

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

UMA NOVA ABORDAGEM DE IDENTIFICAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO IMAGENS ACÚSTICAS.

NAIDION MOTTA SILVÉRIO(1);ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO(2);JANSEN PAULA VILLIBOR(2);GERALDO MAGELA AOUN(1) METHOD REPRESENTACOES LTDA(1);UNIFEI(2)

RESUMO

Este artigo apresenta um novo método de investigação de descargas parciais (DP) baseado em imagens acústicas capturadas por meio de um instrumento denominado NL Câmera. Primeiramente, realizou-se um teste de laboratório no qual comparou-se o PRPD acústico, obtido da NL Câmera, ao PRPD gerado pelo método elétrico de medição. Além disso, procedeu-se experiências práticas com inspeções realizadas em diferentes equipamentos de alta tensão sob as condições adversas que os ambientes de subestações podem impor. Assim, verificou-se a adequabilidade do instrumento às inspeções de manutenção preventiva em campo, identificando de maneira simples e segura os ativos submetidos à DP, com precisão e facilidade de diagnóstico.

PALAVRAS-CHAVE: câmera acústica; imagem acústica; método acústico; diagnóstico de descargas parciais.

1.0 INTRODUÇÃO

Os materiais aplicados na confecção da isolamento de equipamentos que compõe o sistema elétrico de potência podem conter defeitos inerentes ao seu processo produtivo, o que pode levar ao aparecimento de descargas parciais (DP) quando o equipamento está em operação. A atividade de DP pode ser agravada à medida que esses materiais envelhecem, o que pode contribuir para uma falha severa e ocasionar a saída de operação do equipamento, bem como interrupções no fornecimento de energia elétrica. A ocorrência de DP, geralmente, é acompanhada por outros fenômenos elétricos, tais como correntes oriundas de impulsos elétricos e radiação eletromagnética. Por outro lado, fenômenos não elétricos também podem estar presentes, tais como a ocorrência de reações químicas, formação de gases internos, surgimento de pontos quentes no isolamento, além da emissão de ruídos que podem se propagar em frequências ultrassônicas, as quais são imperceptíveis ao ouvido humano. Do mesmo modo, os métodos de medição de DP concentram-se em dois tipos, elétrico e não-elétrico, cada um com suas respectivas vantagens e aplicações. Os métodos elétricos de medição de DP são consolidados no setor e dispõem de normas internacionais que estabelecem as diretrizes para execução dos ensaios. Já os métodos não-elétricos, são caracterizados por serem não destrutivos e não invasivos, permitindo a realização de medições online em campo de forma mais segura, além de apresentar imunidade às interferências eletromagnéticas.

Neste trabalho, serão apresentados os resultados de medições realizadas em laboratório, utilizando um novo equipamento baseado em um método não-elétrico de medição, análise e identificação da fonte de DP em ativos elétricos de média e alta tensão. O equipamento denominado NL Câmera concentra, em um único dispositivo compacto e portátil, um sensor acústico acoplado a uma câmera digital. As medições obtidas com o instrumento foram realizadas em equipamentos elétricos com a presença de DP e os resultados obtidos com a NL Câmera foram comparados às medições de instrumentos que utilizam métodos elétricos consolidados de medição de DP, os quais se baseiam na norma IEC 60270:2015. Tal comparação tem como objetivo validar os resultados apresentados pela nova metodologia de detecção acústica de DP.

Além disso, apresentam-se, também, os benefícios da utilização da câmera acústica frente às técnicas tradicionais de medições de descargas parciais, como a possibilidade de localizar, em tempo real e com boa precisão, o ponto da isolamento no qual a DP está ocorrendo, sua intensidade, além da obtenção, de forma instantânea, da identificação do tipo de DP (descarga de superfície, descarga interna e corona) à qual o ativo elétrico está submetido. Por fim, constatou-se a adequabilidade da utilização da NL Câmera às inspeções de manutenção preventiva em campo, uma vez que foi possível identificar, de maneira simples e segura, diversos equipamentos de alta tensão submetidos a DP em subestações e linhas de transmissão energizadas, com imunidade a interferências eletromagnéticas e ruídos, precisão, agilidade e facilidade de operação e de diagnóstico.

2.0 CARACTERÍSTICAS E METODOLOGIA DO MÉTODO ACÚSTICO DE DETECÇÃO DE DP.

2.1 Medição de DP pelo método acústico

A técnica de medição acústica de DP é uma metodologia já empregada em ambiente de laboratório nos quais as condições ambientes podem ser controladas e há, também, flexibilidade para posicionamento dos sensores. A natureza da onda sonora gerada pela DP resulta em uma atenuação significativa à medida que sua distância de propagação no ar aumenta. Por essa razão, sensores ultrassônicos normalmente utilizados para essas medições devem ser colocados bem próximos à fonte de DP. Além disso, a onda sonora é direcional, ou seja, sua propagação pode ser maior em uma determinada direção dependendo do ponto no qual a fonte que a gerou está localizada. Tal fato demanda que vários sensores sejam posicionados sobre diferentes ângulos em relação à fonte, a fim de cobrir as possíveis direções de propagação da onda. Um exemplo de um teste realizado em laboratório utilizando sensores ultrassônicos (com range de frequência de 20 a 100 kHz) é apresentado na referência (1), da qual extraiu-se a Figura 1-(a), que representa o setup do teste realizado e os pontos indicam a localização dos sensores ultrassônicos.

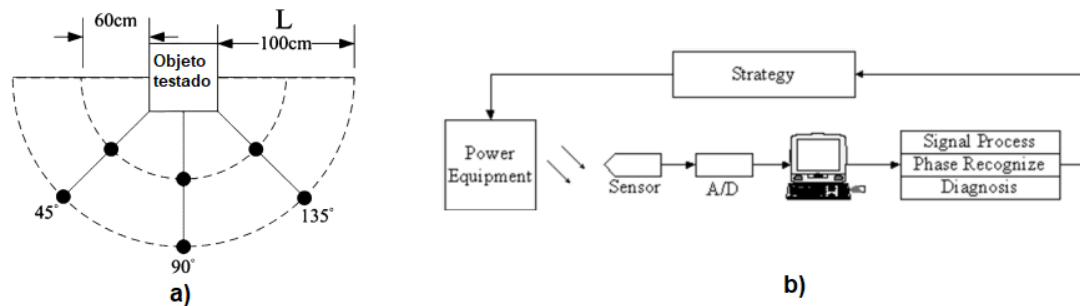


Figura 1. Setup do teste com sensores ultrassônicos e esquema de processamento dos dados.

Até então, o método acústico de medição de DP baseado em sensores ultrassônicos tinha aplicação restrita ao ambiente de laboratório no qual é possível isolar o equipamento sob teste, posicionar os sensores nos locais adequados, bem como adquirir e tratar os sinais obtidos por eles. Já que, além da aquisição, faz-se necessário um processamento das medições obtidas, a fim de facilitar a análise dos dados por parte do operador, o que demanda um arranjo similar aos apresenta na Figura 1–(b). Entretanto, a nova metodologia de medição apresentada nesse trabalho permite levar a campo uma técnica que antes era restrita a ambientes de laboratório. Trata-se da NL Câmera que será apresentada na subseção seguinte.

2.2 NL Câmera

Neste trabalho, o instrumento utilizado para realizar a medição acústica ultrassônica é denominado de NL Câmera. Tal instrumento concentra, em um dispositivo compacto e portátil, um sensor acústico de alta sensibilidade acoplado a uma câmera digital. Essa composição lhe permite sobrepor as fontes das ondas sonoras às imagens capturadas pelo aparelho em uma área delimitada pelo seu display. Para tal, a NL Câmera utiliza a técnica de Beamforming (ou conformação de raios), a qual se baseia na análise dos sinais captados por um arranjo conhecido de microfones, simultaneamente com a imagem captada por uma câmera de vídeo. Isso permite gerar uma representação visual dos níveis sonoros e a localização de fontes de ruído. A Figura 2 o display da NL Câmera em tempo real, bem como representa uma etapa de inspeção de DP em campo.



Figura 2. Representação de inspeção em campo com a NL Câmera.

O sensor acústico da NL Câmera é composto por uma matriz de 124 microfones MEMS de alta sensibilidade. Além disso, apresenta um amplo range de frequências sonoras detectáveis (2-35 kHz), que podem ser separadas em bandas por meio de filtros digitais selecionáveis na tela do dispositivo. Essa característica permite que a câmera acústica seja sensível tanto à faixa de som audível quanto à inaudível ao ouvido humano, o que lhe permite reconhecer a ocorrência de DP em estágio inicial, antes mesmo do aparecimento de pontos quentes no isolamento.

Dessa forma, é possível localizar, em tempo real e com boa precisão, o ponto da isolação no qual a DP está ocorrendo, bem como sua intensidade (em dB). Uma outra funcionalidade incorporada à nova metodologia de medição acústica de DP permite obter, de forma instantânea, a identificação do tipo de descarga parcial (descarga de superfície, descarga interna ou corona) à qual o ativo está submetido, bem como a exibição de gráficos do sinal medido (FFT, autocorrelação, espectrograma, cepstrum). Para tanto, faz-se necessário que a imagem acústica capturada em campo seja enviada para o sistema de análise em nuvem (NL Cloud), no qual algoritmos baseados em inteligência artificial realizam o trabalho de tratamento estatístico e classificação do tipo e gravidade da DP.

Todo esse processo é realizado de forma automática, desde que a NL Câmera esteja conectada à internet. Vale destacar também que são solicitados ao usuário apenas informações básicas sobre a medida em campo, tais como a distância aproximada do ponto de DP a qual a medição foi realizada, o tipo de equipamento sob teste (bucha, cadeia de isoladores, terminação de cabos etc), além da sua tensão de operação. Essas informações são utilizadas para selecionar padrões de DP detectados em equipamentos do mesmo tipo e de tensões similares, constantes na nuvem, que vão servir de base para classificação do tipo e gravidade da DP. Trata-se, portanto, de um instrumento que permite levar a campo toda a metodologia de medição e tratamento de dados que antes era restrita ao laboratório e que demandava interrupções de operação.

3.0 TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO PARA VALIDAÇÃO DA NL CÂMERA.

A fim de validar as medições de DP que a NL Câmera é capaz de realizar, procedeu-se um ensaio de laboratório no qual foi simulado o envelhecimento de um cabo com isolação XLPE, de seção 630 mm². Além das medições obtidas pelo método acústico, realizou-se, simultaneamente, as medições pelo método elétrico, o qual seguiu as diretrizes da norma IEC 60270:2015. Para tanto, utilizou-se o analisador de descargas parciais portátil Aquila® do fabricante Alta Nova®.

O setup do teste, bem como o circuito elétrico utilizado para a medição de DP estão apresentados na Figura 3. A tensão aplicada durante todo o ensaio foi de 34 kV, e a corrente injetada, teve o valor de 800A no período de 29/07/21 a 13/08/21 e subiu para 1430 A (no período de 13/08/21 a 27/08/21).

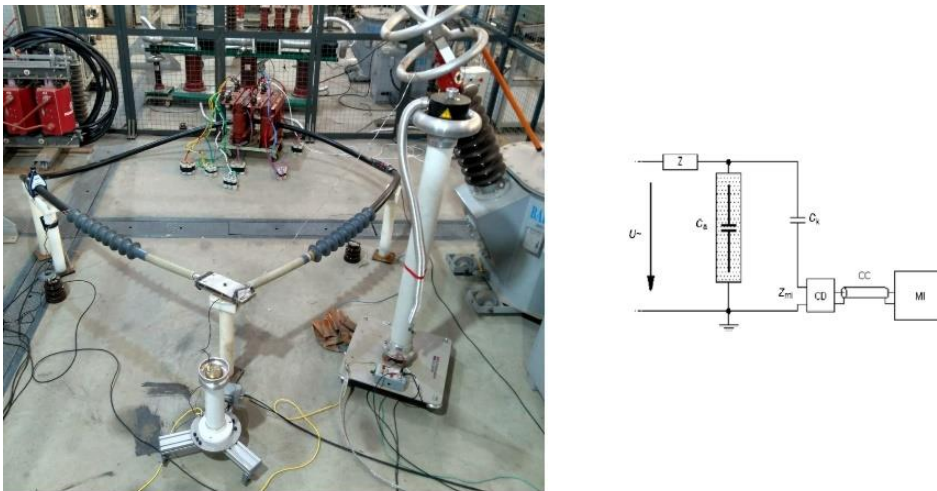


Figura 3. Setup e circuito elétrico utilizado no ensaio de envelhecimento do cabo.

As medições de DP, pelos dois métodos em questão, foram realizadas diariamente no período de ensaio. A partir das medições da NL Câmera, o sistema de inteligência artificial associado à nuvem (NL Cloud) gera um relatório no qual são apresentadas informações relevantes, tais como o PRPD acústico, a classificação do tipo de DP, bem como os valores de intensidade do ruído em dB (decibels) e o espectro de frequências da onda sonora emitida pela descarga. As informações desse relatório foram utilizadas para comparação com os dados obtidos e apresentados pelo analisador de DP portátil Aquila.

A Figura 4 exibe o PRPD, elétrico e acústico, relativo às medições realizadas no dia 25/08/21 e a Figura 5 refere-se ao dia 26/08/21. Nessas datas, foram detectadas as maiores atividades de DP de todo o período de teste. O PRPD é um diagrama fundamental para a classificação do tipo de DP à qual o equipamento em teste está submetido. Nesse contexto, pelas Figuras 4 e 5 verifica-se que há uma semelhança no padrão de distribuição dos pulsos capturadas pelos instrumentos ao longo do ciclo da tensão senoidal, ainda que não exista valores negativos no PRPD acústico devido à metodologia de processamento desse sinal. Obviamente, a classificação do tipo de DP não deve ser realizada por meio da simples observação de semelhança entre gráficos, mas sim por meio de uma metodologia baseada em estatística e tratamento digital de sinais. Para tanto, ambos os instrumentos dispõem de algoritmos capazes de classificar o tipo de DP apresentada no diagrama PRPD. Os principais valores medidos por cada um dos métodos de detecção de DP, bem como a classificação obtida com base nas referidas medições estão apresentadas na Tabela 1.

O método elétrico expressa as amplitudes dos maiores pulsos de DP medidos durante o ensaio em pC ou V. No ensaio em questão, mediu-se tais valores em Volts [V], tal como apresentado no PRPD referente a esse instrumento. Já o método acústico apresenta o maior nível de ruídos provenientes de DP em dB (decibel). Percebe-se, portanto, uma correlação entre a intensidade do som em dB e a amplitude dos pulsos medidos em Volts. Essa correlação é utilizada na análise do algoritmo processado na

NL Cloud para determinação da gravidade da DP (indicada por meio de uma escala que vai de baixo; médio; alto e muito alto), bem como na indicação da atividade de manutenção a ser realizada (limpeza, substituição, etc), conforme a Tabela 1.

Além disso, o PRPD é analisado por meio de técnicas de inteligência artificial, as quais realizam a classificação do tipo de atividade de DP. Tal como apresentado na Tabela 1, a classificação de DP apontado por ambas as técnicas de medição foi de descarga superficial ou interna, o que revela a convergência dos métodos quanto ao reconhecimento do padrão de DP.

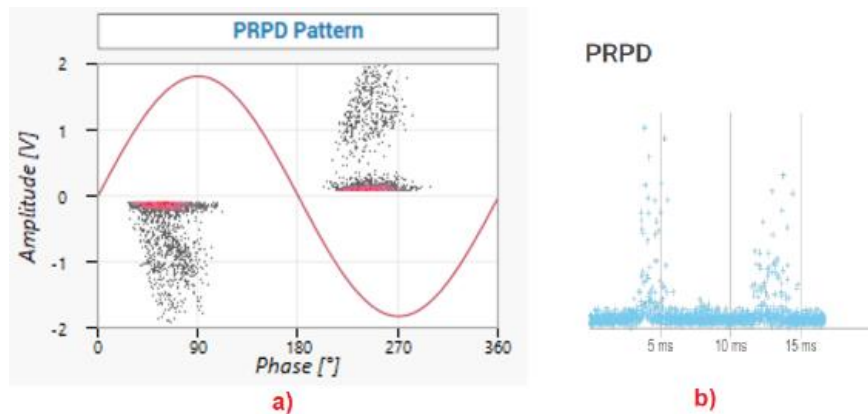


Figura 4. PRPD obtido no dia 25/08/2021 pelo método elétrica 4-(a) e pelo método acústico 4-(b).

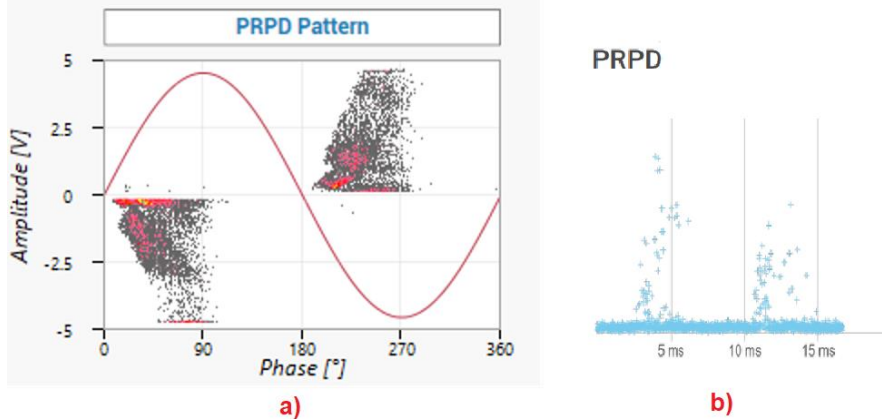


Figura 5. PRPD obtido no dia 26/08/2021 pelo método elétrica 5-(a) e pelo método acústico 5-(b).

Tabela 1. Resultados obtidos pelos algoritmos de análise do método elétrico e acústico.

Data	a) Electrical Method			b) Acoustic Method	
	Q máx [V]	Q máx 95% [V]	Result Identification	Measurement values	PD classification and severity (NL Cloud)
25/08	2,3065	1,4985	Internal Discharge / Surface	Level: 7.3 dB Distance: 5 m Voltage: 34 kV PD location: Cable termination	<p>Severity</p> <p>Description: This is likely to be a strong surface or internal discharge. Surface or internal discharges on cables, terminations, and joints will progress over time and might rapidly escalate to insulation breakdown.</p> <p>Recommendation: Visual inspection. Cleaning of polluted surfaces. Repair or replacement of damaged components.</p>
26/08	4,6910	3,6648	Descarga Interna/ Superfície	Nível: 9.5 dB Distância: 5 m Tensão: 34 kV Local PD: Terminação de cabo	<p>Descrição</p> <p>Isso é classificado como uma [descarga superficial ou interna] [surface_or_internal_discharge]. Nesta fase, a descarga parece ser de intensidade moderada. Irá progredir com o passar do tempo e resultar na deterioração total do isolamento.</p> <p>Recomendação Inspeção visual. Limpeza de superfícies poluídas. Reparação ou substituição de componentes danificados.</p>

Ademais, tal como apresentado na seção 2, uma funcionalidade da NL câmera que pode complementar o método elétrico em testes de laboratório é a possibilidade de localização, em tempo real, do ponto da isolação no qual a DP está ocorrendo com

maior intensidade. Como exemplo, tem-se a Figura 6 que se refere à medição do dia 25/08/21, na qual o alvo em cores da NL Câmera aponta para uma DP de superfície ou interna na mufla do cabo.



Figura 6. Localização do ponto no qual há a maior atividade de DP.

4.0 INSPEÇÕES REALIZADAS EM CAMPO COM A NL CÂMERA

Nesta seção serão apresentados alguns relatórios de inspeção gerados pela NL Cloud, os quais contemplam as medições realizadas em campo, bem como os resultados das análises realizadas pelos algoritmos de inteligência artificial. O objetivo é demonstrar o potencial de informações que a inspeção utilizando a NL Câmera pode proporcionar, além de avaliar a resposta do instrumento em condições reais de campo tal como em ambientes de subestações de transmissão e subtransmissão.

4.1 Corona em transformadores de corrente

A Figura 7 apresenta o relatório da inspeção realizado em um TC de uma subestação de 345 kV no qual detectou-se uma atividade de DP. O alvo colorido na imagem acústica permite determinar a fonte de DP que emite a maior intensidade de ruído dentro da imagem enquadrada no display da NL Câmera. Na parte inferior esquerda da Figura 7, também é apresentado o PRPD acústico da DP indicada pelo alvo colorido, bem como a sua classificação como corona negativo.

No lado inferior direito, é exibida a escala de severidade ou gravidade da DP com base nas informações fornecidas pelo usuário (a saber: distância; tensão e localização). Nessa medição, o algoritmo classificou a DP como baixa e não recomendou nenhuma ação de manutenção.



Figura 7. Relatório obtido durante inspeção em um TC de uma subestação de 345 kV.

4.2 Descarga superficial em disjuntor

A Figura 8 apresenta o relatório da inspeção realizado em um disjuntor de uma subestação de 500 kV na qual havia relatos de altos índices de poluição. O alvo colorido na imagem acústica aponta para a fonte de DP de maior intensidade de ruído no disjuntor. Na parte inferior esquerda da Figura 8, o PRPD acústico e a classificação da descarga revelam a atividade de DP do tipo descarga interna ou superficial. Essa ambiguidade deve-se à semelhança dos padrões de DP existentes entre esses dois tipos, o que impossibilita ao algoritmo a distinção entre elas. No lado inferior direito, é exibida a escala de severidade ou gravidade da DP que nesse caso foi classificada como muito alta. Portanto, foi recomendada ação imediata de manutenção. A intensidade do ruído produzido pela DP foi de 28,5 dB nesse caso.

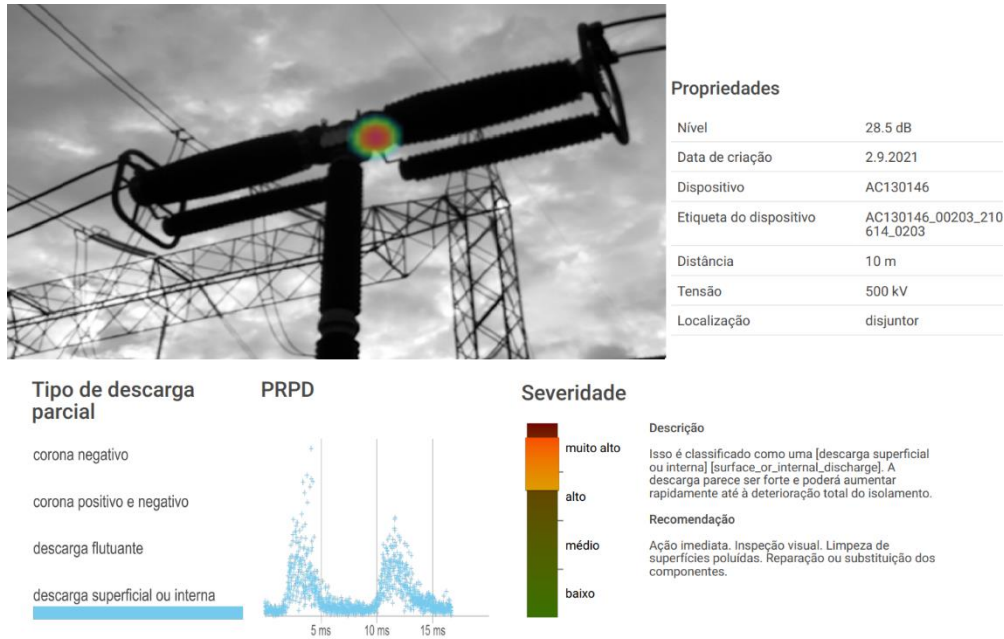


Figura 8. Relatório obtido durante inspeção em um disjuntor de uma subestação de 500 kV.

4.3 Descarga superficial em cadeia de isoladores de disco

A Figura 9 apresenta o relatório da inspeção realizado em uma cadeia de isoladores de disco de uma subestação de 500 kV na qual havia relatos de altos índices de poluição. O alvo colorido na imagem acústica aponta para a fonte de DP de maior intensidade de ruído ao longo da cadeia de isoladores. Na parte inferior esquerda da Figura 9, o PRPD acústico e a classificação da descarga revelam a atividade de DP do tipo descarga interna ou superficial. Na escala de severidade a DP foi classificada como muito alta. Portanto, foi recomendada ação imediata de manutenção. A intensidade do ruído produzido pela DP foi de 53,9 dB nesse caso.

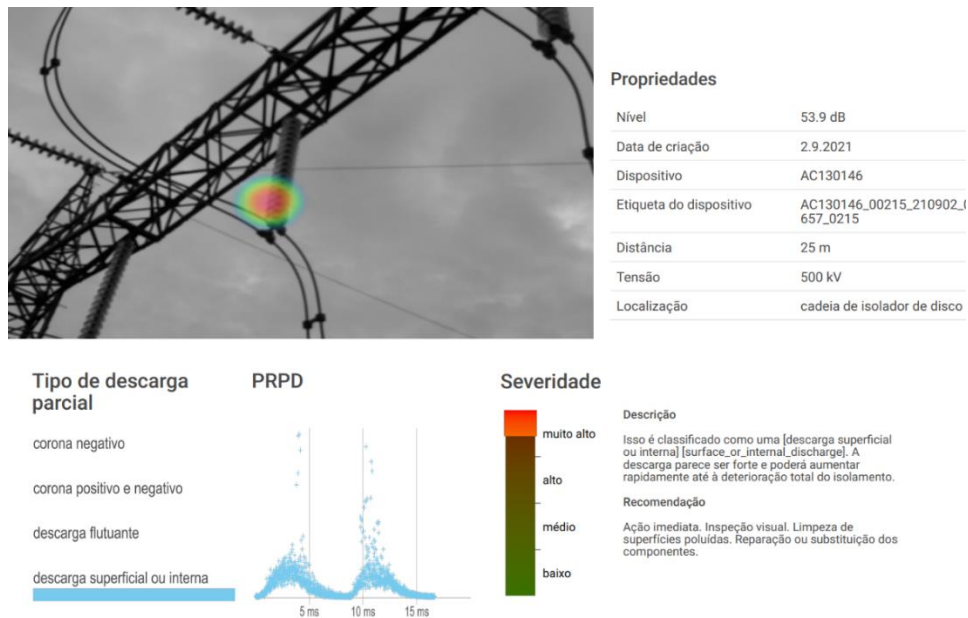


Figura 9. Relatório obtido durante inspeção em uma cadeia de isoladores de uma subestação de 500 kV.

5.0 CONCLUSÃO

O novo método de identificação e diagnóstico de DP em campo utilizando imagens acústicas foi apresentado, testado e validado neste trabalho. Tal método baseia-se na sobreposição das fontes das ondas sonoras associadas às imagens capturadas em uma área delimitada pelo display da NL Câmera. Para tanto, o instrumento utiliza-se da técnica de Beamforming. Desse modo, a NL Câmera permite que as medições que, anteriormente eram empregadas apenas em laboratório, possam ser utilizadas em campo, de forma online, segura e com facilidade de diagnóstico.

Os resultados apresentados mostraram a capacidade da NL Câmera em detectar várias fontes de DP em diferentes equipamentos elétricos e sob condições ambientes diversas. Nos testes em laboratório, observou-se a convergência entre o método elétrico e o método acústico tanto em relação à intensidade da DP, quanto em relação à classificação do seu tipo. Já nos testes em campo, foi possível constatar que as funcionalidades da NL Câmera não foram afetadas pelas interferências que um ambiente de subestação de alta tensão poderia causar. Além disso, verificou-se também que o nível de experiência e conhecimento requerido para realização das medições é mínimo, uma vez que apenas informações gerais são solicitadas pelo algoritmo de análise da NL Cloud e o relatório com a classificação do tipo, severidade e sugestões de ações de manutenção é gerado de forma automática.

6.0 REFERÊNCIAS

- (1) LI-JUNG CHEN, TA-PENG TSAO AND YU-HSUN LIN, "New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 4, pp. 2501-2508, Oct. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2005.855425.
- (2) L. CHEN, W. LIN, T. TSAO AND Y. LIN, "Study of Partial Discharge Measurement in Power Equipment Using Acoustic Technique and Wavelet Transform," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1575-1580, July 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.899254.
- (3) S. SUWANASRI ET AL., "Partial Discharge Investigation and Failure Analysis on Distribution Network Using Acoustic Camera," 2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2021, pp. 181-184, doi: 10.1109/iEECON51072.2021.9440301.
- (4) NL ACOUSTICS., "NL Camera – Partial discharge analysis". Helsinki.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em engenharia elétrica e mestre em engenharia de energia pela Universidade Federal de Itajubá. Atua como engenheiro de aplicação e vendas na Method Representações, com foco nas áreas de manutenção e testes de equipamentos elétricos de alta tensão.

(2) ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO. Estácio Tavares Wanderley Neto graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em 2001, concluindo o Mestrado e Doutorado na Área de Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Campina Grande em 2003 e 2007, respectivamente. Atualmente é professor Associado da Universidade Federal de Itajubá, atuando junto ao Laboratório de Alta Tensão e lecionando as disciplinas Eletricidade Básica, Técnicas de Alta Tensão, Materiais Elétricos e Coordenação de Isolamento. Em suas atividades profissionais tem atuado em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento com diversas empresas do setor elétrico. É também conselheiro da Câmara Especializada em Engenharia Elétrica do CREA-MG.

(3) JANSEN PAULA VILLIBOR. BSc and MSc in Electrical Engineer in 2017 and 2019, at Federal University of Itajubá (UNIFEI); Electrical Engineering Ph.D. student at UNIFEI. LAT-EFEI High Voltage Laboratory researcher since 2017 working with high voltage tests and tests for the Brazilian Labelling Program in distribution transformers as authorized signatory and quality manager substitute. Member of Insulation Coordination on High Voltage Systems Study Commission (CE-003:028.001) reviewing the related technical standards. He is interested in the area of high voltage techniques, measurement and identification of partial discharges in electrical equipment, software development, energy efficiency, and studies related to distribution and transmission networks.

(4) GERALDO MAGELA AOUN. Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal de Itajuba (1982) e Pós graduado em sistemas elétricos de Potência (CESE-UNIFEI) - 1983. Atuou por 32 anos como engenheiro de Furnas Centrais Elétricas, tendo encerrado sua atividade na empresa no ano de 2018 como Superintendente de Produção. Atualmente atua como Diretor Técnico da Empresa Method Representações LTDA com foco nas áreas de manutenção e testes de equipamentos elétricos de alta tensão.