comparativa realizada neste Capítulo.

Tabela 4 – Resumo dos dados de medição dos Registros 3h, 4h, 6h e 7h.

| Variável        | Registro Hora 3 | Registro Hora 4 | Registro Hora 6 | Registro Hora 7 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <i>Hits</i>     | 732.952         | 721.419         | 573.162         | 888.993         |
| <i>Events</i>   | 13.512          | 1.149           | 1.637           | 2.740           |
| <i>Clusters</i> | 14              | 07              | 02              | 10              |
| <i>Counts</i>   | 29.959.938      | 19.326.516      | 17.418.089      | 36.631.141      |
| <i>Energy</i>   | 6.668.945       | 6.305.550       | 6.205.067       | 47.659.909      |

**Fonte:** Autoria Própria.

De acordo com a Tabela 4, observa-se que no Registro Hora 7, teve o maior nível de atividade acústica (888.993 *hits*) dentre os registros selecionados, enquanto o Registro Hora 6 apresentou o menor (573.162 *hits*). Em relação aos *events*, o Registro Hora 3 destacou-se com a detecção de 13.512, indicando picos de atividade, em contraste com os apenas 1.149 *events* registrados na Hora 4, refletindo um estado mais estável do transformador. É importante correlacionar essa análise com as condições elétricas e térmicas às quais o transformador foi submetido durante esses intervalos de medição, conforme ilustrado na Figura 19. O Registro Hora 7 corresponde ao período em que o transformador operou em máxima potência elétrica, com mudanças nos tapes de regulação de tensão, conforme esperado. Por meio da análise dos *clusters*, ou agrupamentos de *events* com características similares, nota-se que o Registro Hora 3 também teve o maior número de fenômenos (14 *clusters*), indicando uma forte concentração de energia nesses pontos, enquanto o Registro Hora 6 apresentou apenas 2 *clusters*, sugerindo grande dispersão nas atividades acústicas. O Registro Hora 7, com 10 *clusters*, indica um aumento do estresse eletrodinâmico possivelmente relacionado à condição operacional do momento. Além disso, a variável *Counts*, que quantifica a intensidade da atividade acústica, apresentou seu maior nível no Registro Hora 7 (36.631.141), refletindo alta densidade de dados processados. A energia associada aos eventos monitorados também foi significativamente maior na Hora 7 (47.659.909), indicando picos de atividade intensa. Esses resultados ressaltam a complexidade das condições monitoradas ao longo do ensaio, evidenciando uma maior intensidade nas atividades registradas na Hora 7 e padrões mais estáveis na Hora 4. A formação de *clusters* na medição da Hora 3 sugere variações operacionais importantes que merecem investigação para correlacionar períodos críticos com fatores como carga elétrica, condições ambientais e possíveis origens mecânicas ou elétricas dos eventos. Essa análise dos dados de EA contribui para a compreensão gráfica dos resultados, que será explorada na próxima Seção.

## 5.2 ANÁLISE GRÁFICA DO ENSAIO EA

A validação da metodologia proposta nesta pesquisa foi conduzida por meio de uma avaliação comparativa do desempenho das duas metodologias gráficas para a visualização de resultados de sinais acústicos em transformadores. A primeira metodologia analisada corresponde àquela embarcada no *software AEwin™*, enquanto a segunda é a plataforma desenvolvida no ambiente RV. Os principais critérios considerados na análise comparativa foram:

- Clareza e precisão visual: Determina qual metodologia representa melhor os sinais acústicos, garantindo leitura e interpretação intuitiva dos dados.
- Facilidade de uso: Avalia a usabilidade das metodologias, incluindo exploração, tempo de aprendizado e acessibilidade das funcionalidades.
- Velocidade e desempenho: Compara o tempo de resposta na exibição e processamento dos sinais acústicos.
- Capacidade de análise: Examina a disponibilidade de ferramentas interativas para manipulação e interpretação dos dados.
- *Feedback* do usuário: Coleta a opinião de especialistas e operadores para identificar preferências e possíveis dificuldades de uso.

Em cada figura, os *events* aparecem como pontos vermelhos, enquanto os *clusters* são cubos com arestas vermelhas cintilantes. Na metodologia proposta, optou-se por apresentar apenas os *clusters*. As comparações foram realizadas sob diferentes perspectivas de visualização, por exemplo, lado de AT, o lado de BT, visão superior e tridimensional dos modelos.

### 5.2.1 Registro Hora 3 (12/01/2022 11:35:03 - 12/01/2022 12:35:03)

Neste registro, a potência elétrica do transformador aumentou de 200 MVA para 280 MVA, representando uma variação de carga de 45% para 67% da capacidade nominal. A Tabela 5 resume as coordenadas 3D dos *clusters* identificados de 'z' a 'm', dispostos em ordem decrescente de energia, para o registro de dados no instante "Hora 3". As coordenadas, expressas em milímetros (mm), correspondem à mediana calculada pelo algoritmo do *AEwin™*. A interpretação inicial desses dados facilita a visualização gráfica em 3D, auxiliando na identificação de padrões, como pontos de concentração, dispersão.

Nas Figuras 20(a), 20(c), 20(e) e 20(g), apresentam-se as visualizações geradas pelo *AEwin™*. Nessas representações, foram mapeados 13.512 *events* EA com agrupamentos de 14 *clusters*, conforme mostrado na Tabela 4 e na visualização tridimensional da Figura 20(g). Das Figuras 20(a), 20(c) e 20(e), percebe-se que a parte do transformador com maior atividade acústica está concentrada em um determinada região. No entanto, essa análise revela uma limitação significativa: a ausência da representação o detalhamento interno

do transformador e dos *clusters*. Isso dificulta a interpretação dos dados e a localização precisa das regiões críticas, aumentando a dependência de documentos técnicos e interpretação especializada. Ainda na visualização tridimensional (Figura 20(g)), a interpretação carece de um maior esforço, pois o detalhamento interno do transformador é pobre para uma correlação precisa entre as coordenadas dos *clusters* e os componentes internos. Tal fato pode dificultar a identificação das possíveis fontes de defeitos, especialmente DPs e comprometer a eficácia do diagnóstico. Além disso, a falta de precisão pode levar a erros na orientação da equipe de manutenção, aumentando o tempo de análise.

Nas Figuras 20(b), 20(d), 20(f) e 20(h), apresentam-se os resultados da metodologia em RV, proposta nesta dissertação, para o mesmo registro. Das imagens, observa-se um ambiente visual rico em detalhes, como sensores, componentes internos e contorno do transformador de uma forma mais realística. Com esse nível de detalhamento da metodologia gráfica proposta, torna-se mais fácil identificar com precisão as áreas afetadas por sinais acústicos e os componentes estruturais do transformador. Algo que a metodologia atual (o AEwin<sup>TM</sup>) não representa com tal riqueza de detalhes. Outro diferencial dessa *interface* é contar com recursos característicos de uma aplicação RV, por exemplo, a imersão, interação e envolvimento com os componentes e a exploração das áreas afetadas. Por exemplo, as Figuras 20(b), 20(d), 20(f) e 20(h) são capturas de momentos da medição, ou seja, estáticas, mas, como dito, a metodologia oferece recursos avançados, como manipulação de elementos gráficos, controle de foco, segmentação de partes e exploração de *clusters* que possam ficar ocultos. Do exposto, a metodologia em RV mostrou superar as limitações gráficas do AEwin<sup>TM</sup>, ao permitir uma visualização mais precisa da localização de defeitos.

Tabela 5 – Coordenadas dos *clusters* para o Registro Hora 3.

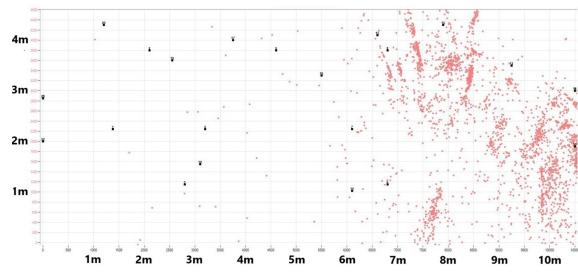
| Cluster | Eixo X (mm) | Eixo Y (mm) | Eixo Z (mm) |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| z       | 8.534       | 3.738       | 2.893       |
| y       | 10.040      | 2.745       | 218         |
| x       | 10.099      | 2.770       | 300         |
| w       | 7.416       | 3.726       | 2.904       |
| v       | 10.499      | 1.989       | 1.495       |
| u       | 10.298      | 2.300       | 1.498       |
| t       | 7.393       | 3.820       | 2.842       |
| s       | 7.108       | 4.208       | 1.785       |
| r       | 8.510       | 4.413       | 1.025       |
| q       | 7.719       | 589         | 390         |
| p       | 8.434       | 3.171       | 2.439       |
| o       | 8.125       | 3.635       | 1.810       |
| n       | 10.495      | 2.116       | 1.077       |
| m       | 8.428       | 3.240       | 2.262       |

**Fonte:** Autoria Própria.

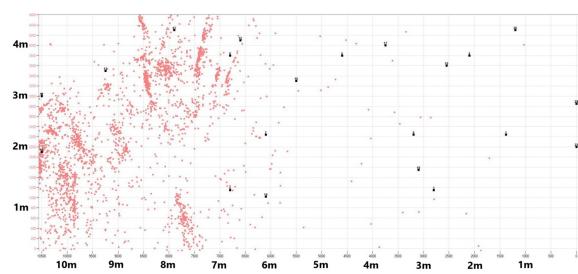
Figura 20 – Registro Hora 3.

Metodologia AEwin<sup>TM</sup>

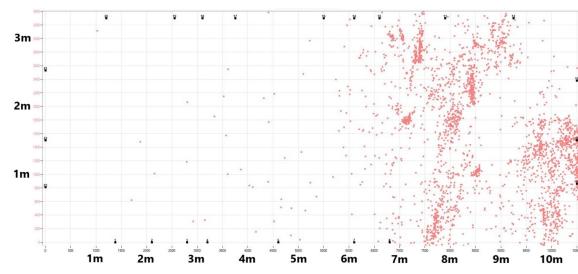
(a) Vista Frontal - Plano XY.



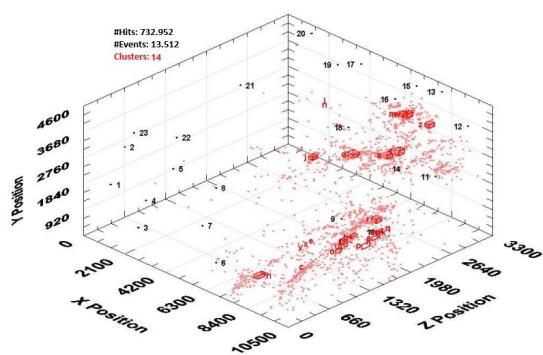
(c) Vista Posterior - Plano XY.



(e) Vista Superior - Plano XZ.

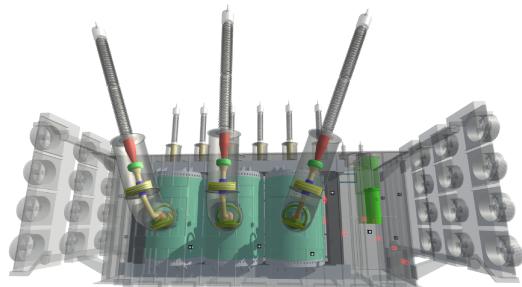


(g) Vista Tridimensional.

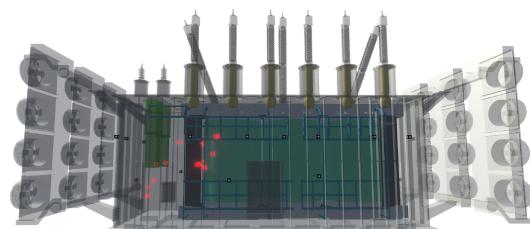


Metodologia Proposta

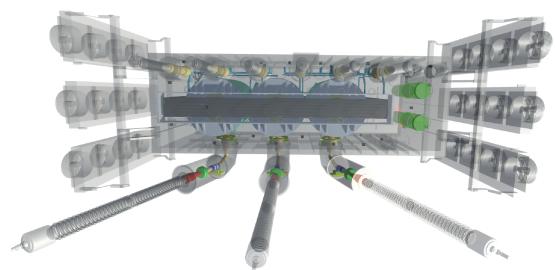
(b) Vista do Lado da Alta Tensão.



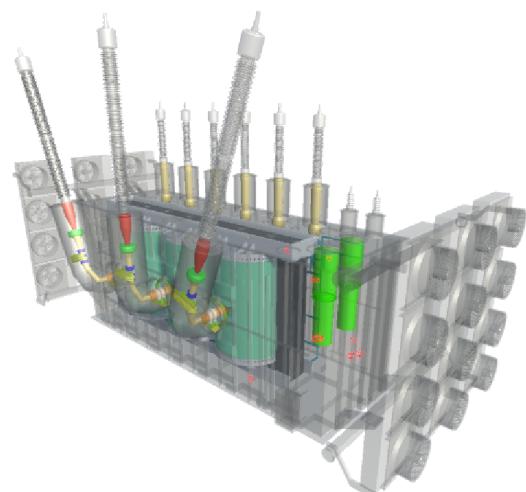
(d) Vista do Lado da Baixa Tensão.



(f) Vista do Topo.



(h) Vista Tridimensional.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.2 Registro Hora 4 (12/01/2022 12:35:03 - 12/01/2022 13:35:03)

Na Figura 21, são apresentadas as visualizações das atividades acústicas nas metodologias do *software AEwin™* e na metodologia proposta para o Registro Hora 4. De forma análoga ao Registro Hora 3, a Figura 19 foi consultada para compreender o contexto operacional durante esse intervalo de medição. Observou-se que no Registro Hora 4, o transformador manteve-se em 67% da capacidade nominal de potência elétrica, sem variações de carga significativas, resultando em uma operação mais estável. A seguir é apresentada a comparação entre as duas metodologias.

Nas Figuras 21(a), 21(c), 21(e) e 21(g), mostram-se as visualizações na metodologia do *AEwin™*, com três perspectivas bidimensionais e uma tridimensional. Os *events* de EA estão representados por pontos vermelhos, enquanto os *clusters* estão destacados por cubos com arestas em vermelho cintilante. Neste registro, foram identificados 1.149 *events* e 7 *clusters*, conforme mostrado na Tabela 4 e na visualização tridimensional da Figura 21(g). As coordenadas dos *clusters* na Tabela 6. Os valores das coordenadas em milímetros (mm), representam a mediana calculada da posição espacial do *clusters* gerados pelo algoritmo do *software AEwin™*. Das Figuras, nota-se que os *events* e *clusters* permanecem concentrados na mesma área, embora em menor densidade. A visualização pelo *software AEwin™* apresenta limitações na localização precisa dos *clusters*, especialmente em cenários com menor densidade de *events*.

Por outro lado, os resultados para metodologia proposta com RV, conforme ilustrados nas Figuras 21(b), 21(d), 21(f) e 21(h), amplia significativamente a capacidade de análise. Com a RV, obtém-se uma exploração das áreas internas do transformador, oferecendo uma vantagem importante sobre a metodologia atual. A visualização 3D facilita a navegação pelo interior do equipamento, como também permite que os especialistas observem as interações entre os componentes e os *clusters* de forma mais intuitiva. Com os novos recursos de visualização, é possível ajustar a transparência dos elementos, ampliar áreas de interesse e segmentar componentes específicos, o que torna a análise mais intuitiva e detalhada.

Tabela 6 – Coordenadas dos *clusters* gerados no Registro Hora 4.

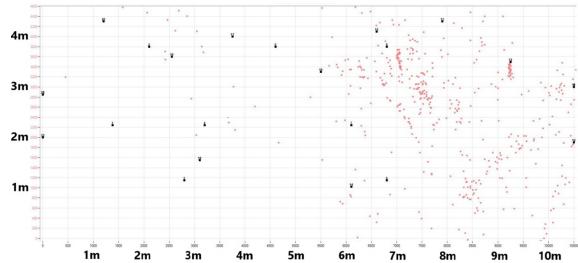
| Cluster | Eixo X (mm) | Eixo Y (mm) | Eixo Z (mm) |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| z       | 9.234       | 3.414       | 3.367       |
| y       | 7.037       | 3.676       | 3.078       |
| x       | 7.029       | 3.564       | 2.984       |
| w       | 9.243       | 3.307       | 3.437       |
| v       | 7.514       | 2.883       | 2.163       |
| u       | 6.344       | 3.190       | 3.264       |
| t       | 6.295       | 3.371       | 3.033       |

**Fonte:** Autoria Própria.

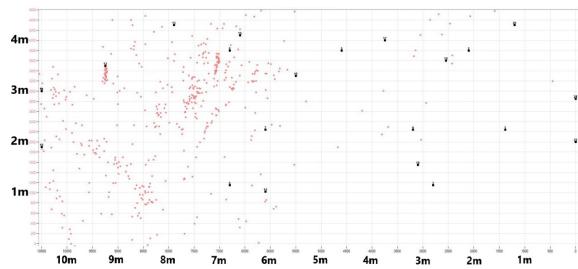
Figura 21 – Registro Hora 4.

Metodologia AEwin™

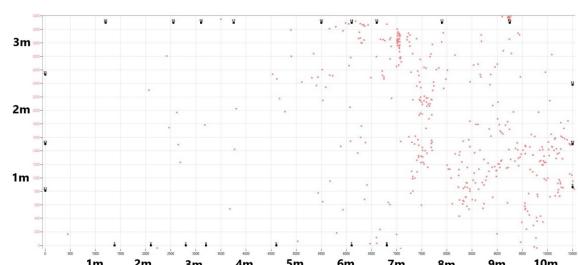
(a) Vista Frontal - Plano XY.



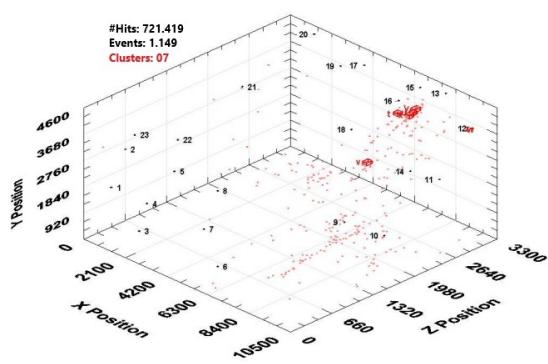
(c) Vista Posterior - Plano XY.



(e) Vista Superior - Plano XZ.

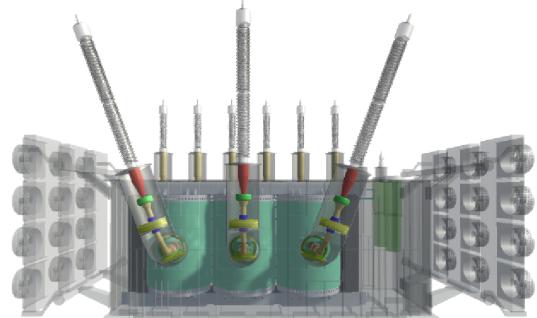


(g) Vista Tridimensional.

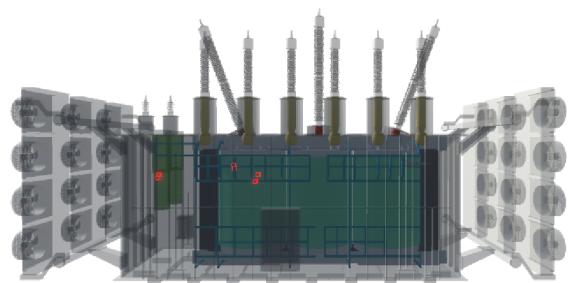


Interface Proposta

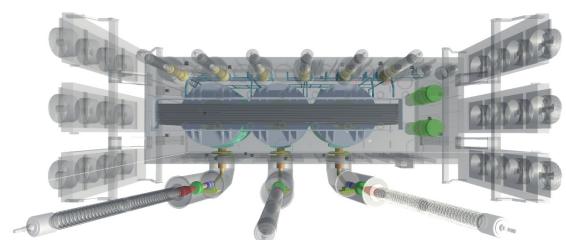
(b) Vista Lado Alta Tensão.



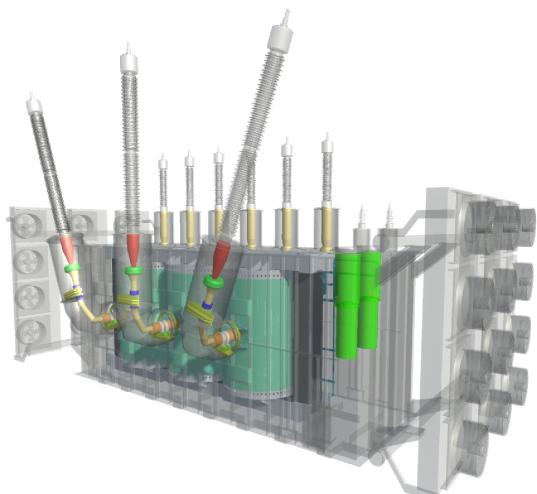
(d) Vista Lado Baixa Tensão.



(f) Vista Topo.



(h) Vista Tridimensional.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.3 Registro Hora 6 (12/01/2022 14:35:03 - 12/01/2022 15:35:03)

Na Figura 23, são apresentadas as visualizações das atividades acústicas na metodologia gráfica do *software* AEwin™ e na metodologia proposta para o Registro Hora 6. Inicialmente, a Figura 19 foi consultada para compreender o contexto operacional durante esse intervalo de medição. Observou-se um aumento na potência elétrica do transformador de 280 MVA para 360 MVA, representando uma variação de carga de 67% para 85% da capacidade nominal de potência do transformador. Além disso, notou-se que houve mudança dos tapes do 12 para o 11. A seguir, as duas metodologias são comparadas.

Nas perceptivas bidimensionais geradas no *software* AEwin™, ou seja, as Figuras 23(a), 23(c), 23(e) e 23(g), é possível notar uma concentração de *events* e *clusters* em uma determinada região. Porém, como já comentado, a análise nessa metodologia é complexa devido a forma de representação do *software*, o qual apresenta um baixo nível de detalhamento, dificultando associar a fonte do defeito com o componente interno do transformador. Portanto, o recurso de localização das DPs ainda pode necessitar de uma avaliação do *layout* interno dos componentes do transformador. Sendo assim, essa metodologia se mostra insuficiente para uma localização rápida das DPs por meio da visualização.

Por outro lado, nas Figuras 23(b), 23(d), 23(f) e 23(h), apresentam-se as visualizações da metodologia proposta, que traz o recurso de um ambiente RV. Por meio dessa metodologia, pode-se identificar com clareza qual componente do transformador é a fonte principal de atividade acústica. Nota-se especificamente nas Figuras 23(f) (Vista Topo) e 23(h) (Vista 3D) que as coordenadas dos *clusters* y e z se sobrepõem exatamente na posição onde se localiza uma comutadora. Portanto, ao usar o recurso gráfico da metodologia proposta, pode-se, facilmente, identificar o componente interno do transformador possivelmente afetado pelas DPs. Na Figura 22(a), mostra-se um detalhamento do componente interno do transformador em diferentes ângulos como se o usuário estivesse dentro do transformador. Por fim, na Figura 22(b), ilustra-se como uma área pode ser explorada, como o uso de recursos de ampliação e reposicionamento de visadas.

Isso demonstra que a ampliação de áreas afetadas por DPs em transformadores está alinhada com ferramentas como *Unity3D* e outras de RV. Essas tecnologias permitem detalhar e contextualizar dados em ambientes visuais imersivos, facilitando a identificação de

Tabela 7 – Coordenadas dos *clusters* gerados no Registro Hora 6.

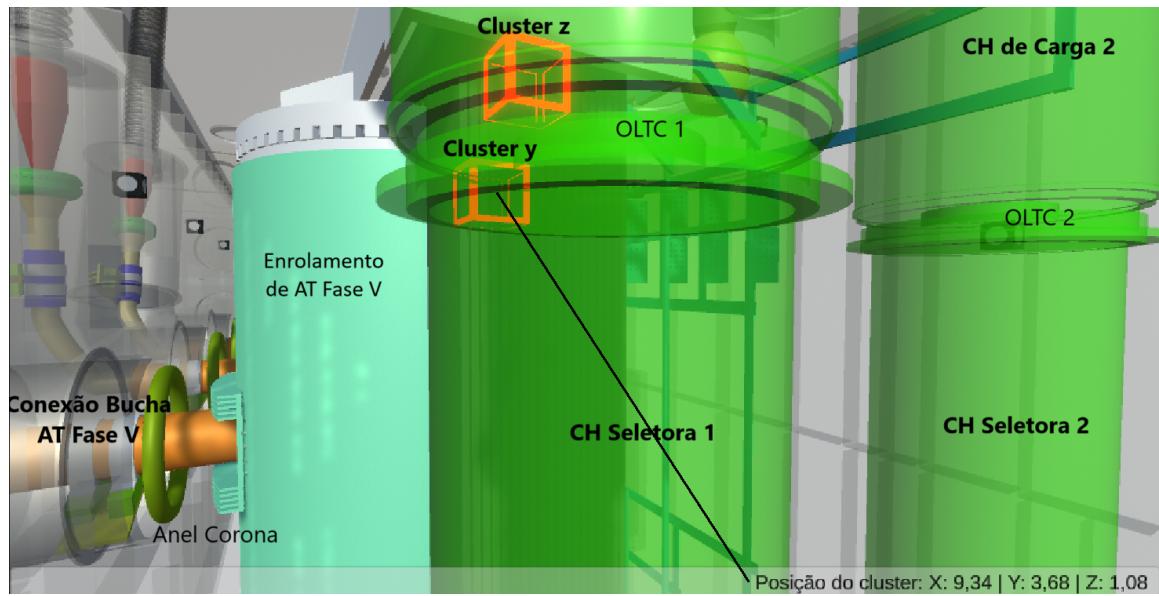
| Cluster | Eixo X (mm) | Eixo Y (mm) | Eixo Z (mm) |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| z       | 9.212       | 3.483       | 1.051       |
| y       | 9.340       | 3.679       | 1.077       |

**Fonte:** Autoria Própria.

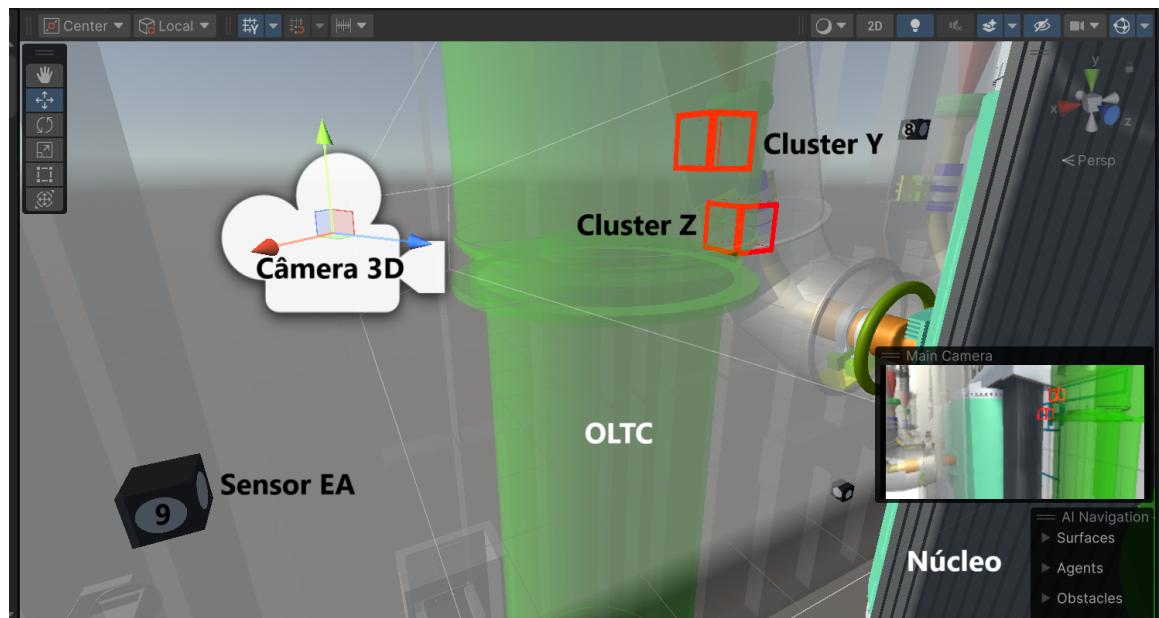
pontos de interesse com maior precisão, como ilustrado na Figura 22. A metodologia desenvolvida possibilita simular e visualizar a estrutura interna do transformador, conectando dados de EA diretamente aos componentes. Isso pode superar as limitações de *softwares* com recursos gráficos simples, oferecendo representações mais próximas da realidade física do equipamento. Com isso, recursos como interação direta e ampliação de áreas de análise contribuem para diagnósticos mais precisos. Essa abordagem também reduz a necessidade de consultas ao projeto interno e pode aumentar a eficiência na localização de fontes de DP com menor esforço analítico.

Figura 22 – Recursos de Interação da Visualização 3D com Uso da RV.

(a) Exportar as coordenadas dos *clusters*.



(b) Explorar áreas afetadas por *clusters*.

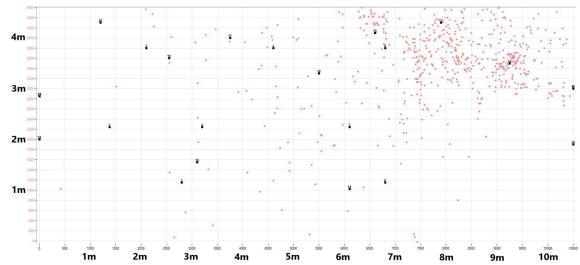


Fonte: Autoria Própria.

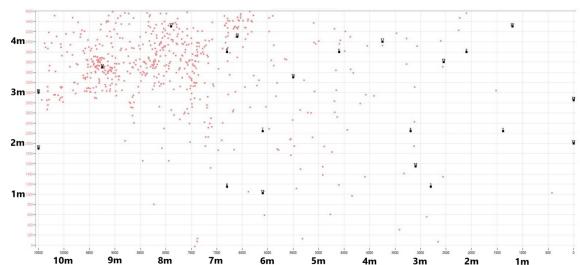
Figura 23 – Registro Hora 6.

Metodologia AEwin™

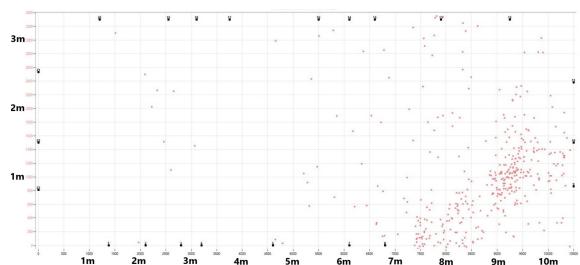
(a) Vista Frontal - Plano XY.



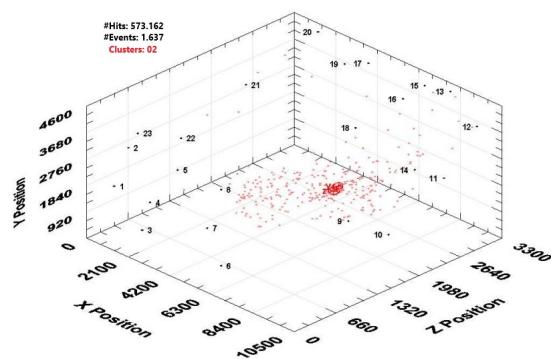
(c) Vista Posterior - Plano XY.



(e) Vista Superior - Plano XZ.

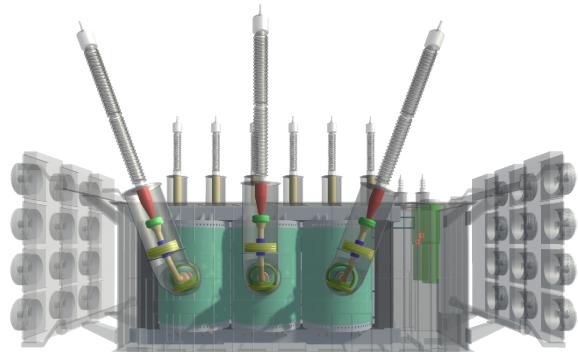


(g) Vista Tridimensional.

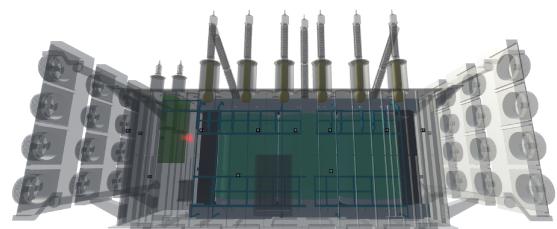


Metodologia Proposta

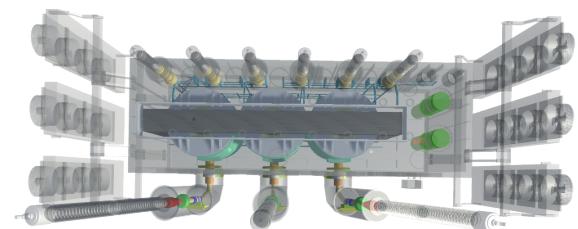
(b) Vista Lado Alta Tensão.



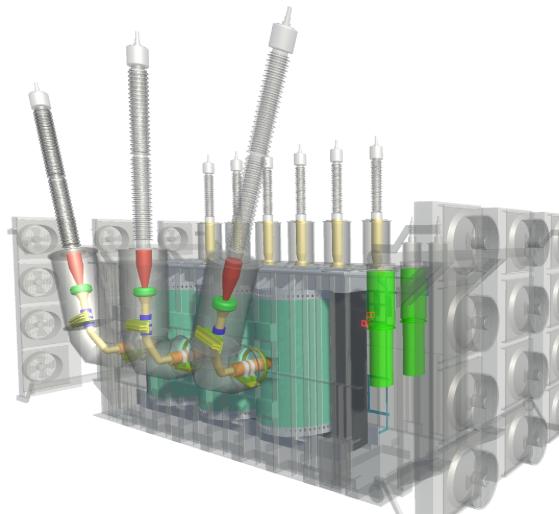
(d) Vista Lado Baixa Tensão.



(f) Vista Topo.



(h) Vista Tridimensional.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.4 Registro Hora 7 (12/01/2022 15:35:03 - 12/01/2022 16:35:03)

No Registro Hora 7, o transformador operava próximo a 95% de sua capacidade nominal (400 MVA), conforme ilustrado na Figura 19. A comparação deste registro com os anteriores revela que o aumento da carga intensificou a atividade acústica associada às DPs, conforme classificação feita nos padrões de sinais detectados. A Tabela 4 indica que, neste registro, o sistema EA contabilizou 55% da energia acústica total registrada nas 24 horas de monitoramento. Essa intensidade resultou na detecção de 2.740 *events*, com a formação de 10 *clusters*, cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 8.

Nas Figuras 24(a), 24(c), 24(e) e 24(g), apresentam-se as visualizações obtidas pela metodologia atual. Observa-se que o AEwin<sup>TM</sup> não oferece, de forma intuitiva, uma diferenciação clara da localização dos *clusters* em relação às partes internas do transformador. Essa limitação na riqueza de detalhes dificulta a correlação direta entre os dados de EA e os componentes físicos do equipamento, o que pode requerer uma análise mais aprofundada e esforços adicionais dos executores. A interpretação dos resultados, nesse contexto, enseja consultas às *datasheets* ou até fabricantes. Embora a *interface* gráfica do AEwin<sup>TM</sup> forneça as coordenadas de localização dos *events* e *clusters*, a ausência de uma visualização mais contextualizada espacialmente dificulta um diagnóstico facilitado.

Em contraste, a visualização em RV, metodologia proposta, apresentada nas Figuras 24(b), 24(d), 24(f) e 24(h), permite identificar as áreas afetadas com mais clareza, mesmo sem um conhecimento aprofundado do projeto do transformador. O modelo detalhado em RV facilita o diagnóstico, apontando com maior precisão os componentes que são fontes potenciais de atividades acústicas, além de fornecer parâmetros adicionais que melhoram a exatidão na localização das DP com menos esforço. Em resumo, a metodologia proposta supera os métodos de visualização tradicionais, aprimorando a capacidade de identificar e analisar as fontes de DPs mesmo em cenários complexos.

Tabela 8 – Coordenadas dos *clusters* gerados no Registro Hora 7.

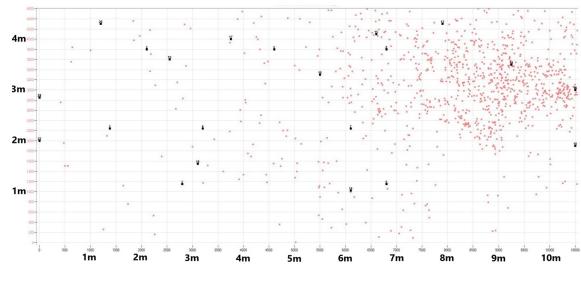
| Cluster | Eixo X (mm) | Eixo Y (mm) | Eixo Z (mm) |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| z       | 10.323      | 3.047       | 1.249       |
| y       | 10.227      | 2.953       | 1.200       |
| x       | 10.093      | 2.906       | 1.189       |
| w       | 10.386      | 2.842       | 1.296       |
| v       | 10.082      | 3.317       | 1.321       |
| u       | 6.660       | 2.574       | 2.861       |
| t       | 10.103      | 2.847       | 1.020       |
| s       | 10.076      | 2.265       | 1.231       |
| r       | 10.042      | 2.217       | 1.039       |
| q       | 10.329      | 2.915       | 1.281       |

**Fonte:** Autoria Própria.

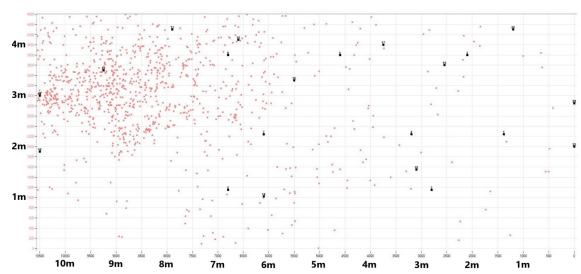
Figura 24 – Registro Hora 7.

Metodologia AEwin<sup>TM</sup>

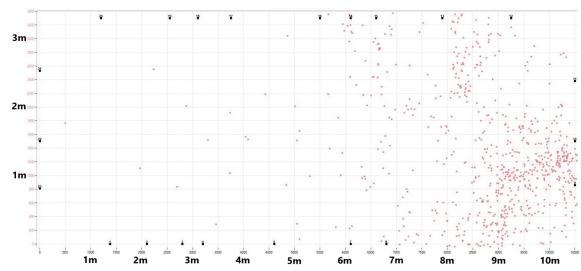
(a) Vista Frontal - Plano XY.



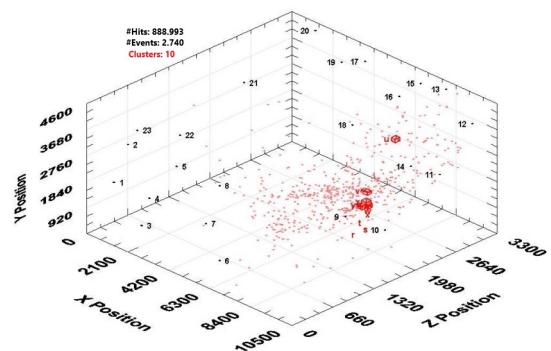
(c) Vista Posterior - Plano XY.



(e) Vista Superior - Plano XZ.

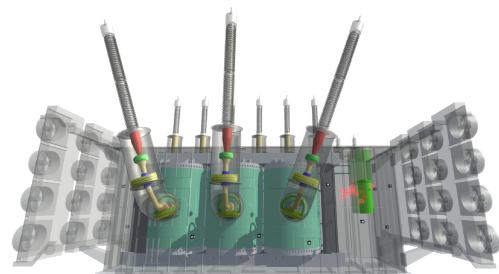


(g) Vista Tridimensional.

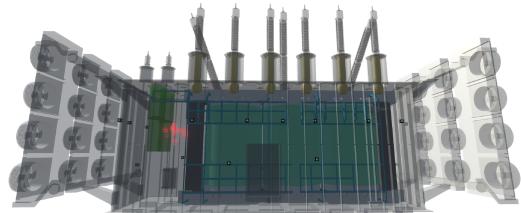


Metodologia Proposta

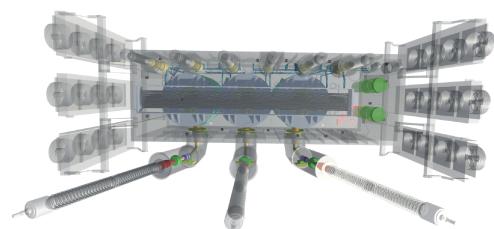
(b) Vista Lado Alta Tensão.



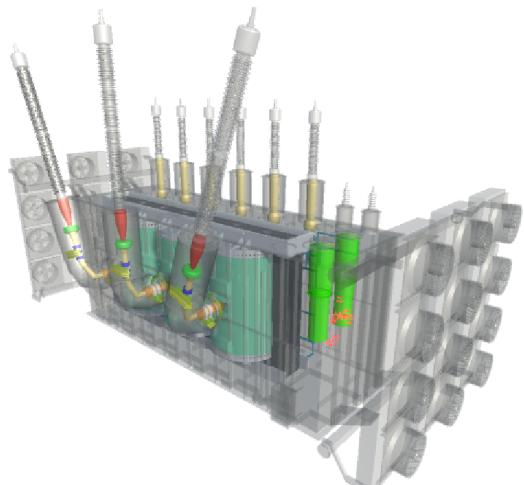
(d) Vista Lado Baixa Tensão.



(f) Vista Topo.



(h) Vista Tridimensional.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.2.5 Registro Total 24h (12/01/2022 09:35:03 - 13/01/2022 09:35:03)

Na Figura 25, apresentam-se os resultados para o registro total de 24h de monitoramento considerando a metodologia atual (*software AEwin™*) e a metodologia proposta. Durante o monitoramento, foram detectados 23.917 *events* e identificados 26 *clusters*.

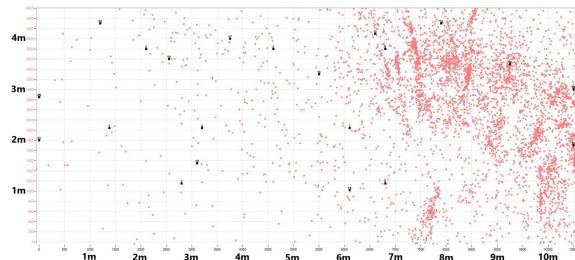
Nas Figuras 25(a), 25(c), 25(e) e 25(g), apresentam-se as visualizações utilizando o *AEwin™*. Dos resultados, nota-se que na visualização bidimensional do *AEwin™* não há representação dos *clusters*, como pode ser observado nas Figuras 25(a), 25(c) e 25(e). Portanto, tal ausência de representação dificulta a interpretação do analista para a identificação do ponto em que ocorreu a possível DP. Já na visualização tridimensional (Figura 25(g)), há representação dos *clusters*. No entanto, apesar representar os *clusters*, esse recurso de visualização do *AEwin™* apresenta limitações importantes. Dentre elas, destaca-se o pouco detalhamento interno, dificultando a identificação precisa das fontes de DPs a nível de componente. Tal pobreza de detalhamento, pode tornar necessário consultas ao projeto construtivo do transformador e de uma interpretação especializada, o que aumenta a complexidade e o tempo de análise. Portanto, tais complexidades podem não retornar uma informação da localização de forma precisa para a manutenção do equipamento, podendo até mesmo gerar erros de direcionamento do devido local da DP para a equipe de reparo. Diante do exposto, essas limitações reforçam a importância de uma solução mais rica em recursos visuais.

Em contrapartida, nas Figuras 25(b), 25(d), 25(f) e 25(h), ilustram-se os resultados para esse mesmo registro, mas utilizando a metodologia proposta que utiliza recursos de RV. Analogamente, foram destacadas três perspectivas bidimensionais (Figuras 25(b), 25(d) e 25(f)) e uma tridimensional (Figura 25(h)). Os *events* de EA não estão representados, apenas os *clusters*. Dos resultados, observa-se que mesmo nas representações laterais (Figuras 25(b), 25(d) e 25(f)), foi possível visualizar a localização dos *clusters* e do possível componente afetado. Ao analisar a representação da Figura 20(h), nota-se que a localização dos *clusters* são visualizadas de forma consideravelmente fácil, podendo até mesmo identificar qual componente está suspeito como fonte de geração do defeito. Essas vantagens da metodologia proposta se deve de um ambiente imersivo, onde o transformador é representado de maneira realista e detalhada. Com o maior grau de detalhamento dos componentes, a metodologia em RV permite que o analista identifique com precisão a posição dos sinais de EA em relação aos componentes internos, reduzindo a necessidade de referências adicionais e permitindo uma análise mais intuitiva e eficaz.

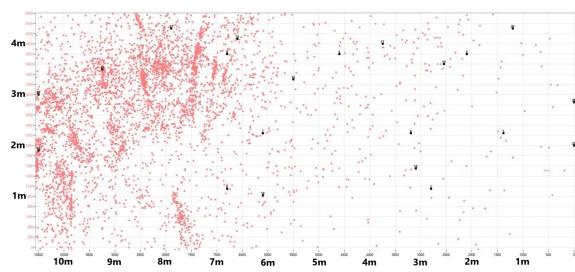
Figura 25 – Registro Acumulado 24h.

Metodologia AEwin<sup>TM</sup>

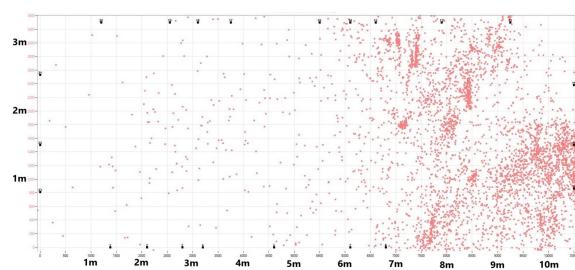
(a) Vista Frontal - Plano XY.



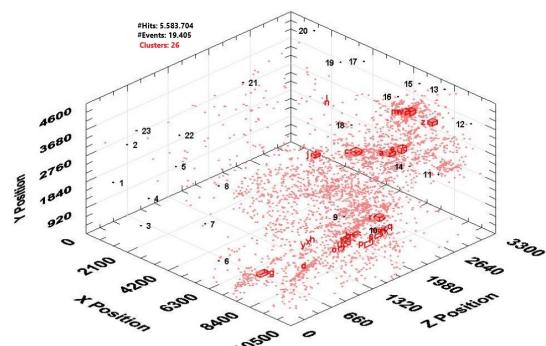
(c) Vista Posterior - Plano XY.



(e) Vista Superior - Plano XZ.

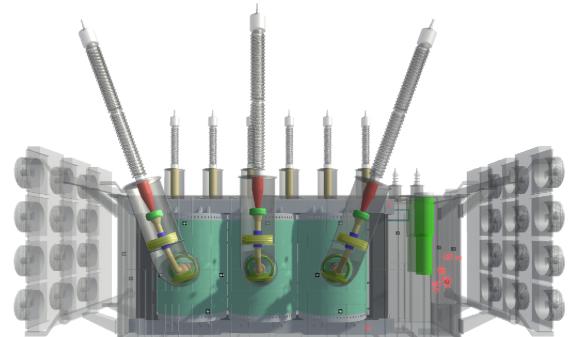


(g) Vista Tridimensional.

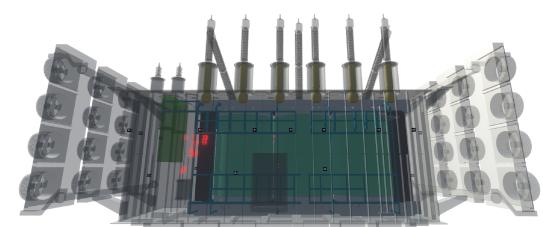


Metodologia Proposta

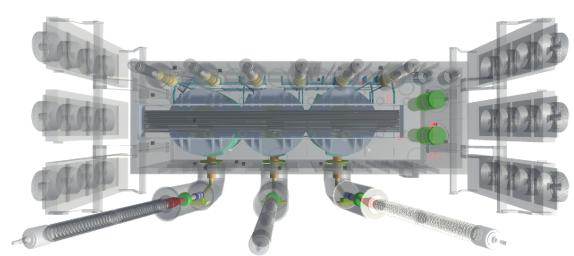
(b) Vista Lado Alta Tensão.



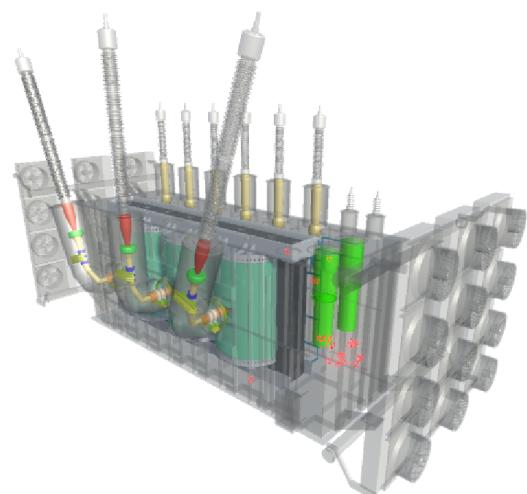
(d) Vista Lado Baixa Tensão.



(f) Vista Topo.



(h) Vista Tridimensional.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresenta-se uma análise comparativa entre duas metodologias gráficas, considerando quatro registros de medição de EA, totalizando 24 horas acumuladas. Para uma observação mais detalhada, todos os mapas acústicos gerados a cada hora ao longo do período de monitoramento estão disponíveis no APÊNDICE C. Observou-se que a metodologia proposta apresentou vantagens significativas em relação ao recurso de visualização disponível na versão atual do software AEwin™. Embora o *software* atual forneça uma visualização gráfica, ele carece de detalhes sobre o *layout* interno do transformador, o que torna a interpretação das imagens mais complexa. A visão geométrica do mapa acústico do AEwin™ não é intuitiva, dificultando a conexão entre os *clusters* e os componentes críticos do transformador. Essa falta de clareza aumenta a dependência de consultas a manuais e projetos técnicos, sem garantir a precisão na identificação de defeitos. Essas limitações ressaltam a necessidade de uma abordagem mais rica em recursos visuais.

Por outro lado, a solução gráfica em RV demonstrou ser mais atrativa por oferecer atributos de imersão, visualização detalhada em 3D, intuitividade na exploração e integração de dados complexos de forma mais comprehensível. A sobreposição precisa das coordenadas dos *clusters* com os componentes internos do transformador melhorou significativamente a análise dos mapas acústicos em todas as perspectivas comparadas. Além disso, embora não tenha sido demonstrada nesta pesquisa, a metodologia proposta permite a geração de simulações, o que é extremamente útil para treinamentos e planejamentos do próprio ensaio.

Na Tabela 9, apresenta-se um resumo das características qualitativas das *interfaces* de visualização de EA comparadas nesta dissertação. Enquanto o *software* atual apresenta desafios na visualização e interpretação dos mapas acústicos, a proposta de uma *interface* em RV representa uma oportunidade significativa para aprimorar as práticas de monitoramento e manutenção do transformador. A capacidade de visualizar detalhadamente

Tabela 9 – Comparaçao entre as Metodologias de Visualização de DPs.

| Características  | Metodologia Atual | Metodologia Proposta |
|------------------|-------------------|----------------------|
| Visualização     | Básica            | Detalhada            |
| Interação        | Média             | Alta                 |
| Nível de detalhe | Baixa             | Alta                 |
| Imersão          | Baixa             | Média                |
| Aplicações       | Generalista       | Ampla                |

**Fonte:** Autoria Própria.

as DPs em relação aos componentes internos não apenas facilita a análise, mas também aumenta a eficiência na identificação e resolução de problemas.

Adicionalmente, a metodologia proposta não só melhora o diagnóstico da localização das DPs, mas também enseja um aumento na produtividade nas fases de preparação e execução do ensaio. Com recursos gráficos avançados que representam fielmente o modelo do transformador e integram os dados obtidos pelo AEwin™, os especialistas podem tomar decisões mais assertivas com base em informações claras e precisas. Isso reduz a necessidade de consultas frequentes às *datasheets* e contatos com fabricantes para esclarecimentos sobre o equipamento, permitindo que os profissionais se concentrem mais na análise crítica e na resolução efetiva dos problemas identificados. Em outras palavras, a metodologia proposta não apenas supera as limitações do AEwin™, mas também transforma o processo de diagnóstico em um procedimento mais eficiente e eficaz.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação de mestrado, propõe-se uma inovadora metodologia baseada em realidade virtual (RV) associada à técnica de emissão acústica (EA) para a visualização de descargas parciais (DPs) em transformadores de potência. Cinco casos práticos de medições reais de EA em um transformador localizado na subestação conversora do sistema HVDC Rio Madeira foram considerados para a avaliação da solução proposta. A análise realizada consiste na comparação entre os recursos visuais fornecidos pela *interface* do *software* AEwin™, o qual foi considerado como a solução atual, e aqueles oferecidos pela solução proposta, a qual integra funcionalidades de RV. De acordo com os resultados, a *interface* proposta melhora significativamente a precisão dos diagnósticos e proporciona uma compreensão mais detalhada da estrutura interna do transformador. A integração dos dados de EA no ambiente de RV enriqueceu a aplicação da técnica de EA, tornando-a ainda mais próxima das condições reais de operação, isto é, da forma como o transformador é na prática (vida real). Essa inovação, ao ser incorporada às práticas atuais de uma empresa de energia elétrica, pode aumentar a eficiência na identificação de componentes defeituosos, facilitando o planejamento de reparos. Um dos principais avanços da solução proposta é a ampliação das capacidades de visualização dos defeitos internos do transformador, isto é, a melhor identificação da parte interna do transformador afetada pela DP, evidenciando o impacto direto da proposta na prática. Essas melhorias são particularmente relevantes para o setor elétrico, onde o aumento da produtividade e a segurança dos trabalhadores são prioridades. A combinação dessas tecnologias tem o potencial de transformar processos industriais, tornando-os mais eficientes, seguros e inovadores.

Como continuidade deste trabalho, propõem-se o aprimoramento da solução proposta por meio do desenvolvimento de uma *interface* completamente integrada, com melhorias nos modelos e maior detalhamento das cenas. Além disso, o uso de dispositivos imersivos, como *Head-Mounted Displays*, pode ser explorado para oferecer assistência remota em tempo real durante a preparação e execução dos ensaios. Essa abordagem ampliaria a aplicabilidade da solução, permitindo a inclusão de uma maior variedade de casos e possibilitando a modelagem de outros equipamentos no ambiente de RV. Com os aprimoramentos necessários, a solução também poderia ser adaptada para aplicações preditivas que utilizem visualizações na RV como suporte ao diagnóstico avançado. Outra direção promissora de pesquisa envolve a aplicação de dados e imagens de EA, combinados com coordenadas espaciais conhecidas, na área da robótica e, por fim, a georreferenciação dos pontos de falha identificados nos ensaios de EA, o que permitiria uma integração com robôs de inspeção, otimizando estratégias de mapeamento e trajetórias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. OLIVIERI, M M de; MANNHEIMER, W A; RIPPER-NETO, A P. On the use of acoustic signals for detection and location of partial discharges in power transformers. *In: CONFERENCE Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (Cat. No.00CH37075). [S.l.: s.n.], abr. 2000. P. 259–262. doi: [10.1109/ELINSL.2000.845502](https://doi.org/10.1109/ELINSL.2000.845502).

AMÉRICO, Jonas Policarpo; CABRAL, Sérgio Henrique Lopes; STEFENON, Stéfano Frizzo; SALVADOR, Marcos Antônio; OLIBONI, Carlos Roberto Pereira; MADRUGA, Gabriel Granzotto. Um Estudo Qualitativo das Técnicas Utilizadas para Medição e Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência. **A Qualitative Study of the Techniques Used to Measure and Locate Partial Discharge in Power Transformers**, 2017.

ANATOLE LÉCUYER JEAN-MARIE BURKHARDT, Ludovic Etienne. Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: The Perception of Pseudo-Haptic Textures. **ACM Transactions on Applied Perception**, ACM, v. 5, n. 3, p. 1–24, 2008.

ANDERS, G. J.; VACCARO, A. **Innovations in Power Systems Reliability**. 1. ed. United States of America: Springer, 2011. P. 14–15.

AZUMA, Ronald T. A Survey of Augmented Reality. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, MIT Press, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997.

BARTNIKAS, R.; MCMAHON, Eugene Joseph. **Engineering Dielectrics: Volume I: Corona Measurement and Interpretation**. Philadelphia, PA: ASTM International, 1984. ISBN 9780803103320. doi: <https://doi.org/10.1520/STP669-EB>.

BASU, Aryabratna. A brief chronology of Virtual Reality, 2019. doi: [10.48550/arXiv.1911.09605](https://arxiv.org/abs/1911.09605). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337438550>.

BEURA, Chandra Prakash; BELTLE, Michael; TENBOHLEN, Stefan. Localization of partial discharge sources in power transformers using neural networks. *In: 23RD International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023)*. [S.l.: s.n.], 2023. v. 2023, p. 1138–1143. doi: [10.1049/icp.2024.0775](https://doi.org/10.1049/icp.2024.0775).

BUETTNER, R.; BREITENBACH, J.; WANNENWETSCH, K.; OSTERMANN, I.; PRIEL. A Systematic Literature Review of Virtual and Augmented Reality Applications

for Maintenance in Manufacturing. *In: 2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*. [S.l.]: IEEE, 2022. P. 545–552. doi: [10.1109/COMPSAC54236.2022.00099](https://doi.org/10.1109/COMPSAC54236.2022.00099).

COTRIN, Joao. **Análise de Curvas de Carga em Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo, Brasil: Editora Técnica de Energia, 2009. Edição revisada.

CYRINO, Gabriel F.; JR, Camilo L. Barreto; MATTIOLI, Leandro R.; CARDOSO, Alexandre; JR, Edgard A. Lamounier; LIMA, Gerson F. M.; RAMOS, Daniel S. An Intuitive VR-based Environment for Monitoring and Control of Electrical Power Substations. **The 5th International Conference on Emerging Data and Industry 4.0 (EDI40)**, Elsevier, Porto, Portugal, p. 606–613, mar. 2022. ISSN 1877-0509. doi: [10.1016/j.procs.2022.03.071](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.071).

DROUILLARD, T. F. **Introduction to Acoustic Emission Technology**. [S.l.: s.n.], 1987. v. 5.

FILHO, Geraldo Lupi; CARNEIRO, João Carlos. Método de Emissão Acústica na Medição de Descargas Parciais em Transformadores de Potência: Uma Ferramenta de Mitigação. *In: CPFL ENERGIA. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)*. Olinda, Pernambuco, Brasil: [s.n.], out. 2008. P. 1–12.

FILIPPIN, Carlo Giuseppe *et al.* **Emissão acústica: conceitos e aplicações**. [S.l.]: Institutos Lactec ; UEG, 2017. P. 1–128.

HARROLD, R T. Acoustical Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, EI-20, p. 3–19, 1 fev. 1985. ISSN 1557-962X. doi: [10.1109/TEI.1985.348751](https://doi.org/10.1109/TEI.1985.348751).

HEKMATI, Arsalan. Proposed method of partial discharge allocation with acoustic emission sensors within power transformers. **Applied Acoustics**, Elsevier Ltd, v. 100, p. 26–33, dez. 2015. ISSN 1872910X. doi: [10.1016/j.apacoust.2015.07.011](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.07.011).

HUSSAIN, Md Rashid; REFAAT, Shady S; ABU-RUB, Haitham. Overview and Partial Discharge Analysis of Power Transformers: A Literature Review. **IEEE Access**, v. 9, p. 64587–64605, out. 2021. ISSN 2169-3536. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3075288](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075288).

IEC 60270. **IEC 60270: High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements**. Geneva, Switzerland: IEEE - International Electrotechnical Commission, 2000. Standard published by the International Electrotechnical Commission.

IEEE STD C57.127-2018. IEEE Guide for the Detection, Location and Interpretation of Sources of Acoustic Emissions from Electrical Discharges in Power Transformers and Power Reactors. **IEEE Std C57.127-2018 (Revision of IEEE Std C57.127-2007)**, p. 1–72, mar. 2019. doi: [10.1109/IEEESTD.2019.8664690](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8664690).

IEEE STD C57.127-2018. **IEEE Guide for the Detection, Location and Interpretation of Sources of Acoustic Emissions from Electrical Discharges in Power Transformers and Power Reactors**. [S.l.]: IEEE, mar. 2019. P. 1–72. doi: [10.1109/IEEESTD.2019.8664690](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8664690).

JAMES J. CUMMINGS, Jeremy N. Bailenson. How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. **Media Psychology**, v. 19, n. 2, p. 272–309, 2012.

JERALD, Jason. **The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality**. [S.l.]: Association for Computing Machinery e Morgan & Claypool, 2015. ISBN 9781970001129.

JIANG, Lei; ZHU, Deheng; LI, Fuqi; TAN, Kexiong; QIN, Gangli; JIN, Xianhe; WANG, Changchang; CHENG, T.C. Recognition of Partial Discharge Patterns in Power Transformer Insulation Models. In: PROCEEDINGS of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China: [s.n.], 2000. P. 1–6.

KAISER, Joseph. Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch. **Technischen Universität München (TUM)**, 1950.

KAŠKA, Miloš. Experience with monitoring and location of partial discharges inside of high voltage oil power transformers. In: 2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE). [S.l.: s.n.], jun. 2016. P. 56–59. doi: [10.1109/DEMISEE.2016.7530465](https://doi.org/10.1109/DEMISEE.2016.7530465).

KAWADA, H; HONDA, M; INOUE, T; AMEMIYA, T. Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-103, p. 422–428, 2 fev. 1984. ISSN 0018-9510. doi: [10.1109/TPAS.1984.318261](https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318261).

KESSLER, O. The Importance of Partial Discharge Testing: PD Testing Has Proven to Be a Very Reliable Method for Detecting Defects in the Insulation System of Electrical Equipment and for Assessing the Risk of Failure. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 18, n. 2, p. 62–65, 2020. doi: [10.1109/MPE.2020.2974599](https://doi.org/10.1109/MPE.2020.2974599). Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MPE.2020.2974599>.

KIM, S. *et al.* Virtual Reality in Industrial Applications: Review of Recent Developments. **Journal of Industrial Technology**, IEEE, v. 34, n. 2, p. 25–32, 2018.

KIMURA, H.; TSUMURA, T.; YOKOSUKA, M. Corona in Oil as Part of Commercial-Frequency Circuit. **Electrotechnical Journal of Japan**, v. 4, p. 90–92, 1940.

KREUGER, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. [S.l.]: Butterworth & Co., 1989.

LAVIOLA, Joseph J. *et al.* Recent Advances in Wearable VR Devices, Tracking Systems, and Gesture Recognition Interfaces. **IEEE Transactions on Virtual Reality**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 151–160, 2017.

LI, Ziyun *et al.* Classification of different types of partial discharge based on acoustic emission techniques. In: PROCEEDINGS of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. [S.l.: s.n.], ago. 2013. v. 02, p. 1118–1121. doi: [10.1109/MIC.2013.6758155](https://doi.org/10.1109/MIC.2013.6758155).

MARQUES, André Pereira; JESUS RIBEIRO, Cacilda de; AZEVEDO, Cláudio Henrique Bezerra; SANTOS, José Augusto Lopes dos; CUNHA BRITO, Leonardo da. Técnicas Preditivas de Manutenção em Transformadores de Potência - Um Estudo de Caso. In: PROCEEDINGS of the World Congress on Systems Engineering and Information Technology (2013 COPEC). [S.l.: s.n.], 2013. P. 43–47. doi: [10.14684/WCSEIT.1.2013.43-47](https://doi.org/10.14684/WCSEIT.1.2013.43-47).

MOHAMMADI, Ezatollah; NIROOMAND, Mehdi; REZAEIARR, Mahdie; AMINI, Zahra. Partial Discharge Localization and Classification Using Acoustic Emission Analysis in Power Transformer. In: INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference. [S.l.]: IEEE, dez. 2009. doi: [10.1109/INTLEC.2009.5351926](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5351926).

NASCIMENTO, J. A. S. do; BRASIL, F. de S.; MOREIRA, D. C.; MONTEIRO, E. A.; FEITOSA, J. B. S. Intercomparação de Metodologias para Detecção de Descargas Parciais em Transformadores e Reatores de Potência Realizadas no Laboratório e em Subestações.

*In:* GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Brasil: [s.n.], 2023.

NBR 5462. **NBR 5462: Confiabilidade em sistemas elétricos — Terminologia.** [S.l.]: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001. Rio de Janeiro.

NBR IEC 60270. **ABNT NBR IEC 60270 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Medição de descargas parciais. High-voltage test techniques - Partial discharge measurements.** [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017. Disponível em: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br).

NICOARĂ, Tania; MARINESCU, Andrei; PĂTRU, Ion. Partial discharge diagnostics in power and instrument transformer based on acoustic emission method. *In:* 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). [S.l.: s.n.], out. 2016. P. 1–6. [doi: 10.1109/ICATE.2016.7754675](https://doi.org/10.1109/ICATE.2016.7754675).

NUNES, Carlos; COSTA, Ricardo. Aspectos Técnicos para Aumentar a Imersão em Ambientes Virtuais. *In:* SBC. ANAIS do Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. [S.l.: s.n.], 2008. P. 123–130.

NUNEZ, Arturo. Recent Case Studies in the Application of Acoustic Emission Technique in Power Transformers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 13, n. 6, 2006. [doi: 10.1109/TDEI.2006.251904](https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.251904).

PALACIOS, T. Antecedentes Históricos de la Emisión Acústica en Latinoamérica. *In:* ACTAS del Primer Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (E-GLEA1). [S.l.: s.n.], 1997. P. 163–176.

PHUKAN, Ripunjoy; KARMAKAR, Subrata. Acoustic Partial Discharge signal analysis using digital signal processing techniques. *In:* 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON). [S.l.: s.n.], dez. 2013. P. 1–6. [doi: 10.1109/INDCON.2013.6725936](https://doi.org/10.1109/INDCON.2013.6725936).

PRATT, Albert B. **Weapon.** [S.l.]: US1183492A, 1915.

RATHOD, Viral B.; KUMBHAR, Ganesh B.; BHALJA, Bhavesh R. Performance analysis of acoustic sensors based time reversal technique for partial discharge localization in power transformers. **Electric Power Systems Research**, Elsevier Ltd, v. 215, fev. 2023. ISSN 03787796. [doi: 10.1016/j.epsr.2022.108965](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108965).

SHERMAN, William R.; CRAIG, Alan B. **Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design.** 2. ed. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2018.

SIKORSKI, Wojciech; WALCZAK, Krzysztof. Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. **IntechOpen**, 2013. doi: [10.5772/55211](https://doi.org/10.5772/55211).

SLATER, Mel; WILBUR, Sylvia. A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, MIT Press, v. 6, n. 6, p. 603–616, 1997.

STONE, Greg C.; CAVALLINI, Andrea; BEHRMANN, Glenn; SERAFINO, Claudio Angelo. **Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2023.

TENBOHLEN, Stefan *et al.* DEVELOPMENT AND RESULTS OF A WORLDWIDE TRANSFORMER RELIABILITY SURVEY. *In.*

TIAN, Ye; QI, Bo; ZHUO, Ran; FU, Mingli; LI, Chengrong. Locating partial discharge source occurring on transformer bushing by using the improved TDOA method. *In:* 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). [S.l.: s.n.], set. 2016. P. 144–147. doi: [10.1109/CMD.2016.7757796](https://doi.org/10.1109/CMD.2016.7757796).

TORI, Ronei; KIRNER, Cristina; SISCOUTTO, Robson. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada.** Porto Alegre, Brasil: SBC - Sociedade Brasileira de Computação, 2006.

TRAIN, D; MERCIER, A; THORNE, D. The Detection of Partial Discharges in High Voltage Potential Transformers in Service. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-93, p. 1909–1916, 6 nov. 1974. ISSN 0018-9510. doi: [10.1109/TPAS.1974.293843](https://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293843).

YAACOB, M M; ALSAEDI, M A; RASHED, J R; DAKHIL, A M; ATYAH, S F. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors. **Photonic Sensors**, v. 4, p. 325–337, 4 2014. ISSN 2190-7439. doi: [10.1007/s13320-014-0146-7](https://doi.org/10.1007/s13320-014-0146-7). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13320-014-0146-7>.

# Apêndices

## APÊNDICE A – Publicações

Como divulgação da pesquisa realizada durante o mestrado, destacam-se as seguintes publicações científicas:

- **FEITOSA, J. B. S.**; PAULA, Hélder; CARDOSO, Alexandre; LIMA, Gerson. Application of Immersive Technologies in the Visualization of Partial Discharges in Power Transformers: A Significant Advance in Supporting Maintenance Practices. *16th International MODSIM 2024 World Conference*, held from May 20-22nd in Norfolk, VA, USA.
- **FEITOSA, J. B. S.**; PAULA, Hélder; CARDOSO, Alexandre; LIMA, Gerson; G. R. V. Bruno. Aplicações de Tecnologias Imersivas na Identificação e Visualização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência: Um Progresso Relevante no Suporte às Práticas de Manutenção. XI *WORKSPOT - 11º Workshop* Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais. Rio de Janeiro, RJ – 25 a 27 Novembro 2024.
- NASCIMENTO, J. A. S. do; BRASIL, F. de S.; MOREIRA, D. C.; MONTEIRO, E. A.; **FEITOSA, J. B. S.** (2023). Intercomparação de Metodologias para Detecção de Descargas Parciais em Transformadores e Reatores de Potência Realizadas no Laboratório e em Subestações. *XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- FERREIRA, Angel; NETO, Jair; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; JÚNIOR, Maurício; LIMA, Diogo; SILVA, Carvalho; CAMPOS, Davidson; **FEITOSA, João**. Technique for Identification of Electrical Substation Equipment Through Auto-Framing Interest Points and OCR Recognition of Text Tags in Environment for Augmented Reality Systems. *Proceedings of the 26th Symposium on Virtual and Augmented Reality, SVR 2024*, Manaus, Brazil, 30 September 2024 - 3 October 2024. Publisher = ACM, Year = 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3691573.3691622>. DOI: 10.1145/3691573.3691622.

## APÊNDICE B – Parametrização do AEwin<sup>TM</sup>

No contexto dos ensaios de EA utilizando o *software* AEwinAEwin<sup>TM</sup> da Physical Acoustics Corporation (PAC), apresenta-se as principais configurações e parâmetros aplicados neste ensaio para a identificação e localização dos sinais acústicos. São eles:

### A SISTEMA DE MONITORAMENTO EMPREGADO NO ENSAIO:

- Instrumento: Micro-II Express Digital AE System, com 24 canais ativos – fabricante Physical Acoustics Corporation com software de aquisição – AEWin for Express-8 Versão 5.92.
- Sensores: tipo R15I/MISTRAS com pré-amplificação de 40 dB, filtro interno e invólucro metálico para minimizar interferências RFI/EMI.
- Conexões: cabos coaxiais BNC/BNC - 50Ω;
- Fixadores magnéticos para sensores tipo R15I/MISTRAS e acoplante tipo graxa.

### B DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE TEMPO:

- Limite de referência: 40 dB.
- Ganho do pré-amplificador: 40 dB.
- PDT – *Peak Definition Time* (Tempo de Definição de Pico) = 200 µs. Parâmetro ajustável do sistema que define o intervalo de tempo no qual identifica o pico máximo de um evento de EA. Se um novo pico for detectado dentro desse tempo, o *software* considera que ainda faz parte do mesmo evento.
- HDT – *Hit Definition Time* (Tempo de Definição de Impacto) = 800 µs. Especifica a duração mínima que um evento deve ser um sinal válido de EA.
- HLT – *Hit Lockout Time* (Tempo de Bloqueio de Impacto) = 1000 µs. Representa o tempo mínimo que deve decorrer após um evento antes que um novo impacto possa ser registrado. Esse parâmetro evita a contagem de reflexões ou reverberações acústicas.

### C CONFIGURAÇÃO DE SENSORES:

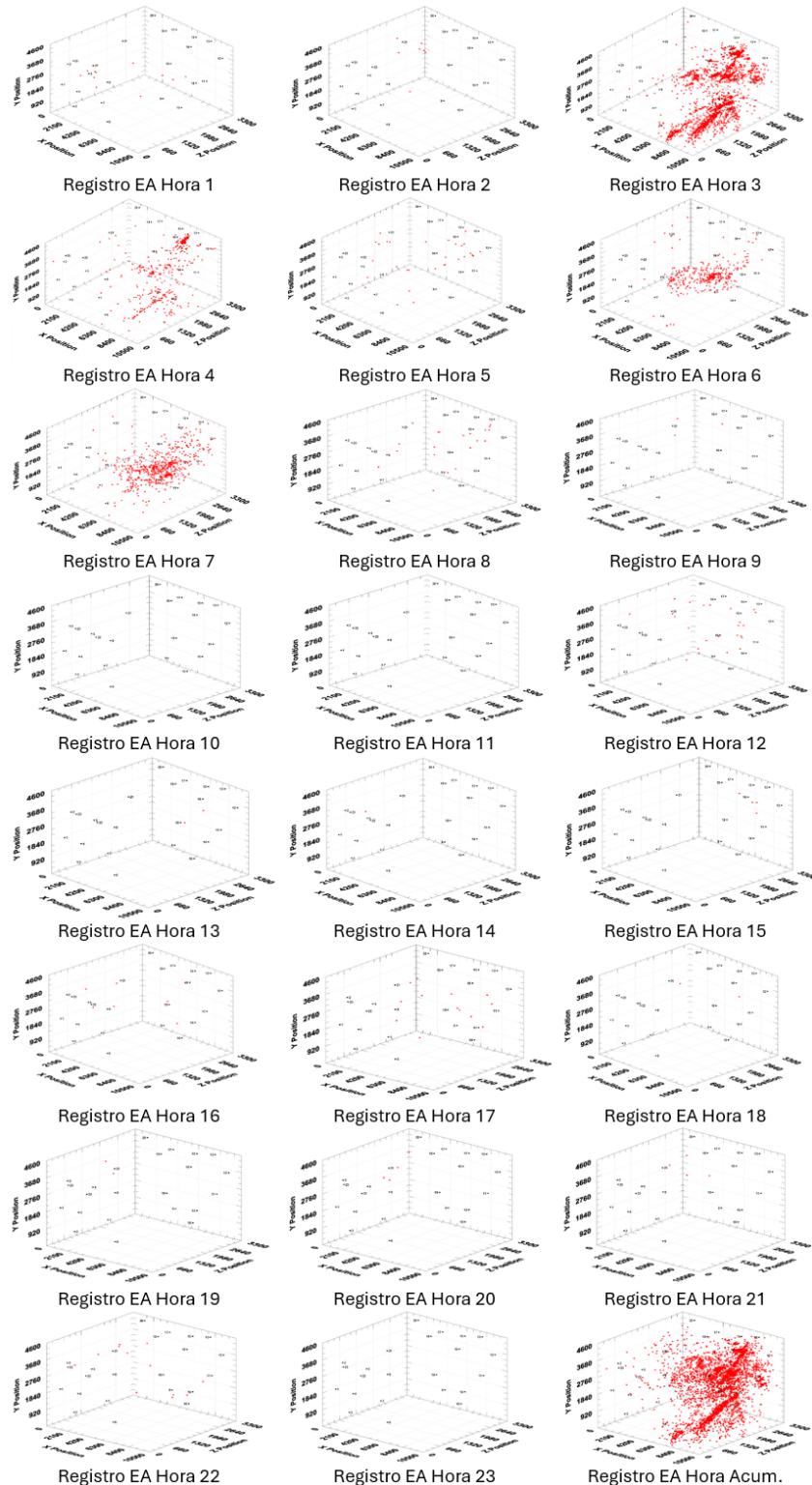
Foram empregado 24 sensores, tipo R15I/MISTRAS com pré-amplificação, sendo o 24º para detecção de ruídos externos com chuvas.

### D VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA

A velocidade do som no meio (óleo ou metal) para cálculos foi ajustado 1390 m/s.

## APÊNDICE C – Mapas EA

Figura .1 – Mapas de Atividades Acústica - 24 horas de medição.



Fonte: Autoria Própria.