

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME FERNANDES RIBEIRO

# Contribuições à Avaliação da Degradação da Isolação de Cabos por Meio da Análise de Descargas Parciais

Uberlândia

2023

GUILHERME FERNANDES RIBEIRO

Contribuições à Avaliação da Degradação da Isolação de Cabos pelo Método das Descargas Parciais

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Hélder de Paula

Uberlândia

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R484  
2023 Ribeiro, Guilherme Fernandes, 1997-  
Contribuições à Avaliação da Degradação da Isolação de  
Cabos por Meio da Análise de Descargas Parciais [recurso  
eletrônico] / Guilherme Fernandes Ribeiro. - 2023.

Orientador: Hélder de Paula.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.474>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Paula, Hélder de, 1975-,  
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-  
graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GUILHERME FERNANDES RIBEIRO

Contribuições à Avaliação da Degradação da Isolação de Cabos pelo Método das Descargas Parciais

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Uberlândia,

Banca Examinadora:

Hélder de Paula – Prof. Dr. – UFU – Orientador

Paulo Henrique Oliveira Rezende – Prof. Dr. – UFU

Ivan Nunes Santos – Prof. Dr. – UFU

Arismar Morais Gonçalves Júnior – Prof. Dr. - UEMG

Diogo Sampaio César Souza – Prof. Dr. – IFMG (Campus Ibirité)



**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 - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 785, PPGEELT				
Data:	Vinte e oito de julho de dois mil e vinte e três	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:55
Matrícula do Discente:	12012EEL003				
Nome do Discente:	Guilherme Fernandes Ribeiro				
Título do Trabalho:	Contribuições à Avaliação da Degradação da Isolação de Cabos por Meio da Análise de Descargas Parciais				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Hélder de Paula Título do projeto: Desenvolvimento de Metodologias para o Diagnóstico de Falhas e Análise de Confiabilidade de Equipamentos e Sistemas Elétricos Agência financiadora: Sem financiamento Número do processo na agência financiadora: não se aplica Vigência do projeto: 01/03/17 até o momento (em andamento).				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Paulo Henrique Oliveira Rezende - FEELT, Ivan Nunes Santos - FEELT, Arismar Morais Gonçalves Júnior - UEMG/PPGEELT, Diogo Sampaio César Souza - IFMG e Hélder de Paula, orientador do candidato.

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 **Hélder de Paula, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/08/2023, às 12:09, 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 **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/08/2023, às 12:12, 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 **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/08/2023, às 23:27, 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 **Diogo Sampaio Cesar Souza, Usuário Externo**, em 02/08/2023, às 17:55, 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 **Arismar Moraes Gonçalves Júnior, Usuário Externo**, em 21/08/2023, às 14:48, 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 **4685662** e o código CRC **133A7E37**.

---

Dedico este trabalho a minha família, pelo estímulo, carinho e compreensão.

## RESUMO

O monitoramento e diagnóstico da condição do isolamento de cabos de potência faz parte da metodologia de manutenção preventiva e preditiva. Nesta perspectiva, a detecção e análise de descargas parciais é uma ferramenta de grande importância para a avaliação da isolação de cabos de média e alta tensão. Desta forma, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica envolvendo os temas relacionados a utilização de descargas parciais no diagnóstico de cabos isolados, como os métodos de detecção das descargas, métodos de localização dos defeitos, processamento de sinais, o comportamento das características dos pulsos de descargas parciais e as técnicas de aplicação das descargas no diagnóstico de cabos, sendo as principais baseadas na avaliação do nível de descarga aparente medida em picoCoulombs (pC). Isso posto, foi possível observar diversas deficiências nas metodologias de diagnósticos estudadas, tais deficiências que podem promover imprecisões nos diagnósticos ou até mesmo falsos diagnósticos e consequentemente proporcionam espaço para a ocorrência de falhas não esperadas no sistema. Com intuito de minimizar esta adversidade, é proposto uma metodologia de diagnóstico que busca incorporar a avaliação das diversas características das descargas parciais em conjunto com a descarga aparente, com a possibilidade da combinação com outros métodos de diagnóstico como o método da Tangente de Delta. Para isso, foi utilizado um Sistema de Apoio à Tomada de Decisões (SAD), baseado em um sistema de pontuação, no qual as características analisadas possuem pesos específicos que determinam sua influência no diagnóstico.

**Palavras-chave:** Cabos isolados. Descargas parciais. Diagnóstico. Monitoramento de condição.



## ABSTRACT

The monitoring and diagnosis of the condition of power cable insulation is part of the preventive and predictive maintenance methodology. In this perspective, the detection and analysis of partial discharges is a tool of great importance for the evaluation of the insulation of medium and high voltage cables. In this way, the work presents an literature review involving the themes related to the use of partial discharges in the diagnosis of insulated cables, such as the methods of discharge detection, methods of defect location, signal processing, the behavior of the characteristics of partial discharge pulses and the techniques of application of discharges in cable diagnosis, the main ones being based on the evaluation of the level of apparent discharge measured in picoCoulombs (pC). This said, it was possible to observe several deficiencies in the diagnostic methodologies studied, such deficiencies that can promote inaccurate or even false diagnoses and consequently provide room for the occurrence of unexpected faults in the system. In order to minimize this adversity, a diagnosis methodology is proposed that seeks to incorporate the evaluation of several characteristics of partial discharges together with the apparent discharge, with the possibility of combination with other diagnosis methods such as the Delta Tangent method. For this, a Decision Making Support System. For this, a Decision Making Support System (DSS) was used, based on a scoring system, in which the analyzed characteristics have specific weights that determine their influence on the diagnosis.

**Keywords:** Insulated cables. Partial discharges. Diagnosis. Condition monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	(A): Descarga interna. (B): Descarga em arborescência elétrica. ....	19
Figura 2.2 -	Descarga superficial. ....	20
Figura 2.3 -	Descarga corona. ....	20
Figura 2.4 -	Modelo a-b-c para DPs em tensões alternadas. (A): Esquemático de um isolante contendo uma cavidade. (B): Circuito equivalente .....	22
Figura 2.5 -	Exemplo do fenômeno SPMDs. ....	24
Figura 3.1 -	Circuitos básicos para medição de DPs. (A): Impedância de medição $Z_m$ em série com o capacitor de acoplamento $C_k$ . (B): Impedância de medição $Z_m$ em série com o objeto de teste $C_a$ . (C): Ponte balanceada utilizando o braço ( $C_{a2}, Z_{m2}$ ) como referência em paralelo com o braço de teste ( $C_{a1}, Z_{m1}$ ). ....	29
Figura 3.2 -	Circuito de medição para o método DAC. ....	31
Figura 3.3 -	Forma de onda da tensão utilizada no método DAC. ....	31
Figura 3.4 -	Princípios da reflexão baseado no teste de DPs em VLF. ....	33
Figura 3.5 -	Circuito para medição da corrente contínua de fuga. ....	39
Figura 3.6 -	Esquemático do teste não destrutivo para medição de DPs. ....	39
Figura 3.7 -	Exemplo de tensões de teste utilizadas para diagnóstico em um cabo de 220kV. ....	40
Figura 3.8 -	Outro exemplo de tensões de teste utilizadas para diagnóstico em um cabo de 220kV. ....	40
Figura 3.9 -	Exemplo de um padrão de DP interna. ....	43
Figura 3.10 -	Exemplo de um padrão de DP superficial. ....	43
Figura 3.11 -	Exemplo de um padrão de DP externa. ....	43
Figura 3.12 -	Polaridade dos pulsos em relação a posição do defeito. ....	48
Figura 3.13 -	Arranjo do sistema de teste ACRF. ....	49
Figura 3.14 -	Esquema do processo de transmissão dos pulsos. ....	49
Figura 4.1 -	Esquema da evolução do estilo de medição de DPs utilizado para o diagnóstico online de cabos isolados.....	63
Figura 4.2 -	Circuito equivalente e Diagrama de fase para medição TanDelta. ....	64
Figura 4.3 -	Estimativa do tempo de vida restante para diferentes testes. ....	69
Figura 4.4 -	Exemplo do método padrão de análise de DPs. ....	72

Figura 4.5 -	Exemplo dos padrões $\phi-q-n$ em ao decorrer do envelhecimento do cabo. ....	74
Figura 4.6 -	Exemplo do comportamento dos padrões ao longo do envelhecimento do cabo. ....	75
Figura 4.7 -	Padrões DPs durante o envelhecimento acelerado de cabos de média tensão. ....	76
Figura 4.8 -	Amplitudes e números de descargas obtidas durante o teste de envelhecimento acelerado. ....	77
Figura 4.9 -	Padrões obtidos para os diferentes estágios de envelhecimento. ....	77
Figura 4.10 -	Padrões de DPs para diferentes números de defeitos. (A): Padrão PRPD encontrado para o cabo com um único defeito. (B): Padrão PRPD encontrado para o cabo com dois defeitos. (C): Padrão PRPD encontrado para o cabo com seis defeitos. ....	79
Figura 4.11 -	Exemplos de pulsos DPs obtidos. ....	80
Figura 4.12 -	Descarga aparente máxima e média para 0,1 Hz e 50 Hz. ....	81
Figura 4.13 -	Padrões PRPD para 0,1 Hz (a,b) e 50 Hz (c,d) para 1 e 4 horas após aplicação das tensões. ....	82
Figura 4.14 -	Taxa de repetição para 0,1 Hz e 50 Hz. ....	82
Figura 4.15 -	Distribuição da ocorrência de DPs em relação a tensão de aplicação. ....	83
Figura 4.16 -	Características das DPs e crescimento das arborescências. ....	84
Figura 4.17 -	Modelo estatístico encontrado com fronteiras em 40% e 80%. ....	86
Figura 5.1 -	Fluxograma descritivo da estrutura do sistema/modelo adotado. ....	91
Figura 5.2 -	Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico de cabos isolados....	97
Figura 5.3 -	Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 1. ....	100
Figura 5.4 -	Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 2. ....	101
Figura 5.5 -	Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 3. ....	101
Figura 5.6 -	Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 4. ....	102
Figura 5.7 -	Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 5. ....	102
Figura 5.8 -	Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias <i>off-line</i> . ....	109
Figura 5.9 -	Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias <i>off-line</i> – Parte 2. ....	109
Figura 5.10 -	Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias <i>off-line</i> – Parte 3. ....	110

Figura 5.11 - Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias <i>off-line</i> – Parte 4. ....	110
Figura 5.12 - Estrutura a ser adotada para o modelo com atribuição de pesos dinâmica. ....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Exemplos típicos de frequência de teste para cabos de 10 kV de 3 núcleos. ....	32
Tabela 3.2 - Tensões padrões para testes pós instalação de cabos isolados de alta tensão. ....	36
Tabela 3.3 - Vantagens e Desvantagens da aplicação de métodos <i>off-line</i> para medição de DPs. ....	36
Tabela 3.4 - Tensões padrões para testes pós instalação de cabos isolados de alta tensão. ....	38
Tabela 3.5 - Tensões e tempo de ensaio para teste de suportabilidade por tensão alternada de cabos de alta tensão. ....	39
Tabela 3.6 - Características para diferentes métodos de detecção de DPs. ....	47
Tabela 4.1 - Valores de tensão de exploração e medição para o ensaio de descargas parciais. ....	53
Tabela 4.2 - Valores limites para carga aparente de DPs. ....	55
Tabela 4.3 - Valores limites para carga aparente de DPs em cabos de alta tensão. ....	55
Tabela 4.4 - Diferentes valores limites para carga aparente de DPs em cabos isolados. ....	56
Tabela 4.5 - Valores limites de carga aparente em cabos XLPE de acordo com normas e regulamentos chineses. ....	56
Tabela 4.6 - Probabilidade de Falha para Cabos de Alta Tensão. ....	59
Tabela 4.7 - Sistema de classificação para diagnóstico de DPs. ....	60
Tabela 4.8 - Técnica para avaliação de tendência após a segunda medição. ....	61
Tabela 4.9 - Sistema de classificação para diagnóstico de cabos de alta tensão com probabilidade de falha. ....	61
Tabela 4.10 - Valores de referência para o teste VLF – Tan( $\delta$ ) em cabos com isolamento do tipo PE. ....	65
Tabela 4.11 - Tensões de teste de suportabilidade VLF para onde senoidal e cosseno-retangular. ....	67
Tabela 4.12 - Tabela comparativa das vantagens e desvantagens entre os métodos de diagnóstico via DPs ou Tangente de Delta.....	68
Tabela 4.13 - Estágios de envelhecimento para terminações de cabos. ....	85

Tabela 4.14 -	Valores para as fronteiras de 40% e 80%. “x” representa que a estimacão não foi possível ou que não havia espécimes. ....	87
Tabela 4.15 -	Vantagens e desvantagens dos principais métodos de diagnóstico de cabos isolados via DPs.....	88
Tabela 5.1 -	Descrio dos parâmetros de descarga aparente e taxa de repetio para os estágios de crescimento das arborescências elétricas. ....	93
Tabela 5.2 -	Descrio e particularidades dos tipos padrões de DPs. ....	94
Tabela 5.3 -	Descrio do comportamento dos parâmetros a serem considerados no modelo. ....	95
Tabela 5.4 -	Exemplo de estratégia adotada para repetio das medioes de acordo com o nível de DPs encontrado. ....	98
Tabela 5.5 -	Divisão de prioridade dos parâmetros no sistema de pontuao. ....	99
Tabela 5.6 -	Parâmetros e respectivas pontuaoes para diferentes situaoes. ....	103
Tabela 5.7 -	Faixas de pontuaoes para os níveis de degradao – SAD 1. ....	104
Tabela 5.8 -	Descrio das situaoes relevantes para a relao dos parâmetros de descarga aparente e taxa de repetio. ....	104
Tabela 5.9 -	Valores dos parâmetros de um pulso de DPs ao se aproximar da falha. ....	107
Tabela 5.10 -	Parâmetros e as respectivas pontuaoes para determinadas situaoes – SAD 2. ....	110
Tabela 5.11 -	Faixas de pontuaoes para os níveis de degradao – SAD 2. ....	111
Tabela 5.12 -	Estratégia de repetio de medioes / interveno para os níveis de DPs resultantes do SAD. ....	112
Tabela 5.13 -	Parâmetros e respectivas pontuaoes ajustadas para o modelo com cálculo do produto. ....	115
Tabela 5.14 -	Faixa de pontuaoes para os níveis de degradao baseadas no modelo com cálculo do produto. ....	116
Tabela 5.15 -	Tabela de Decisoes para o Diagnóstico de cabos isolados. ....	116

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1: Introdução Geral .....</b>	<b>14</b>
1.1 Visão Geral .....	14
1.2 Motivação e Objetivo.....	15
1.3 Estruturação do trabalho .....	16
<b>Capítulo 2: Fundamentação das Descargas Parciais.....</b>	<b>17</b>
2.1 Definição de Descargas Parciais .....	17
2.1.1 Tipos de Descargas Parciais.....	18
2.2 Efeitos da Degradação em Isolação Sólida .....	20
2.3 Ocorrência de Descargas Parciais em Tensões Alternadas .....	21
2.4 Evolução das Descargas Parciais.....	23
2.5 Considerações Finais .....	25
<b>Capítulo 3: Métodos de Detecção e Medição de Descargas Parciais .....</b>	<b>26</b>
3.1 Metodologias de Medição e Diagnóstico de Descargas Parciais .....	27
3.1.1 Método Convencional .....	28
3.1.2 <i>Damped AC Voltage</i> (DAC) .....	30
3.1.3 <i>Very Low Frequency Voltage</i> (VLF) .....	33
3.1.4 Testes em Corrente Contínua.....	34
3.1.5 Método com <i>Eulerian Video Magnification</i> .....	35
3.1.6 Método de detecção com câmera acústica .....	35
3.1.7 Diagnóstico <i>online vs off-line</i> .....	35
3.2 Considerações Sobre o Tempo de Medição para Diferentes Tipos de Testes .....	37
3.3 Filtragem e Processamento de Sinais .....	41
3.4 Localização de Descargas Parciais .....	46
3.4.1 Diferença do Tempo de Chegada.....	47
3.4.2 Reflectometria no Domínio do Tempo .....	49
3.5 Considerações Finais .....	51
<b>Capítulo 4: Metodologias de Diagnóstico de Cabos Isolados via Análise de Descargas Parciais .....</b>	<b>52</b>
4.1 Testes em Cabos Novos e Pós Instalação .....	52
4.2 Diagnósticos para Avaliação da Condição do Isolamento e Expectativa do Tempo de Vida de Cabos Isolados .....	54
4.2.1 Método da Regressão Linear .....	57

4.2.2	Equação do Caso de Degradação .....	58
4.2.3	Métodos com Distribuições Estatísticas .....	59
4.2.4	Sistemas de Classificação .....	60
4.2.5	Monitoramento <i>Online</i> Contínuo de DPs .....	62
4.3	Outros Parâmetros e Considerações que Auxiliam no Diagnóstico .....	64
4.3.1	Tangente de Delta (TanDelta).....	64
4.3.2	Tensão de Início (PDIV) e Tensão de Extinção (PDEV) .....	70
4.3.3	Taxa de Repetição.....	71
4.3.4	Análise de Sequência de Pulso ou “ <i>pulse sequence analysis</i> ” (PSA) e Análise do Formato do Pulso .....	72
4.3.5	Análise de Padrões $\phi$ - $q$ - $n$ ao Longo do Tempo de Vida da Isolação .....	73
4.3.6	Análise das Características das DPs em Cabos com Múltiplos Defeitos .....	78
4.3.7	Diferenças de Características para Testes VLF e Testes em 50 Hz .....	81
4.3.8	Evolução das DPs em relação ao crescimento de arborescências elétricas .....	83
4.3.9	Análise Estatística para Diagnóstico de Cabos Isolados.....	85
4.4	Considerações Finais Sobre os Métodos de Diagnóstico de Cabos Isolados .....	87
<b>Capítulo 5: Proposta de Modelo para Diagnóstico de Cabos Isolados com Sistema de Apoio à Tomada de Decisão.....</b>		<b>90</b>
5.1	Sistemas de Apoio à Tomada de Decisão (SAD) .....	92
5.2	Parâmetros e Comportamentos Significativos do Diagnóstico via DPs para Aplicação no Modelo com SAD .....	93
5.3	Divisão do Modelo Para as Metodologias de Medição <i>Off-line</i> e <i>Online</i> .....	97
5.4	Formulação do Sistema de Pontuação do SAD .....	99
5.4.1	Tabela de Pontuação para o SAD – Opção 1 .....	103
5.4.2	Tabela de Pontuação para o SAD – Opção 2 .....	106
5.5	Considerações Finais Sobre o Modelo SAD .....	114
5.5.1	Alternativas para a tabela de pontuação do sistema SAD.....	115
<b>Capítulo 6: Conclusões e Propostas de Continuidade .....</b>		<b>118</b>
<b>Referências .....</b>		<b>120</b>



# Capítulo 1:

## Introdução Geral

### 1.1 Visão Geral

Devido ao acelerado crescimento do consumo de energia elétrica, tanto por parte de unidades comerciais quanto pelo setor industrial, originou-se uma série de problemas para as distribuidoras de energia em relação a qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia. A ocorrência de falhas inesperadas de diversos componentes do sistema de distribuição subterrânea é a principal causa da descontinuidade do suprimento de energia elétrica e entre estas, as falhas no isolamento de cabos de média e alta tensão e seus acessórios são grande maioria (Wester, 2004). Com isso, surge a necessidade do acompanhamento e diagnóstico da condição do isolamento desses componentes, de forma a incrementar a confiabilidade do sistema e evitar prejuízos financeiros e possíveis violações dos padrões mínimos de qualidade estabelecidos pelos órgãos responsáveis.

A distribuição de energia elétrica é realizado em maioria por linhas aéreas, porém em situações onde se possui espaço restrito, as linhas compostos por cabos subterrâneos representam a melhor alternativa para a rede de distribuição, além de outras vantagens como: não serem sujeitas a descargas atmosféricas diretamente nem a curto circuito devido à queda de objetos em suas fases, estão protegidas contra o furto de condutores, não promovem poluição visual, entre outros (Lanz et al, 2006).

Neste contexto, o estudo e desenvolvimento de novas técnicas para o diagnóstico e condicionamento da isolação de cabos de potência foi inevitável, buscando melhor conhecimento sobre os fenômenos que influenciam na degradação do material dielétrico e evitar as interrupções não programadas e os prejuízos causados pela mesma.

A deterioração do isolamento ocorre devido a fatores como estresse térmico, estresse mecânico e outras condições do local da isolação como o nível de umidade. Os dois principais fenômenos que ocorrem em cabos de potência devido a degradação do isolamento são: as arborescências em água<sup>1</sup> (*water trees*) e as descargas parciais (DPs).

---

<sup>1</sup> Neste trabalho as arborescências em água (*water trees*) poderão ser referenciadas apenas como “arborescências” e nas situações onde o contexto se trata das “arborescências elétricas” será especificado o tipo de arborescência.

As arborescências são relacionadas com a penetração de água no isolamento, por outro lado, as DPs são provenientes de cavidades ou vazios gasosos internos ao isolamento e podem originar dos diversos processos de fabricação do cabo ou durante o envelhecimento do mesmo ao longo do seu tempo de uso.

Ao longo das últimas décadas o tipo de isolamento para cabos de média e alta tensão mais utilizado passou de ser o isolamento a papel impregnado em óleo (PILC) para isolamentos sólidos com materiais poliméricos como o polietileno (PE), polietileno reticulado (XLPE) e outras variações do mesmo, juntamente com cabos isolados a borracha etileno-propileno (EPR). Os cabos XLPE tomam a frente devido a diversas características tecnológicas que lhe conferem vantagens em relação aos demais tipos de isolação. Porém, cabos XLPE são considerados bastante sensíveis ao fenômeno de descargas parciais. Em relação as arborescências, os cabos XLPE fabricados atualmente possuem resistência muito maior a este fenômeno comparado a suas primeiras gerações por volta das décadas de 70 e 80 (Lima, 2008). A evolução da tecnologia e projetos destes cabos não significa que o mesmo possua imunidade aos fenômenos de degradação, além do fato que muitos cabos das primeiras gerações ainda estão em utilização.

## **1.2 Motivação e Objetivo**

Neste contexto, este trabalho procura aprofundar sobre os procedimentos de diagnóstico e avaliação do isolamento de cabos de potência, com foco em estudar o fenômeno de degradação e evolução das descargas parciais; e como tais diagnósticos podem influenciar nas tomadas de decisões e no gerenciamento de ativos relacionados a manutenção preditiva e preventiva de sistemas de distribuição e/ou instalações industriais. Com isso, tem como objetivo:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno das descargas parciais e sua evolução ao longo do tempo;
- Compilar os principais métodos de medição de DPs em cabos isolados, destacando as particularidades de cada um;
- Destacar os principais obstáculos referentes a obtenção dos dados de DPs, como a necessidade da filtragem e análise de sinais;

- Apresentar as principais metodologias de diagnóstico de cabos via descargas parciais e como são aplicadas;
- Analisar as possibilidades de aprimoramento para as metodologias de diagnóstico e propor um sistema baseado em tais possibilidades.

### 1.3 Estruturação do Trabalho

Desta forma, a apresentação dos desenvolvimentos realizados nessa pesquisa foi estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 2: Este capítulo aborda o fenômeno das descargas parciais propriamente dito, apresentando sua definição, como as descargas podem ser classificadas, o comportamento das descargas em tensão alternada e também a evolução deste fenômeno ao longo do tempo;
- Capítulo 3: Neste capítulo serão apresentados os principais métodos de medição das DPs em cabos isolados, os circuitos equivalentes de cada, além de considerações sobre as metodologias de medições possíveis: *online* e *off-line*. No final do capítulo também é apresentado as dificuldades encontradas no processo de filtragem e processamento de sinais obtidos das medições de DPs e os métodos existentes que possibilitam a localização do ponto de origem das descargas em cabos;
- Capítulo 4: Este capítulo apresentará as metodologias de diagnóstico de cabos isolados via descargas parciais encontradas na literatura, ressaltando as vantagens e limitações de cada uma. Também serão discutidos os principais parâmetros e técnicas que podem ser incluídos no diagnóstico para aprimoramento do resultado obtido;
- Capítulo 5: Será apresentado neste capítulo a proposta de modelo de diagnóstico de cabos com a utilização de um Sistema de Apoio à Tomada de Decisão, o qual adiciona ao diagnóstico alguns dos parâmetros mencionados no capítulo anterior. O sistema proposto é baseado em um sistema de pontuação onde cada parâmetro recebe um peso específico de acordo com a sua influência no diagnóstico;
- Capítulo 6: Este capítulo apresentará as conclusões pertinentes ao que foi realizado nesta pesquisa e também as propostas de trabalho futuros.

# **Capítulo 2:**

## **Fundamentação das Descargas Parciais**

As descargas parciais (DPs) são reconhecidas como um fenômeno que representa o processo de degradação e envelhecimento de isolações elétricas. Por esta razão, as DPs se tornaram um dos pontos principais em investigações relacionadas a qualidade do isolamento e confiabilidade de equipamentos de alta tensão como transformadores, geradores, cabos de energia, motores e bancos de capacitores. Neste contexto, será apresentado nessa seção alguns dos principais conceitos sobre DPs, incluindo fatores quanto a sua ocorrência, definição, tipos de descarga, evolução e degradação causada pela atividade das descargas no isolamento.

### **2.1 Definição de Descargas Parciais**

Descargas parciais podem ser definidas como sendo sinais elétricos pulsantes incompletos, intermitentes e rápidos, da ordem de nano segundos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de eletricidade e o meio isolante, através do efeito da ionização em cavidades gasosas, no interior dos materiais isolantes e nas interfaces condutor-isolante ou isolante-isolante (Bartinkas, 2002). As DPs são definidas pela norma IEC 60270 como: “Descargas elétricas localizadas que apenas curto-circuitam parcialmente a isolação entre os condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor”.

As DPs são geralmente consequência do estresse localizado em pontos da isolação ou na superfície da isolação. A sua ocorrência é favorecida pela presença de cavidades gasosas no interior do material isolante, as quais são responsáveis pelas falhas mais comuns no material dielétrico e são geralmente introduzidas durante as várias etapas de fabricação dos materiais isolantes e outras solicitações durante a operação e envelhecimento do equipamento. A ocorrência das DPs está diretamente ligada a presença de um campo elétrico que influencia diretamente a ionização do material dielétrico, podendo dar origem as descargas nos pontos de maior intensidade do campo elétrico (Cuenca, 2005).

### ***2.1.1 Tipos de Descargas Parciais***

De forma geral, as DPs são caracterizadas de acordo com a sua origem, podendo ser do tipo interna, superficial ou externa ao material isolante (Mason, 1995). As descargas internas ocorrem nas cavidades gasosas presentes no material isolante, essas cavidades podem ser introduzidas nos diversos processos de fabricação do isolamento ou podem surgir ao longo da vida do equipamento devido a diversos estresses elétricos e físicos que a isolação é submetida (Gjaerde, 1997). Essas cavidades podem possuir diversas formas sendo as mais comuns as esféricas e elípticas, Figura 2.1 (a). Se alguma tensão é aplicada ao sistema, o campo elétrico na cavidade será maior que o campo elétrico no isolamento em volta devido a constante dielétrica do gás que preenche a cavidade ser menor que a constante dielétrica do isolamento.

O formato e localização da cavidade também influenciam na elevação do campo elétrico dentro da mesma. Se a cavidade é perpendicular as direções do campo, o campo elétrico da cavidade será  $\epsilon$  vezes o valor normal do campo elétrico no dielétrico, sendo  $\epsilon$  a permissividade do material isolante. Existem diversas possibilidades para o tipo de cavidade, como por exemplo a cavidade plana (o comprimento da cavidade é maior que a altura) pode ser vinculada apenas ao dielétrico (é completamente cercada pelo dielétrico, como na Figura 2.1) ou vinculada ao dielétrico e eletrodo (ocorre na borda entre os dois). Sendo o último desses tipos de cavidade tangencial a direção do campo elétrico e produz concentrações substanciais de campo elétrico após a ocorrência da falha.

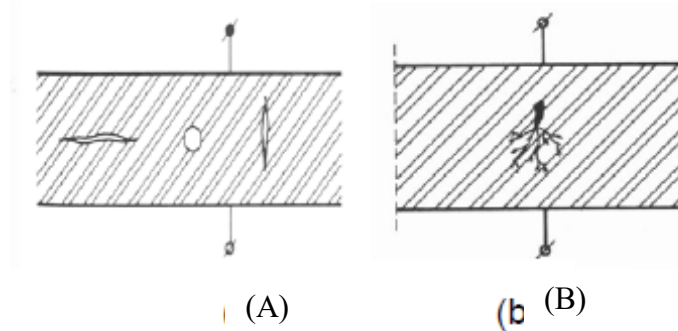
Quando a cavidade possui formato esférico, o campo elétrico será elevado a  $3\epsilon/(1+2\epsilon)$  vezes o valor normal do campo, no caso onde ' $\epsilon$ ' é um valor alto o campo elétrico na cavidade esférica será 1,5 vezes o valor do campo elétrico no material dielétrico. As cavidades que são estreitas e perpendicular ao campo elétrico tendem a possuir um estresse elétrico igual ao campo elétrico no dielétrico, porem este tipo de cavidade representa um caso mais crítico pelo fato de romper uma parte maior da isolação, além de produzir concentrações substanciais de campo elétrico após a ocorrência da falha (Gouda e El-Faraskoury, 2011).

Uma descarga ocorre na cavidade quando o campo elétrico presente é maior que o valor da rigidez dielétrica do gás que preenche o vazio. Fatores como tamanho da cavidade, o tipo e pressão do gás influenciam na rigidez dielétrica da cavidade. A presença desses defeitos na isolação podem resultar na falha completa do material devido

a degradação do material, a qual depende do valor do campo elétrico, tipo de isolamento e magnitude das descargas (Gulski, 1995). O processo de degradação inicia com a erosão da parede da cavidade seguido pela formação de um “poço” nas extremidades da cavidade que resulta em uma alta elevação do campo elétrico. Se o campo elétrico exceder a rigidez do material isolante, então inicia-se uma falha do material nesta área da cavidade levando ao surgimento de arborescências elétricas.

Um caso particular das descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas, Figura 2.1 (b). As arborescências elétricas são um fenômeno pré-ruptura que ocorre no interior da isolação de equipamento, tais como cabos isolados, a origem das arborescências elétricas é devido a ocorrência contínua de DPs internas ou a partir de uma falha no eletrodo (Kreuger, 1989).

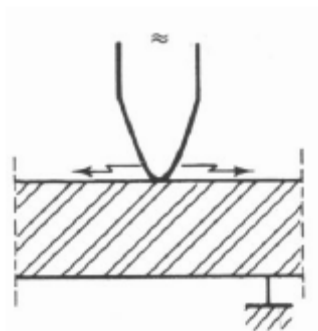
Figura 2.1 – Descarga interna (A), descarga em arborescência elétrica (B).



Fonte: Gutnik (2014). Modificado de Kreuger (1989).

As descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, partindo do eletrodo em direção à superfície. Este tipo de DP pode causar alterações na superfície do dielétrico, fenômeno conhecido como trilhamento (Mason, 1995), podendo causar a ruptura completa do material dielétrico. São bastante comuns em acessórios de cabos (emendas e conexões) devido a não presença ou a remoção incompleta da tela exterior semicondutora, causando descargas devido ao campo elétrico que surge nas pontas da tela semicondutora. A tensão de início para este tipo de descarga é relativamente pequena, dependendo da grossura e permissividade do material, além de quanto agudo é a ponta do eletrodo (Kreuger, 1989).

Figura 2.2 – Descarga superficial.



Fonte: Gutnik (2014). Modificado de Kreuger (1989).

Por fim, as descargas externas ou descargas corona são comuns em eletrodos do tipo ponto ou que possuam raio de curvaturas pequenos na extremidade. As descargas corona desencadeiam processos químicos que podem gerar subprodutos prejudiciais ao material isolante dependendo da forma que o mesmo reage com o dielétrico, como, por exemplo, a produção de ozônio, a qual pode causar fissuras nas isolações poliméricas.

Figura 2.3 – Descarga corona.



Fonte: Gutnik (2014). Modificado de Kreuger (1989).

## 2.2 Efeitos da degradação em isolação sólida

Tendo em mente que o foco deste trabalho são cabos isolados, os quais atualmente são em sua grande maioria isolados a XLPE, PE e EPR, será mencionado a seguir algumas considerações sobre fatores de degradação que ocorrem em conjunto ou não para estes tipos de isolamentos.

As DPs que ocorrem nas cavidades gasosas do isolamento podem gerar produtos como O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub>, tais produtos causam a degradação química das paredes da cavidade via

erosão. Tal processo é lento, mas resultará no gradual aumento de tamanho da cavidade, aumentando assim o nível de DPs que ocorrem no defeito (Gouda e El-Faraskoury, 2011).

Como mencionado anteriormente, as arborescência elétrica surgem de pontos de estresse elevado na isolação, normalmente sendo este ponto de origem um defeito/cavidade presente na isolação. A propagação das arborescências elétricas não é algo completamente compreendido, porém acredita-se que a combinação de efeitos térmicos e mecânicos sejam o principal motivo do surgimento deste fenômeno (Gouda e El-Faraskoury, 2011). Em Ahmad et al. (2014) é discutido sobre os fatores que afetam o crescimento das arborescências elétricas, tais como tensão aplicada, campo elétrico e frequência.

No momento em que as arborescências elétricas crescem ao ponto de um ou mais de seus canais penetrarem completamente o material isolante ocorre a falha do isolamento. Como a ocorrência de DPs e as arborescência elétrica estão correlacionadas, esses defeitos podem ser reconhecidos pelos métodos de medição e detecção de DPs. Porém, existem também as arborescências em água ou apenas arborescências.

Diferentemente das arborescências elétricas, as arborescências não necessitam do desenvolvimento de descargas parciais para ocorrerem. Como o nome (“*water trees*”) sugere, esse tipo de degradação está associado a mecanismos de migração de água contendo íons na presença de campo elétrico, envolvendo também fenômenos de oxidação e quebra de cadeia (Lima, 2008). As arborescências são mais difusas que as arborescências elétricas e geralmente crescem sobre estresses elétricos menores.

Pelo fato das arborescências não apresentarem DPs, os métodos de medição e detecção de descargas parciais não são adequados para diagnosticar e avaliar este efeito. Por esta razão outros métodos mais adequados como o método do Fator de Dissipação (Tangente de Delta) são aplicados.

### **2.3 Ocorrência de Descargas Parciais em Tensões Alternadas**

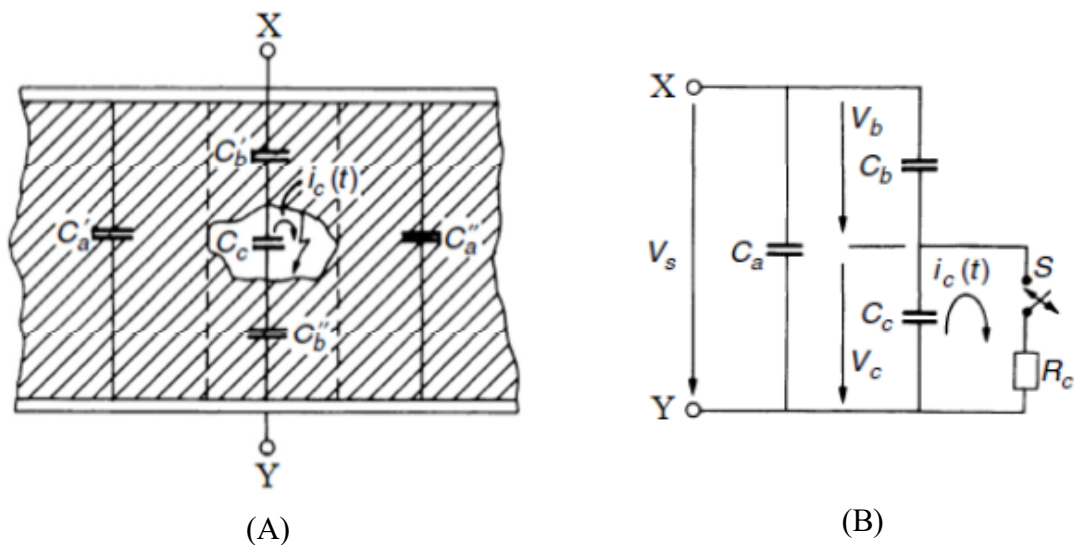
A fim de utilizar as DPs como uma ferramenta de análise precisa em diagnósticos de equipamentos de alta tensão é necessário entender o comportamento deste fenômeno sobre as circunstâncias de funcionamento em tensão alternada. Por isso, são utilizadas aproximações para estudar o comportamento das DPs em cavidades sobre aplicação de tensão alternada.



O modelo conhecido como “*a-b-c*” é uma aproximação simplificada para a compreensão da ocorrência das descargas parciais em tensão alternada via um circuito equivalente (Bartnikas, 2002), Figura 2.4. Este modelo baseia-se no princípio que uma descarga ocorre quando a tensão “ $V_c$ ” (tensão aplicada sobre o vazio/cavidade) atinge o valor da tensão de início, a qual representa o nível de tensão mais baixo em que é detectada a atividade de DPs. Após a extinção da descarga a tensão sobre o vazio recomeça a aumentar. Esta tensão é dada pela superposição do campo elétrico aplicado e do campo formado pelas cargas superficiais deixadas na parede do vazio após a última descarga. Quando a tensão sobre o vazio atinge novamente a tensão de ruptura uma nova descarga ocorre. Este efeito repete-se diversas vezes durante cada meio ciclo da tensão alternada e, desta forma, grupos regulares de descargas recorrentes são encontrados (Bartnikas, 2002; Kreuger, 1989).

A desvantagem deste modelo é fato que ele não leva em consideração fatores como a geometria, localização do vazio e presença de carga espaciais. Por isso, a simples aproximação de um circuito equivalente não retratará a diversidade e variedade dos processos que ocorrem em um sistema real.

Figura 2.4 – Modelo *a-b-c* para DPs em tensões alternadas. (A): Esquemático de um isolante contendo uma cavidade. (B): Circuito equivalente.



Fonte: Gutnik (2014). Modificado de Kuffel et al. (2000).

Diversos outros modelos baseados como o apresentado em Danikas e Adamidis (1997) surgiram na tentativa de aprimorar o modelo *a-b-c*. Porém uma aplicação mais

próxima da realidade é encontrada no modelo por aproximação de campo elétrico (Edin, 2001).

O modelo por aproximação de campo considera uma cavidade esférica cercada por um material dielétrico, no qual é aplicada uma tensão alternada por meio de dois eletrodos metálicos. Inicialmente, o sistema é considerado livre de cargas superficiais e espaciais e o campo elétrico na cavidade é aproximadamente uniforme e varia proporcionalmente a tensão aplicada. A partir do momento que as condições de ocorrência de DPs são satisfeitas, a primeira descarga ocorre. Então as cargas liberadas neste evento são aceleradas pelo campo local para as paredes da cavidade, onde são depositadas. Fazendo que o campo local passe a ser a soma do campo devido a tensão aplicada pelos eletrodos metálicos e do novo campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais.

A partir desse ponto, as próximas descargas serão regidas pelo campo total no interior da cavidade, de forma que a descarga seguinte ocorrerá quando o campo de início for atingido novamente. Portanto, caso as cargas depositadas na parede da cavidade gerem um campo interno suficientemente grande, novas descargas podem ocorrer mesmo se a tensão aplicada for nula. Portanto, o campo gerado pelas cargas depositadas na parede da cavidade provocam uma mudança na atividade de DPs de modo que o processo passa a ser regido pelo campo elétrico local e não mais pela tensão aplicada (Edin, 2001).

## **2.4 Evolução das Descargas Parciais**

Devido ao fato da utilização das DPs como uma ferramenta de diagnóstico da isolação de equipamentos de alta tensão ser de extrema importância para planejamentos de manutenção preditiva e preventiva, além da necessidade de se manter um alto nível de confiabilidade desses equipamentos, exige-se que seja conhecido como tal fenômeno evolui aos longo do tempo.

Como mencionado anteriormente, devido ao processo de erosão que pode ocorrer nas cavidades e processo de degradação devido a estresses térmicos e mecânicos, as cavidades tendem a aumentar de tamanho e conseqüentemente aumentar a ocorrência de DPs. O principal parâmetro de análise utilizado em diagnósticos via DPs é a carga aparente. A carga aparente, normalmente referida como a letra “ $q$ ”, é a magnitude de uma descarga parcial em um sistema isolante expresso em termos de carga transferida que é

medida nos terminais do sistema de medição. A evolução do defeito geralmente significa no aumento na carga aparente, porém certas ocasiões devem ser analisadas com cuidado.

Em Renforth et al. (2017) é realizado um estudo na utilização das DPs no monitoramento de redes de alta tensão e foi constatado que um grupo de quatro motores de média tensão todos conectados a diferentes subestações apresentavam tendências similares ao longo do período de 36 meses de análises. A grande variação nas atividades de DPs indicavam que os motores estavam sujeitos a flutuações macrosazonais e por isso é necessário o estudo de tendências ao longo do tempo para confirmar o que pode ser um comportamento normal ou anormal para o sistema.

Um exemplo é o fenômeno conhecido como *Swarming pulsive micro discharges* (SPMDs), o qual é um efeito que pode ocorrer pouco antes da ruptura do dielétrico. Tal efeito é caracterizado pelo decaimento anormal dos valores de descargas aparentes em conjunto com o aumento no número de pulsos ou taxa de repetição (Ehara et al., 2000).

Figura 2.5 - Exemplo do fenômeno SPMDs.



Fonte: Gutnik (2014).

Estudos sobre o impacto das SPMDs em materiais isolantes pode ser encontrado em Danikas (1997) e outro estudo sobre a evolução da carga aparente em cabos isolados XLPE e EPR pode ser encontrado em Arief et al. (2014), onde o aumento da carga aparente corresponde diretamente a degradação do isolamento e como o fenômeno das SPMDs influencia um diagnóstico. Esse tipo de informação é de grande importância para a avaliação da condição do isolamento, mas isto não significa que um equipamento deve ser retirado de operação pela queda na intensidade de DPs, mas indica que uma investigação mais profunda deve ser realizada pra averiguar a gravidade do problema.

## 2.5 Considerações Finais

Desta forma, foi apresentado neste capítulo os principais fundamentos das descargas parciais, incluindo a definição das descargas, como podem ser classificadas e as diferenças entre as descargas internas, superficiais e externas. Também foi apresentado como as descargas vêm a ocorrer em tensão alternada e quais são as tendências esperadas da evolução deste fenômeno.

Destaque especial para o fenômeno das SPMDs, o qual é identificado com o comportamento anormal de dois parâmetros das DPs, a descarga aparente e taxa de repetição. É relatado como este fenômeno pode ser um indicador da proximidade da falha do material isolante e tal informação é de grande importância para o diagnóstico de equipamentos elétricos. Porém a ocorrência deste fenômeno não é garantida sempre que o material isolante está próximo da falha, por isso deve-se analisar com cautela como tais parâmetros se comportam ao longo do tempo, para que o diagnóstico obtido seja o mais preciso possível.

## Capítulo 3:

# **Métodos de Medição e Detecção de Descargas Parciais**

Detectar a presença de descargas parciais (DPs) em um equipamento é uma forma de verificar a condição de seu isolamento, sendo essas descargas causadas por imperfeições no dielétrico e intensificam-se à medida que o mesmo se degrada, o que se dá progressivamente, podendo levar a uma futura falha do equipamento devido a ruptura do dielétrico.

Dentre os métodos de detecção das DPs, o mais comum é o elétrico, alternativas de circuitos de ensaio e terminologia apropriada para realizar medição podem ser encontrados em normas como a IEC 60270 (2000) e IEEE P1434 (2014). Outros métodos, como os métodos acústico, óptico e químico são utilizados como complemento da detecção elétrica.

O método elétrico é uma técnica que inclui em um circuito elétrico tanto o instrumento de medição quanto o equipamento com ocorrência de DPs a ser estudado. Existem três circuitos básicos apresentados na norma IEC 60270 (2000), os quais são referenciados como circuitos convencionais ou métodos convencionais de medição de DPs, os mesmos serão apresentados com mais detalhe adiante.

Existem também opções de sensores de alta frequência (HF), muito alta frequência (VHF) ou ultra alta frequência (UHF) para o método elétrico. Estes sensores podem ser indutivos ou capacitivos, captam sinais elétricos emitidos por eventos de DPs com frequências de até 3 GHz. Em especial, para cabos elétricos isolados é comum a utilização de transformadores de corrente de alta frequência, ou sensores HFCT, os quais permitem a localização exata do local de falta pela análise do pulso de DPs.

O método acústico é baseado no ruído audível ou ultrassônico gerado pelas DPs, ou seja, ruídos presentes no ar ou vibrações em materiais adjacentes a fonte de DPs. Sensores acústicos são comumente utilizados para localizar as fontes das DPs por meio da detecção das ondas de som geradas pelas mesmas (Koltunowicz et al., 2016). Este método pode ser utilizado para localizar descargas em subestações isolados a gás e equipamentos com isolamento a óleo como transformadores e cabos elétricos. Duas grandes vantagens deste método, são a sua fácil instalação e imunidade a interferência

eletromagnética; no entanto, são menos sensíveis, pois são mais susceptíveis a uma possível interferência de ruídos acústicos externos.

O método químico de detecção de DP é comumente utilizado para equipamentos com isolamento a óleo, visto que a presença de DPs pode gerar novos componentes químicos por meio de reações. Este método é baseado na análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, sendo, portanto, limitado a equipamentos que empregam este tipo de material isolante, como transformadores. É importante ressaltar que este método não é capaz de mensurar a carga aparente da descarga parcial, nem possibilita a localização de seu ponto de origem.

Por sua vez, existem duas formas de se aplicar o método óptico para a detecção de DPs, a detecção óptica direta dos sinais que são produzidos durante um pulso de DPs e a detecção híbrida opto-acústica, onde a onda acústica causada pela descarga parcial influencia fibras ópticas que são colocadas no interior do instrumento de medição (Wu *et al.*, 2015). Uma aplicação ilustre do método ótico é encontrada em Zhu *et al.* (2020), onde foi realizado, em laboratório, um estudo que aplica uma técnica conhecida como “*Eulerian Video Magnification*” para processar dados coletados por uma câmera e desta forma, detectar, localizar e monitorar DPs em cabos isolados.

### 3.1 Metodologias de Medição e Diagnóstico de Descargas Parciais

As metodologias de medição e diagnóstico de DPs para equipamentos de média e alta tensão podem ser divididas as duas categorias: *online* ou *off-line*. As metodologias *online* são aquelas onde as medições são realizadas com o sistema em operação, no caso de diagnóstico de cabos isolados, existem sensores no mercado que podem até serem instalados sem realizar o desligamento do sistema. As metodologias *off-line* são realizados com o sistema desligado, podendo ser no próprio local da instalação, com o uso de uma fonte auxiliar ou também poder ser realizadas em laboratório, dependendo da aplicação.

Os diagnósticos *off-line*, embora possuem a desvantagem de ser necessária a interrupção da rede para a realização das medições proporcionam sinais com um nível de ruídos consideravelmente mais reduzido. Dentre os métodos mais comuns de medições *off-line*, estão os métodos da “Tensão alternada amortecida” (*Damped AC Voltage*) (Takahashi *et al.*, 2008; Gulski *et al.*, 2008; Wester, 2004) e o método da “Tensão de

frequência muito baixa” (*Very Low Frequency Voltage*) (Gulski *et al.*, 2008; Neir *et al.*, 2019; Gross e Herbig, 2000).

O foco nesta seção será apresentar os métodos dentro destas metodologias que são utilizados para a detecção e diagnóstico de DPs em cabos elétricos isolados de média e alta tensão, juntamente com cada circuito equivalente e seus componentes, além do tipo de tensão de energização e as principais vantagens de cada método.

### **3.1.1 Método Convencional**

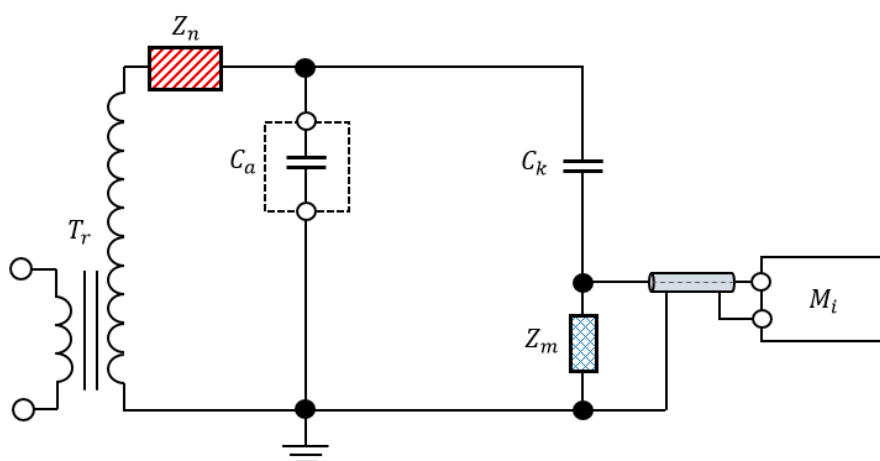
Os métodos convencionais de diagnóstico de DPs são normalmente realizados com tensões alternadas de frequências entre 20 e 400 Hz, e amplitudes que podem chegar ao valor de 1,7 vezes a tensão nominal fase-terra do objeto em análise, para o período de uma hora de teste. Dentre os circuitos básicos de testes recomendados pela IEC 60270, o circuito de detecção direta e o circuito de detecção em ponte estão entre os mais comumente utilizados. O circuito de detecção direta é um método preciso com circuito de fácil calibração, baseando-se na conexão em série do elemento isolador em teste com uma impedância de medição, na qual tem-se um amplificador e um circuito de medição conectados para a detecção das DPs (Refaat e Shams, 2018). Este circuito também possui um capacitor de acoplamento para facilitar a transferência de descargas por meio de um caminho de baixa impedância para as altas frequências.

Por outro lado, o circuito de detecção em ponte, Figura 3.1 (C), necessita da utilização de um objeto de teste idêntico para formar o circuito em ponte, de forma que o balanço possa ser alcançado pela variação das impedâncias nas laterais do circuito. Este método possui a vantagem de suprimir ruídos vindos da fonte, o que faz este método ainda mais preciso que um circuito de detecção comum. Porém, a aplicação deste método é complicada pela necessidade de objetos de testes idênticos e sensores especiais para detecção das DPs (Refaat e Shams, 2018).

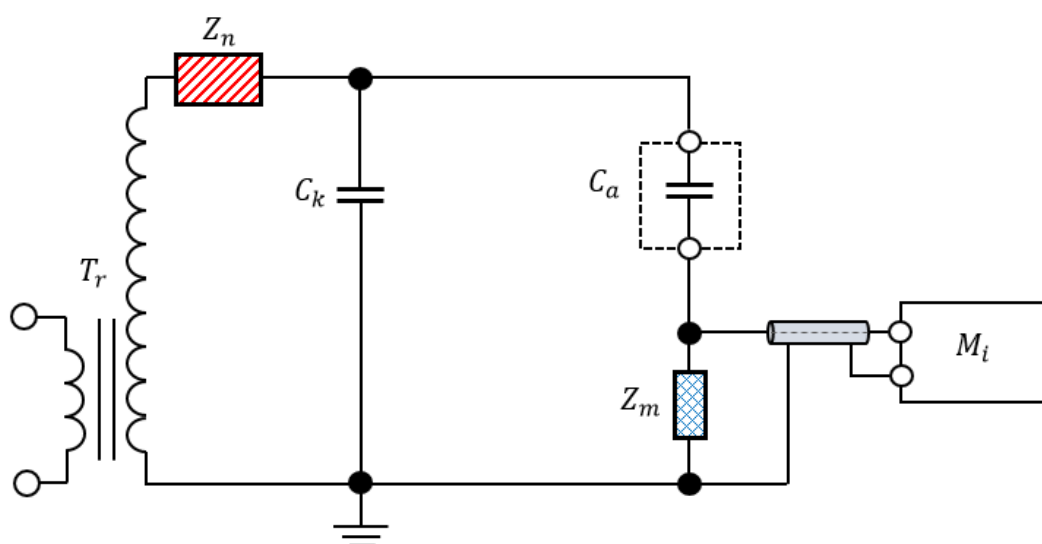
A Figura 3.1 (A) apresenta o circuito de detecção do método convencional com a impedância de medição  $Z_m$  em série com o capacitor de acoplamento  $C_k$ . A impedância  $Z_n$  é um filtro de ruído que tem a função de bloquear ruídos provenientes do lado de alta tensão do transformador, além de fornecer um caminho de alta impedância para os pulsos de DPs, promovendo o fluxo destes para a impedância de medição.

Na Figura 3.1 (B) apresenta o circuito de detecção do método convencional com a impedância de medição  $Z_m$  em série com o terra do objeto de teste. Este circuito possui uma sensibilidade de detecção de DPs mais alta que o circuito anterior, porém requer uma interrupção da conexão de terra no aparato de alta tensão sob teste, o que nem sempre será possível na prática. Também é necessário utilizar uma resistência de proteção para a impedância de medição, para o caso que ocorra a falha do dielétrico do cabo em teste uma corrente extremamente elevada passará pelo cabo e também pela impedância  $Z_m$ , correndo o risco de danificar o componente.

Figura 3.1 – Circuitos básicos para medição de DPs.

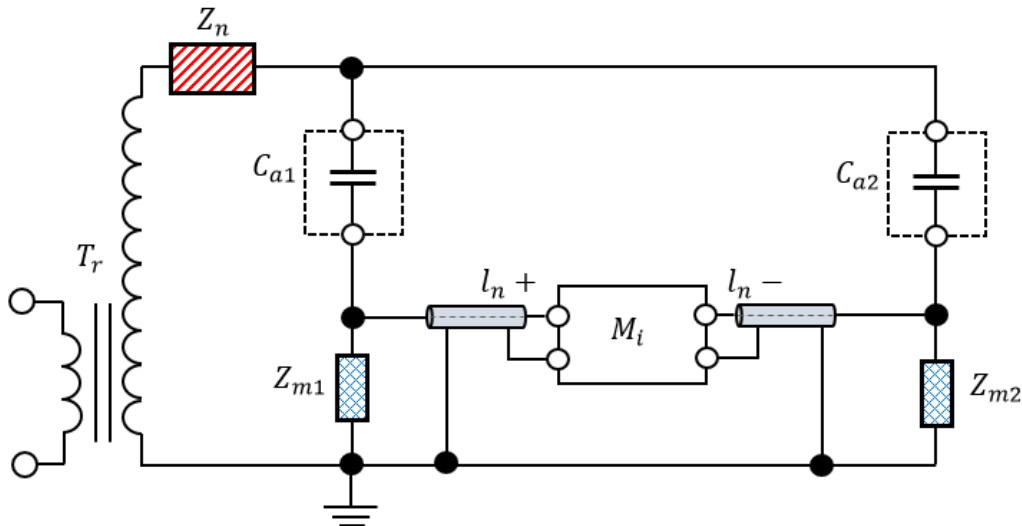


(A): Impedância de medição  $Z_m$  em série com o capacitor de acoplamento  $C_k$



(B): Impedância de medição  $Z_m$  em série com o objeto de teste  $C_a$





(C): Ponte balanceada utilizando o braço  $(C_{a2}, Z_{m2})$  como referência em paralelo com o braço de teste  $(C_{a1}, Z_{m1})$

Fonte: Gutnik (2014). Modificado.

Nas figuras apresentadas,  $T_r$  representa o transformados de teste em alta tensão,  $C_a$  representa a capacitância do objeto de teste,  $C_k$  representa o capacitor de acoplamento,  $Z_n$  representa o filtro de ruído,  $Z_m$  representa a impedância de medição e  $M_i$  representa o equipamento de medição de DPs. Dentre estas configurações, o circuito da figura 3.1 (A) é o mais utilizado pois o capacitor de acoplamento  $C_k$  impede que a tensão em frequências industriais seja transferida para a impedância de medição  $Z_m$ , e assim torne-se num caminho preferencial para os pulsos de corrente DPs (Gutnik, 2014).

### 3.1.2 Damped AC Voltage (DAC)

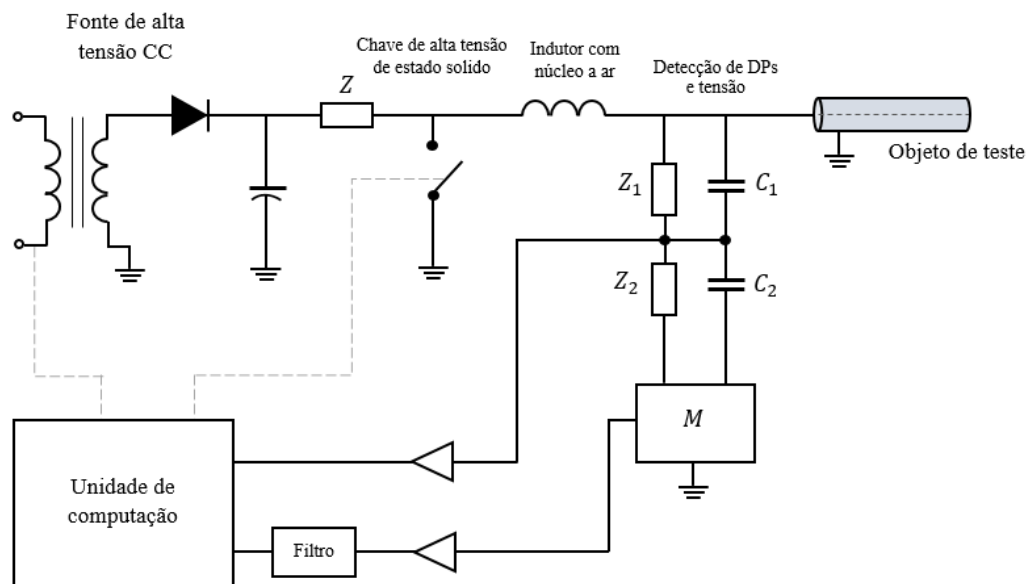
Este método utiliza uma tensão amortecida como tensão de excitação para a detecção de DPs. O esquema de energização do cabo, Figura 3.2, utiliza uma fonte de corrente contínua que então é desconectada para a conexão de um indutor externo, gerando assim um circuito RLC, e conseqüentemente, uma onda oscilatória amortecida de tensão. Devido à alta velocidade de chaveamento, praticamente nenhum distúrbio e/ou interferência é perceptível quanto à detecção dos pulsos das DPs (Wester, 2004).

Padrões de DPs podem ser gerados de múltiplas seqüências de tensões alternadas amortecidas. Tais padrões são similares aos padrões obtidos sob 50/60 Hz para determinar

a condição da isolamento do cabo. A Figura 3.3 mostra o formato de onda da tensão utilizada para este método.

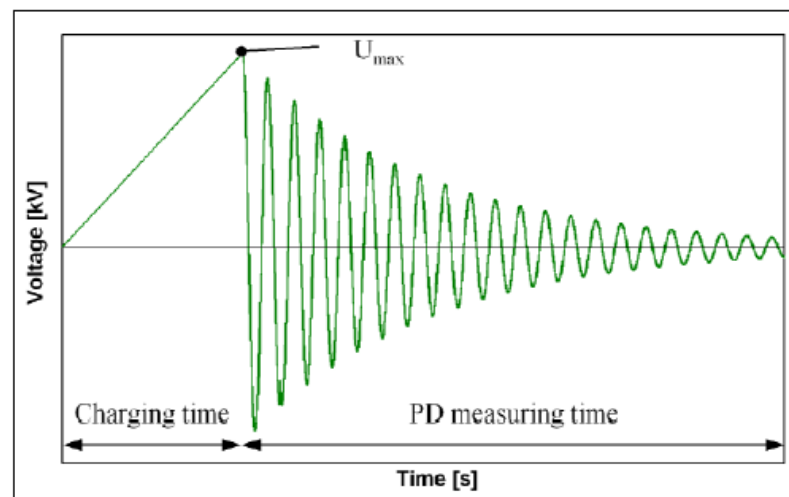
Os métodos que utilizam tensões DAC para a detecção e localização de DPs em cabos são conhecidos como Análises de Descargas Complexas (CDA) (Lemke *et al.*, 1996) e Sistema de Teste com Tensão Oscilatória (OWTS) (Zhou *et al.*, 2012; Petzold e Beigert, 2005).

Figura 3.2 – Circuito de medição para o método DAC.



Fonte: Wester (2004). Modificado.

Figura 3.3 - Forma de onda da tensão utilizada no método DAC.



Fonte: Wester (2004).

A fim de se aplicar a metodologia de forma efetiva, deve-se seguir um protocolo de diagnósticos *off-line* através do método em questão, cujos passos recomendados são:

- Calibração do sistema de acordo com a norma IEC 60270 podendo ser realizada em apenas uma fase, já que a diferença de capacitância e comprimento entre uma fase e as demais será mínima;
- Medição de ruídos/distúrbios externos, realizada em baixa ou sem tensão;
- Aplicar tensão de teste por meio de incrementos (ex.: degraus de 1 kV pico) até obter a tensão de início das descargas parciais;
- Coletar as diferentes propriedades das descargas parciais para tensão de início encontrada;
- Incrementar a tensão de teste até o valor correspondente a duas vezes a tensão fase-terra nominal do equipamento em análise, coletando-se as diferentes propriedades das descargas parciais (tensão de início, magnitude, padrões, etc) para cada nível de tensão aplicada;
- Repetir o processo para as demais fases do sistema;
- Análise da propagação do pulso no cabo para a localização do defeito ao longo de sua extensão. Ou seja, a partir da análise da diferença entre o tempo de propagação dos pulsos incidentes e os pulsos refletidos, pode-se encontrar o ponto de origem das DPs. Tal método é conhecido como Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR - *Time Domain Reflectometry*);

Algo a levar em consideração para a aplicação é a dependência da frequência da tensão aplicada em relação a capacitância natural do cabo. A Tabela 3.1 apresenta exemplos das frequências de testes para cabos de 10 kV. Para classes de tensões maiores, a frequência será ligeiramente maior por possuir valores menores de capacitância.

Tabela 3.1 – Exemplos típicos de frequência de teste para cabos de 10 kV de 3 núcleos.

Comprimento do cabo (m)	Cabos PILC (400 pF/m)	Cabos XLPE (350 pF/m)
100	890 Hz	951 Hz
500	398 Hz	426 Hz
1500	230 Hz	246 Hz
5000	151 Hz	161 Hz
10000	103 Hz	110 Hz

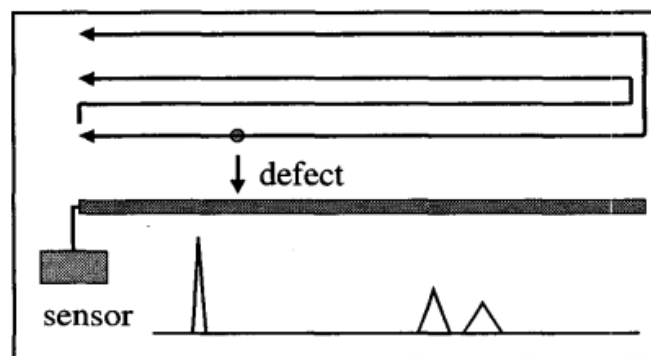
Fonte: Wester (2004).

### 3.1.3 Very Low Frequency Voltage (VLF).

O método de diagnóstico VLF utiliza uma tensão com frequência de 0,1 Hz para energizar o cabo que esta desconectado da rede, sendo que, desta forma, as DPs são detectadas via sensores posicionados no término do cabo. A principal desvantagem deste método é o limite máximo de comprimento do cabo (cerca de 4 km), essa limitação ocorre devido à atenuação sofrida pelos pulsos ao longo de sua viagem pelo cabo (Wester, 2004). As principais vantagens da metodologia VLF de teste são a facilidade de operação, alta sensibilidade e uma boa equivalência com outros métodos (Yang et al., 2014).

A utilização do método VLF é comum tanto para descargas parciais como para a conhecida Tangente de Delta ou TanDelta (TD), sendo utilizada para diagnóstico do nível de estresse dielétrico na isolação. O diagnóstico TanDelta, combinado com a ferramenta TDR e com o diagnóstico de DPs, o que permite a localização dos pontos mais frágeis e suscetíveis a falhas ao longo do cabo em virtude do estresse de tensão reduzido aplicado durante o diagnóstico VLF (Neir et al., 2019).

Figura 3.4 – Princípios da reflexão baseado no teste de DPs em VLF



Fonte: Neir et al. (2019).

É importante ressaltar que o diagnóstico de cabos por VLF difere do teste de suportabilidade por VLF. O objetivo do primeiro é avaliar a condição do cabo sem submetê-lo desnecessariamente a um estresse dielétrico que possa reduzir o seu tempo de vida. Por outro lado, o teste de suportabilidade/resistência VLF utiliza tensões de testes muito maiores, com o risco, portanto, de conduzir o cabo à falha em eventuais pontos fracos/deteriorados.

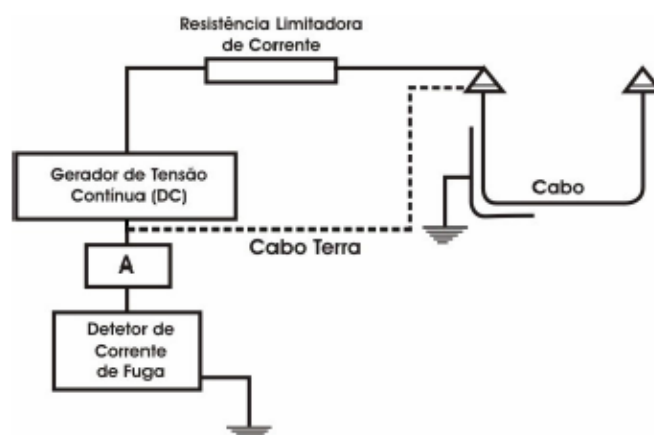
### 3.1.4 Testes em Corrente Contínua

Isolações em materiais sólidos e líquidos possuem características de DPs muito diferentes quando testados em tensão contínua, em comparação com os testes em tensão alternada. Por esta e outras razões, esta metodologia de diagnóstico é raramente utilizada.

Indicadores como a tensão de início e tensão de extinção não são facilmente determinados em testes com tensão contínua. As DPs tendem a ocorrer durante a aplicação inicial da tensão ou durante a troca da magnitude da tensão de teste, e tornam-se intermitentes ao restante da distribuição da tensão.

Uma alternativa ao diagnóstico de cabos em tensão contínua via DPs é a medição da corrente de fuga. Esse método foi introduzido no passado como um método de diagnóstico de cabos dielétricos laminados (Gulski et al., 2008). E consiste basicamente da aplicação de uma tensão contínua com valor menor que a tensão aplicada em testes de suportabilidade, com a medição simultânea da corrente de fuga do circuito. A técnica é realizada de maneira *off-line* e o cabo deve ser descarregado no período entre testes e antes do religamento do sistema de corrente alternada, de forma a evitar um estresse aumentado na isolação do cabo. Embora simples e não utilize parâmetros de avaliação relacionados a DPs, este método fornece uma avaliação geral da condição da espécie analisada e, por meio de testes periódicos, são gerados dados históricos que podem ser utilizados para influenciar a tendência de testes futuros.

Figura 3.5 – Circuito para medição da corrente contínua de fuga.



Fonte: Lima, 2008. Modificado de Bolarin *et al.*, 2001.

### ***3.1.5 Método com Eulerian Video Magnification***

Este método foi aplicado em Zhu *et al.* (2020) e se baseia em utilizar uma câmera de alta resolução para captar as vibrações causadas pelo sinal DP em um cabo isolado de 35 kV. Embora o método apresente resultados positivos quando se trata da localização dos defeitos presentes no cabo, principalmente para situações onde a câmera está posicionada de 5 a 10 metros do cabo, a viabilidade desta metodologia ainda é limitada para a aplicação em campo, pelo fato de que o espaço e iluminação de instalações subterrâneas serem bastantes limitados para o posicionamento de câmeras, além do fato que a quantidade de câmeras necessárias para cobrir um comprimento razoável do cabo seria alta, juntamente com o alto poder de processamento requerido para utilizar tal técnica.

### ***3.1.6 Método de detecção com câmera acústica***

A detecção de DPs via câmera acústica é realizada por meio de um equipamento composto por 124 microfones, câmera e um sistema de inteligência artificial para identificar e localizar as DPs (Suwanasri *et al.*, 2021). O sensor pode captar sinais na faixa de frequência de 2 kHz até 35 kHz. A técnica se mostra útil para a aplicação *on-site* e *online* de diagnósticos de linhas de distribuição aéreas, principalmente pela praticidade da aplicação.

### ***3.1.7 Diagnósticos online vs off-line***

Como discutido neste capítulo, as metodologias de detecção e medição de DPs podem ser divididas em dois segmentos: *online* e *off-line*. Entre os métodos citados anteriormente, pode-se extrair diversas vantagens e desvantagens da aplicação de cada um. Com isso, é apresentado pelas tabelas 3.2 e 3.3 a compilação das vantagens e desvantagens dos principais métodos de medição de DPs para as metodologias *online* e *off-line* respectivamente.

Tabela 3.2 – Vantagens e Desvantagens da aplicação de métodos *online* para medição de DPs

Descargas parciais <i>ONLINE</i>		
	Vantagens	Desvantagens
60 Hz AC Sem Desenergizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonte secundaria de tensão ou outro equipamento de energização não são necessários</li> <li>- Teste com mesma forma de onda, nível de tensão e frequência que o teste dos fabricantes</li> <li>- Fácil monitoramento a longo períodos de tempo</li> <li>- Teste realizado com a temperatura de operação do cabo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não detecta descargas que aconteceriam a tensão acima da nominal</li> <li>- Nível de sensibilidade do teste não é tipicamente possível de ser obtido</li> <li>- Requer um técnico especialista para se obter os dados e um engenheiro especialista para interpretação dos resultados</li> <li>- O espaço e tipo de instalação podem ser obstáculos que impossibilitam a medição em certos pontos do circuito</li> <li>- Os resultados podem ser apresentados de diversas formas, dificultando a interpretação</li> <li>- Não é possível combinar com outros métodos de diagnóstico</li> </ul>

Tabela 3.3 – Vantagens e Desvantagens da aplicação de métodos *off-line* para medição de DPs

Descargas parciais <i>OFF-LINE</i>		
	Vantagens	Desvantagens
Frequência nominal AC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teste com forma de onda e nível de tensão semelhante com o teste do fabricante</li> <li>- Calibração e sensibilidade podem ser estabelecidas no menor nível de DPs detectável</li> <li>- Tensões maiores que a tensão nominal <math>U_0</math> podem ser aplicadas</li> <li>- PDIV* e PDEV* podem ser mensuradas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipamento necessário para realizar o teste é grande, pesado e caro</li> <li>- A aplicação de tensões maiores que <math>U_0</math> podem causar degradações ainda maiores no cabo</li> <li>- A aquisição de dados realizada em um curto espaço de tempo (&lt; 1 min) pode ser insuficiente para detectar as DPs</li> </ul>

VLF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipamento é de fácil manuseio</li> <li>- Tensões acima de <math>U_0</math> podem ser aplicadas</li> <li>- PDIV* e PDEV* podem ser detectadas</li> <li>- Resultados podem ser interpretados com maior facilidade que outros métodos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circuito deve ser desenergizado</li> <li>- Não replica a frequência e nível de tensão de operação</li> <li>- Aplicação da tensão acima de <math>U_0</math> pode causar degradação ao cabo</li> <li>- Os comportamentos de DPs nestas frequências não são muito bem conhecidos</li> </ul>
DAC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipamento pequeno e de fácil manuseio</li> <li>- As medições podem ser feitas em frequências próximas a frequência de operação</li> <li>- PDIV* e PDEV* podem ser detectadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circuito deve ser desenergizado</li> <li>- Não replica a frequência e nível de tensão de operação</li> <li>- Requer um técnico especialista para se obter os dados e um engenheiro especialista para interpretação dos resultados</li> <li>- Aplicação da tensão acima de <math>U_0</math> pode causar degradação ao cabo</li> <li>- Comparações entre diferentes circuitos são difíceis devido ao fato da frequência variar em função da impedância do sistema</li> <li>- Os comportamentos de DPs nestas frequências não são muito bem conhecidos</li> </ul>

Na Tabela 3.3, dois parâmetros importantes são apresentados, estes são a PDIV e a PDEV, as quais representam respectivamente a tensão de início e tensão de extinção das descargas parciais, ou seja, a PDIV ou tensão de início é o valor mais baixo tensão que existe atividade de DPs e a PDEV ou tensão de extinção é o valor mais baixo de tensão no qual as DPs param de ser detectadas. Mas detalhes sobre estes parâmetros serão discutidos na seção 4.3 do Capítulo 4.

### 3.2 Considerações Sobre o Tempo de Medição para Diferentes Tipos de Testes

Entre os diversos métodos de medição/detecção de descargas parciais, diferentes tipos de medidor/sensor que podem ser utilizados, além de metodologias com diferentes



frequências e formas de onda da tensão aplicada, existem diversas opções de tempo de ensaio, tempo de medição, além de diferentes níveis de tensão que podem ser utilizados.

Por isso algumas metodologias possuem em seus protocolos/recomendações de ensaio presentes com mais consistência, como o método DAC mencionado anteriormente, porém, para outros métodos existe um espaço para ajustes. Analisando apenas testes off-line que utilizam tensão senoidal em frequência nominal (50 ou 60 Hz), são apresentados a seguir, formas de aplicar a tensão e as possíveis durações do teste.

Em casos onde um novo cabo é instalado e existe a necessidade de realizar um teste on-site de suportabilidade, recomenda-se realizar juntamente ao teste de suportabilidade a medição de DPs, para que seja extraído mais informações sobre a condição do cabo. Para tais situações, o nível de tensão e a duração do teste segue os valores da Tabela 3.4, apresentada em Gouda e El-Faraskoury (2011), de acordo com as normas IEC 60840 e IEC 62067.

Tabela 3.4 – Tensões padrões para testes pós instalação de cabos isolados de alta tensão.

	Rated Voltage (kV)	U0 (kV)	Test duration 60 min		Test duration 24h	
			Variant 1			Variant 2 (at 1.7 U0)
			Utest (kV)	N * U0	Utest (kV)	Utest (kV)
IEC 60840	45-47	26	52	2		
	60-69	36	72	2		
	110-115	64	728	2		
	132-138	76	132	1.73		
	150-161	87	150	1.73		
IEC 62067	220-230	127	180	1.42	216	127
	275-287	160	210	1.31	272	160
	330-345	190	250	1.32	323	190
	380-400	220	260	1.18	374	220
	500	290	320	1.1	493	290

Fonte: Gouda e El-Faraskoury (2011).

Análoga a Tabela 3.4, é apresentado a Tabela 3.5 (Zhang, 2018), a qual segue a norma GB 50150-2006 (*Electric equipment installation engineering standard for hand-over test of electric equipment*).

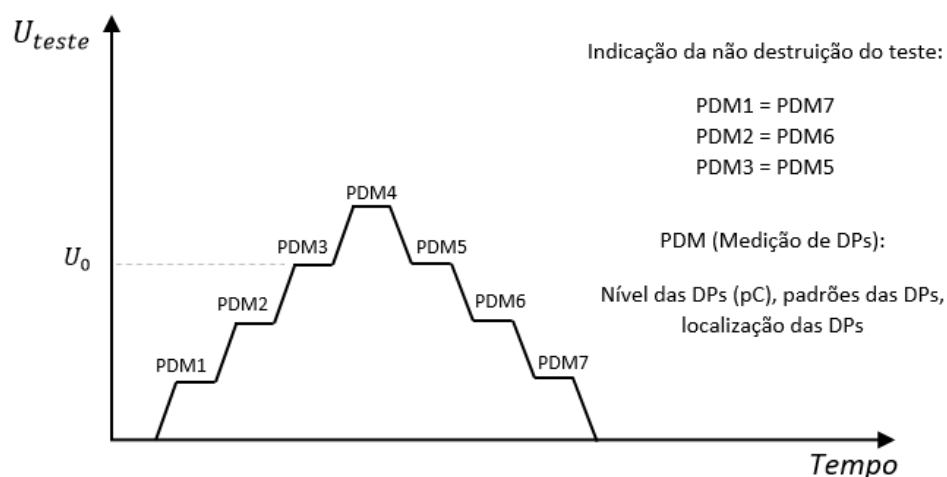
Tabela 3.5 – Tensões e tempo de ensaio para teste de suportabilidade por tensão alternada de cabos de alta tensão.

Tensão nominal $U_0 / U$ (kV)	Tensão de Teste	Tempo (min)
18 / 30 e menores	2.5 $U_0$ (2 $U_0$ )	5 (60)
21 / 35 ~ 64 / 110	2 $U_0$	60
127 / 220	1.7 $U_0$	60
190 / 330	1.7 $U_0$	60
290 / 500	1.7 $U_0$	60

Fonte: Zhang (2018). Modificado.

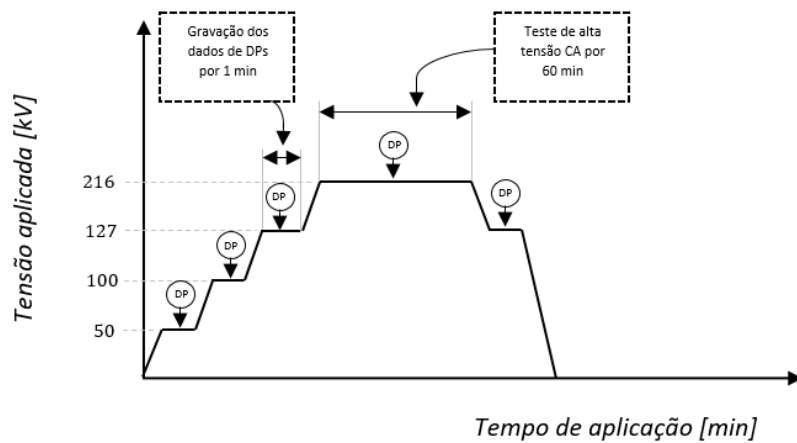
Comparando o valor de 1,7  $U_0$  e duração de 60 minutos percebe-se que são comuns para ambas tabelas, e o mesmo é mencionado também em Gulski *et al.* (2008), onde o autor menciona que os testes para tensão de 1,7  $U_0$  podem ter duração de 10 a 60 minutos, e para tensão de  $U_0$  duração de 24h. Os mesmos valores aparecem em El-Fraskoury *et al.* (2012), os autores utilizam modelos de testes baseados em incrementos de tensão até que a tensão atinja o valor de 1,7  $U_0$ , o processo é mostrado pelas figuras 3.6 e 3.7.

Figura 3.6 – Esquemático do teste não destrutivo para medição de DPs.



Fonte: Gulski *et al.* (2008).

Figura 3.7 - Exemplo de tensões de teste utilizadas para diagnóstico em um cabo de 220kV.

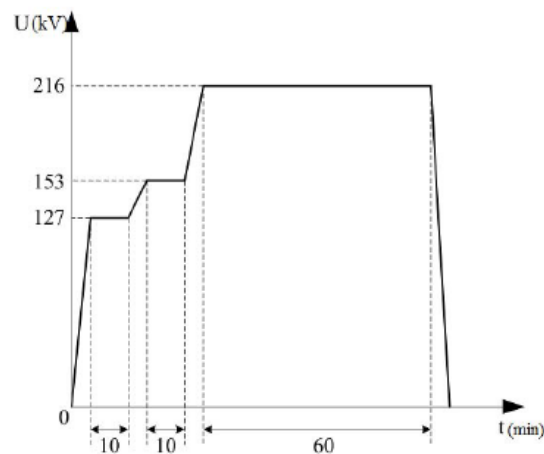


Fonte: El-Fraskoury *et al.* (2012).

Em El-Fraskoury *et al.* (2012) é mencionado dois testes que utilizam o sistema de incremento de tensão, nos quais os dados de DPs são gravados por 1 ou 2 minutos, porém o autor não deixa claro qual a duração total que o cabo fica energizado para cada nível de tensão utilizado.

De maneira semelhante ao apresentado pela figura 3.7, foi utilizado em Zhang *et al.* (2018) uma metodologia de teste com incrementos de tensões, porém apenas dois níveis de tensão menores que  $1,7 U_0$  foram utilizados, e por uma duração de 10 minutos cada, como demonstrado na figura 3.8.

Figura 3.8 - Outro exemplo de tensões de teste utilizadas para diagnóstico em um cabo de 220kV



Fonte: Zhang *et al.* (2018).

Outros exemplos podem ser encontrado em Gouda e El-Faraskoury (2011), onde é relatado um teste realizado em um cabo XLPE de 66kV em que a tensão de teste utilizada foi gradualmente elevada até 1,75 U<sub>0</sub> e mantida neste nível por 10 segundos, então a tensão é diminuída de forma devagar até o valor de 1,5 U<sub>0</sub>. O mesmo trabalho mostra outro teste em um cabo XLPE de 12/20 kV, onde foi utilizado um sistema de incremento de tensão de 2 kV até o valor de 24kV (2U<sub>0</sub>), porém o autor não cita o tempo de teste para cada nível de tensão aplicado.

Em um outro estudo, realizado por Polyakov *et al.* (2020), foram realizados testes em um cabo XLPE de 10 kV, o autor adotou 3 níveis de tensão diferentes para os testes, 8, 10 e 15 kV, para as quais o cabo ficou sobre estresse durante 30 minutos. Isto mostra a possibilidade de ajustes tanto para o período de duração quanto para o nível da tensão aplicada no teste, de acordo com o equipamento possuído e objetivo principal do teste realizado.

Desta forma, foi sintetizado neste capítulo os métodos de detecção e medição de descargas parciais em cabos isolados para as metodologias *off-line* e *online*. O foco foi apresentar os circuitos de medição para os diferentes métodos juntamente com as principais vantagens e desvantagens de cada aplicação. Foram feitas considerações sobre o nível de tensão e tempo de aplicação que podem ser utilizados para a detecção de DPs em um ensaio *on-site* pós instalação, nota-se que existe um grande espaço para ajuste destas grandezas dependendo do objetivo e natureza do teste realizado.

### 3.3 Filtragem e Processamento de Sinais

Um grande obstáculo da análise de descargas parciais para utilização no diagnóstico de equipamentos elétricos é a obtenção dos pulsos DPs sem a presença de ruídos e distúrbios externos sobrepostos. Por este motivo, a implementação de técnicas de classificação, discriminação e reconhecimento de padrões é utilizada para aprimorar a análise dos sinais obtidos, permitindo desta forma que o a apuração dos dados seja realizada da maneira mais eficiente possível e aprimorando o diagnóstico a ser obtido.

Como mencionado anteriormente, a metodologia de medição *online* tende a ser mais suscetível a presença de ruídos sobrepostos aos sinais de DPs devido a possíveis distorções presentes na fonte de tensão que energiza o cabo em teste. Por outro lado, a metodologia *off-line* tende a reduzir este problema, proporcionando sinais com um nível

de ruídos consideravelmente mais reduzido, como por exemplo o método DAC, o qual é considerado livre de distúrbios devido à alta velocidade de chaveamento (Wester, 2004).

Para o processo de tratamento de ruídos, diferentes técnicas foram incorporadas ao longo dos anos, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Transformada de Wavelet. Para a FFT, a análise pode ser realizada a partir de um osciloscópio digital que possui a função FFT integrada em conjunto de um analisador de espectro (Fuhr e Aschwanden, 2017). Após a aplicação da FFT, são eliminados valores acima de um limiar determinado previamente, e então o sinal é reconstituído utilizando a técnica FFT inversa (Yusoff *et al.*, 2016). A Transformada de Wavelet é uma alternativa interessante por realizar a análise de sinais irregulares e não periódicos (Mor *et al.*, 2020). Esta técnica baseia-se na utilização de filtros passa-baixa e passa-alta para produzir uma aproximação do sinal em detalhes, e então, é aplicada a técnica inversa de Wavelet para retornar o sinal sem ruídos (Yusoff *et al.*, 2016).

Devido à complexidade e a dimensão dos dados, podem ser utilizadas técnicas estatísticas para a redução e extração dos dados, como as técnicas *Principal Component Analysis* (PCA) (Wu *et al.*, 2015; Cuenca, 2005), e *t-SNE* (Wu *et al.*, 2015; Van der Maaten e Hinton, 2008). O PCA permite resgatar as informações mais importantes e reduzir o esforço computacional das técnicas aplicadas, é uma técnica de análise multivariável e mineração de dados mais conhecidas e utilizadas, sendo aplicada para descobrir quais subconjuntos de variáveis, dentro do conjunto, formam grupos coerentes que são ortogonais entre si. Os componentes expressos pela técnica são uma compactação significativa dos dados originais, sem perda da informação original. Em Cuenca (2005) pode ser encontrada uma revisão da técnica PCA como compactador de dados de descargas parciais.

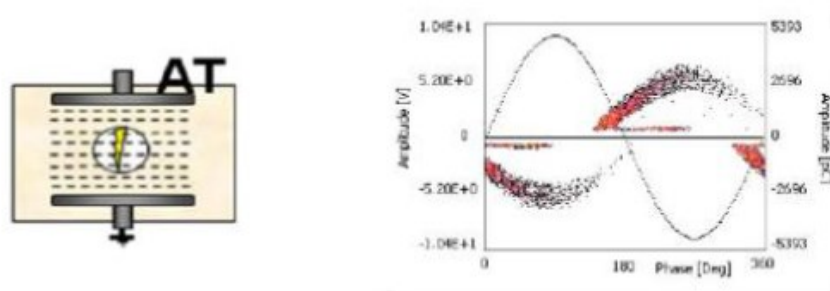
O t-SNE representa uma outra alternativa para a redução da dimensionalidade de dados, desenvolvida para visualização de dados de grande dimensão (Van der Maaten e Hinton, 2008). Esta técnica busca projetar os dados em um espaço de baixa dimensão e reter suas distâncias ou similaridades aos pares.

Em Gutnik (2014) é estudado a utilização de técnicas de deconvolução linear e deconvolução homomórfica para processamento de sinais DPs. Estes são métodos que buscam a obtenção de um sinal de entrada de um sistema linear e invariante no tempo a partir do conhecimento de sua saída e da resposta ao impulso.

A análise dos pulsos de DPs no domínio do tempo é uma técnica que auxilia no reconhecimento do tipo de descarga presente entre descarga interna, externa e superficial,

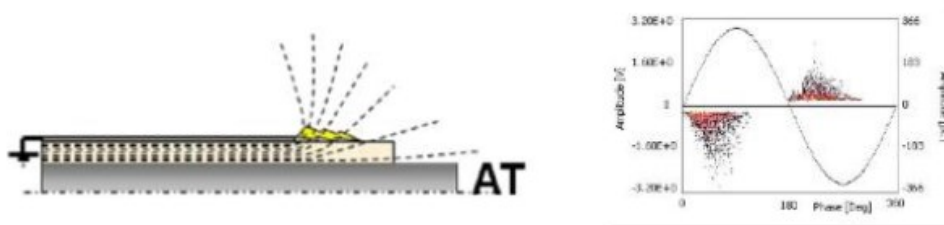
visto que cada um destes tipos de descargas possui posições ao longo da tensão aplicada e taxa de repetições características, como exemplificado nas Figuras 3.9, 3.10, 3.11.

Figura 3.9 – Exemplo de um padrão de DP interna.



Fonte: Grossi *et al.* (2014)

Figura 3.10 – Exemplo de um padrão de DP superficial.



Fonte: Grossi *et al.* (2014)

Figura 3.11 – Exemplo de um padrão DP externa.



Fonte: Grossi *et al.* (2014)

Nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 são apresentados os padrões característicos para as descargas internas, superficiais e externas (também conhecidas como descargas corona). Os padrões são uma forma de apresentar os valores de carga aparente e taxa de repetição

de acordo com o ângulo de ocorrência ( $\phi$ ) da tensão aplicada. A Figura 3.9 mostra que o padrão característico da descarga interna possui um formato mais alongado ao longo da tensão aplicada, com valores mais baixos de carga aparente próximos das passagens da tensão por zero e valores mais altos de carga aparente próximos dos valores de pico da tensão. Da mesma forma, a Figura 3.10 mostra que as descargas superficiais possuem padrões característicos predominantes entre os ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  para o semiciclo positivo da tensão aplicada e entre  $180^\circ$  e  $270^\circ$  para o semiciclo negativo. Por último, a Figura 3.11 mostra o padrão característico para o descarga externa, o qual possui ocorrência apenas no semiciclo negativo da tensão aplicada entorno do ângulo de  $270^\circ$ . Uma particularidade importante é o comportamento destes padrões ao longo do tempo e como os valores representados alteram o formato do padrão conforme o isolamento envelhece, tais características serão discutidas na seção 4.3 do Capítulo 4.

As técnicas que realizam este tipo de análise são conhecidas como técnicas de reconhecimento de padrões, como o sistema *Phase Resolving Partial Discharge Analyser* (PRPDA ou apenas PRPD) (Fuhr e Aschwanden, 2017; Beltle et al., 2012), o qual baseia-se na análise estatística da magnitude da suposta descarga como função da posição da fase de uma tensão aplicada por um determinado período de tempo (Fuhr e Aschwanden, 2017). Este sistema possui a fácil discriminação entre ruídos externos e o sinal DP, já que os ruídos externos não correlacionam com a fase da tensão aplicada, possibilitando a identificação de DP internas com magnitudes menores que o nível de ruídos externos. Porém, para localizar o defeito causador das DPs é necessário utilizar técnicas de localização mencionadas anteriormente.

Outras técnicas de reconhecimento de padrões para DPs, conhecidas como reconhecimento de padrões inteligentes, podem ser separadas em dois tipos: não supervisionada ou supervisionada. Será feito a seguir uma breve menção sobre o princípio de funcionamento de algumas técnicas utilizadas neste processo de reconhecimento de padrões inteligentes.

As técnicas não supervisionadas, também chamadas de agrupadores ou algoritmos de agrupamento de DPs, são algoritmos que dividem os objetos em grupos por similaridades. Em DPs, pulsos de mesma origem tendem a ter características similares (forma de onda e padrões de distribuição pela fase), por esta causa, os algoritmos de agrupamento são utilizados para separação de sinais com múltiplas fontes de DPs.

Uma técnica simples e eficiente de agrupamento de dados utilizada para supressão de ruídos em DPs é o método K-means (Lin, 2011). O método segue uma estrutura de processos iterativos, o que também abre espaço para suas principais limitações, como a possibilidade do resultado convergir para o mínimo local de sua equação e o número inicial de interações e de agrupamentos são dificilmente corretamente determinados, como não se tem ideia no número de fontes de sinais de DP.

O método Fuzzy C-means também é recorrente quanto as técnicas não supervisionadas. A lógica deste método assemelha-se bastante ao método K-means, com a diferença que cada objeto possui um grau difuso de pertencer a cada agrupamento (Wu *et al.*, 2015).

O algoritmo DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) é bem conhecido para agrupamento baseado em densidade dos dados, e segue um princípio de agrupamento por distância de pontos vizinhos, já utilizado para agrupamento de sinais DP. Quando comparado com o método K-means, o algoritmo DBSCAN possui as seguintes vantagens: não necessita de especificar o número de agrupamentos e seus agrupamentos podem ser de diversas formas, não necessariamente linear, o que não ocorre para agrupamentos por K-means.

Entre outros métodos de agrupamento baseados em densidade de dados, a técnica DPC chama atenção por sua simplicidade e custo computacional moderado, permitindo facilmente sua implementação. Em (Heredia e Mor, 2019), tal método foi implementado para separação de DPs.

Técnicas de agrupamento são aplicadas em situações em que não se conhece as origens das descargas parciais e a escolha do método utilizado pode ser baseado em suas vantagens e limitações ou validação dos resultados obtidos.

Quanto aos métodos supervisionados, ou classificadores de DP, são geralmente processos de aprendizado supervisionado em sinais já rotulados, envolvendo a separação entre o sinal DP de ruídos, a discriminação entre múltiplas fontes de DP, análise do estado da isolação e outros diagnósticos que sejam necessários. Entre as diversas técnicas utilizadas para classificadores de DP, as Redes Neurais e Árvores de decisões estão entre as mais populares.

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são técnicas de inteligência artificial inspiradas no sistema nervoso central de animais e que adquirem conhecimento por meio da experiência (Cuenca, 2005). Uma RNA é composta por várias unidades de



processamento de funcionamento bastante simples. Geralmente dividida em uma camada de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas internas que fazem operações sobre os dados locais recebidos pelas suas conexões.

RNA seguem uma regra de treinamento, onde os pesos das conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Particularmente, o algoritmo de retropropagação é o mais comum para ajustar os pesos das conexões.

Quanto as técnicas baseadas em Árvores de decisões (DT), esses são construídas em uma estrutura como a de um fluxograma. São amplamente utilizados para classificação de DP e diferentemente das RNA, fornece regras visíveis para classificação, sendo assim, mais fácil de entender e interpretar. Entretanto, possui diversas desvantagens, como por exemplo, pobres capacidades de generalização e anti-interferência. Em ordem de melhorar a performance desta técnica, tem-se utilizado algoritmos de aprendizagem conjuntos baseados em DT, sendo os mais típicos os algoritmos: *Gradient Boosting Decision Tree* (GBDT) e *Random Forest* (RF) (Jinshu *et al.*, 2018).

Em Bi *et al.* (2015), é estudo a aplicação de um algoritmo de Máquina de Vetores de Suporte (SVM) em um sistema para reconhecimento avançado de DPs em cabos isolados. SVM é um método de aprendizado supervisionado para análise de dados e reconhecimento de padrões, o seu princípio é encontrar uma linha de separação, chamada de hiperplano, entre os dados de duas classes, buscando maximizar a distância entre os pontos mais próximos de uma classe em relação a outra. Foi constatado no trabalho que a técnica SVM possui um nível de precisão maior que outras técnicas como as redes neurais com *Back Propagation*.

Por fim, a filtragem e processamento de sinais de descargas parciais são de grande importância para a obtenção de dados válidos que permitem assim, a extração da maior quantidade de informações possíveis, as quais contribuem com uma caracterização mais precisa da severidade do defeito em análise.

### **3.4 Localização de Descargas Parciais**

A possibilidade de localizar a origem das DPs é de grande importância para o planejamento e execução das intervenções de manutenção, em certos casos quando o defeito é visível no equipamento, a localização da fonte de origem dos pulsos DPs pode

ser realizada por meio de inspeções. Porém, como grande maioria dos defeitos não são visíveis e nem todos equipamentos estão instalados em áreas que permitem inspeções frequentes, a utilização de algoritmos inteligentes na análise dos pulsos medidos é a melhor opção para obter a localização aproximada do defeito causador das DPs.

A sensibilidade e precisão da localização das DPs depende principalmente do método de detecção utilizado para obter os pulsos de DPs. Dentre os métodos de detecção apresentados anteriormente, o método acústico e o método híbrido acústico-óptico são conhecidos pela alta precisão do processo de localização de DPs, podendo ser aplicados tanto para cabos isolados a gás Hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) (Bartnikas, 2002), quanto em transformadores (Fuhr e Aschwanden, 2017).

Métodos que utilizam sensores UHF ou sensores HFCT também podem ser utilizados para a localização de DPs, mas estes apresentam desempenho inferior aos sensores acústicos. Outros fatores a se considerar quando se compara tais métodos são, o tipo de sinal que cada um obtém, a faixa de frequência que cada um opera e também a dificuldade da instalação de tais sensores, como detalhado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Características para diferentes métodos de detecção de DPs.

<b>Tipo de sensor</b>	<b>UHF</b>	<b>HFCT</b>	<b>Acústico-óptico</b>
Tipo de sinal	Ondas eletromagnéticas	Pulsos de correntes elétricas	Ondas acústicas
Frequência do sinal	0,300 – 3 GHz	3 – 30 MHz	10 – 300 kHz
Dificuldade de instalação	Moderada	Fácil	Fácil
Habilidade de localizar DPs	Limitada	Limitada	Alta

Fonte: Wu *et al.* (2015). Modificado.

Para os sensores HFCT, os quais são utilizados para medição e detecção de DPs em cabos isolados, a determinação do ponto de origem dos pulsos pode ser feita com o auxílio de técnicas conhecidas como Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) (Lin *et al.*, 2020) e Diferença do Tempo de Chegada (TDA) (Andrade *et al.*, 2017; Keränen *et al.*, 2019).

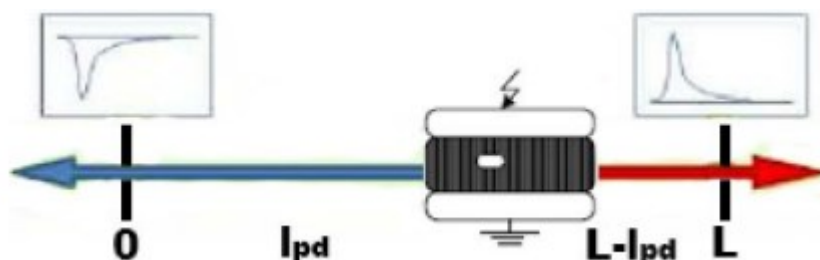
A reflectometria no domínio do tempo é utilizada para localizar a origem dos pulsos DP pela análise do intervalo de tempo entre o pulso detectado em uma extremidade do cabo e o pulso detectado após ser refletido na outra extremidade.

A técnica TDA baseia-se na análise dos pulsos medidos por dois sensores instalados em diferentes posições (normalmente as extremidades) ao longo do cabo. Analisando a diferença de tempo de viagem entre os pulsos obtidos por cada sensor e conhecendo-se a velocidade de propagação dos pulsos, pode-se localizar o ponto de origem das descargas parciais. A velocidade de propagação pode ser obtida por simulação ou experimentalmente, por meio da aplicação de um pulso conhecido no cabo e a medição do tempo de viagem entre os dois sensores.

### 3.4.1 Diferença do Tempo de Chegada (TDA)

Um pequeno problema com esta técnica para localização de DPs são erros no resultado final devido a atenuação e distorção dos pulsos que propagam ao longo do cabo (Montanari, 2016; Shu e Boggs, 2008). Por outro lado, tais técnicas permitem a utilização da polaridade dos pulsos obtidos para ter uma noção inicial da posição do defeito, já que a polaridade dos pulsos depende da posição da origem dos pulsos DPs em relação aos sensores. De forma simplificada, caso a polaridade de ambos pulsos medidos for a mesma, identifica-se que o defeito de origem das DPs não está entre os dois sensores.

Figura 3.12 – Polaridade dos pulsos em relação a posição do defeito.



Fonte: Andrade *et al.* (2017).

A figura 3.12 mostra um esquema simplificado do sistema utilizado para detecção e medição de DPs via dois sensores separados por uma distância “ $L$ ”, considerando a posição do primeiro sensor como posição de referência “ $0$ ”, o segundo sensor está posicionado na posição “ $L$ ”, o defeito está localizado em uma posição desconhecida

“ $l_{pd}$ ”, dividindo assim, o cabo em duas secções “ $l_{pd}$ ” e “ $(L - l_{pd})$ ”. O cálculo da distância “ $l_{pd}$ ” depende da diferença do tempo de viagem dos pulsos, equação (1), para cada sensor estes são “ $t_1$ ” e “ $t_2$ ”.

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (1)$$

O cálculo da posição do defeito é dado pela equação (2), a qual depende da distância entre os sensores “ $L$ ”, diferença do tempo de viagem dos pulsos entre os sensores “ $\Delta t$ ” e a velocidade de propagação “ $v$ ”.

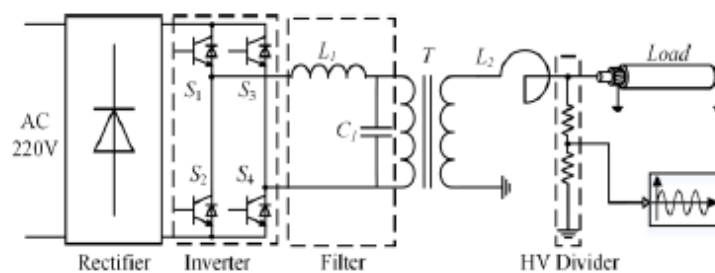
$$l_{pd} = \frac{L + (\Delta t \cdot v)}{2} \quad (2)$$

Vale ressaltar que a obtenção precisa dos valores de “ $t_1$ ” e “ $t_2$ ” é muito delicada devido a presença de ruídos provenientes da fonte de tensão utilizada, principalmente para os casos onde a medição é realizada de maneira *online*. Além disto, os cabos conectores que ligam os sensores aos módulos de medição e/ou osciloscópio devem ter o mesmo comprimento para evitar atrasos na propagação do sinal ao longo das conexões (Andrade *et al.*, 2017).

### 3.4.2 Reflectometria no Domínio do Tempo

O estudo realizado em Lin *et al.* (2020) utiliza um sistema com excitação em frequências ressonantes (ACRF), o qual é amplamente utilizado para testes de suportabilidade em cabos isolados, porém não é utilizado para medições DPs devido os ruídos causados pelo inversor de frequência utilizado no arranjo de teste, figura 3.13, possuírem componentes de frequência parecidas com as dos pulsos DPs, portanto técnicas de filtragem de sinais baseadas em frequência não funcionariam para este cenário.

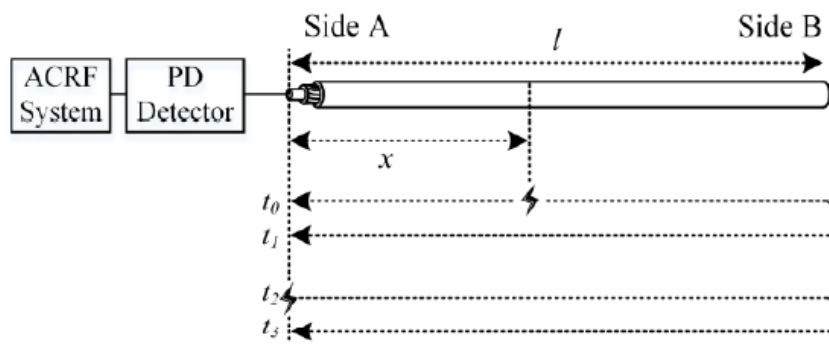
Figura 3.13 – Arranjo do sistema de teste ACRF.



Fonte: Lin *et al.* (2020)

Para contornar os principais problemas em relação a detecção e medição de DPs com este arranjo, foi utilizado a técnica conhecida como *Equivalent Pulse Width Modulation* para reduzir a frequência de chaveamento comparado com a técnica de modulação típica SPMW (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*). Como as técnicas de filtragem de sinais baseadas em frequência não funcionariam neste sistema, foi utilizado a técnica TDR como um sistema de filtragem de forma a separar os pulsos provenientes do defeito causador de DPs e pulsos provenientes do inversor de frequência.

Figura 3.14 – Esquema do processo de transmissão dos pulsos.



Fonte: Lin *et al.* (2020)

A figura 3.14 apresenta o esquema de transmissão dos pulsos deste sistema, onde o cabo possui um comprimento “ $l$ ” e a origem dos pulsos DPs está a uma distância “ $x$ ” do equipamento de medição de DPs. Os tempos “ $t_0$ ” e “ $t_1$ ” são respectivamente, o pulso de DPs inicial e o pulso de DPs refletido, enquanto os tempos “ $t_2$ ” e “ $t_3$ ” são os pulsos provenientes do inversor de frequência. Considerando que a velocidade de propagação “ $v$ ” é conhecida, o cálculo da distância “ $x$ ” é dado pela equação (3).

$$x = l - \frac{(t_1 - t_0) \cdot v}{2} \quad (3)$$

A maneira em que os pulsos de DPs são separados dos pulsos do inversor de frequência é de acordo com o intervalo de tempo entre o pulso inicial e refletido “ $\Delta t$ ”. Para os pulsos de DPs o valor do intervalo de tempo será sempre menor que  $t_{max} = 2l/v$ , já no caso dos pulsos do inversor de frequência, o intervalo de tempo será sempre maior que o valor  $t_{max} = 2l/v$ , devido ao cabo conector entre o detector de DPs e a espécie de cabo em teste. Desta forma, o critério determinado pela equação (4) é utilizado para filtrar os pulsos gerados pelo inversor de frequência.

$$\Delta t < \frac{2l}{v} \quad (4)$$

A utilização de algoritmos inteligentes para aprimorar a localização de DPs não é de extrema necessidade para cabos isolados, porém, no caso de transformadores nos quais são utilizados métodos acústicos com múltiplos sensores para localização do defeito, as técnicas mais simples como a TDA, pode não convergir para o resultado correto ou até sofrer com problemas de não convergência (Zhu *et al.*, 2019). Por esta razão, existem inúmeros estudos que utilizam do auxílio de algoritmos inteligentes como algoritmos genéticos (Ping *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2019; Wenzel *et al.*, 1996), enxame de partículas (Chen *et al.*, 2019) e enxame de partículas otimizados para procura de rotas (Wang *et al.*, 2017) para aprimoramento da localização de DPs em transformadores.

### 3.5 Considerações Finais

Com tudo isso, pode-se afirmar que existe uma vasta lista de opções de métodos de medição de descargas parciais em cabos isolados e como discutido neste capítulo cada um destes métodos possui vantagens e desvantagens diferentes dos outros. Vale ressaltar que a escolha de um dos métodos para a medição em cabos não passará apenas pela análise de vantagens ou desvantagens, a questão praticidade e fator econômico também pesam na escolha, por esta razão, foi mencionado as principais diferenças entre as aplicações que ocorrem de forma *online* e as que ocorrem de forma *off-line*.

## Capítulo 4:

# Metodologias de Diagnóstico de Cabos Isolados via Análise de Descargas Parciais

O objetivo do diagnóstico do isolamento de equipamentos elétricos é identificar defeitos no sistema e então identificar qual a gravidade e riscos que tal defeito apresenta para o sistema. Existem métodos de diagnóstico que podem danificar o material isolante do equipamento e por esta razão são categorizados como métodos destrutivos de diagnóstico, como por exemplo os testes de suportabilidade nos quais o objetivo é acelerar o envelhecimento nos pontos fracos do isolamento de forma a identifica-los. Por outro lado, existem também métodos não destrutivos onde são extraídas informações sobre a condição do isolamento sem provocar nenhum dano significativo no equipamento.

Ao passar dos anos diversos métodos de diagnóstico para cabos isolados de alta e média tensão foram desenvolvidos, podendo ser divididos em duas grandes categorias. A primeira é o diagnóstico geral da condição do isolamento, sem localizar seus pontos fracos, por exemplo o método de diagnóstico Fator de Dissipação ou Tangente de Delta (TanDelta ou  $Tan\delta$ ). A segunda categoria é onde se concentra as medições de DPs, utilizadas como uma ferramenta de alerta para gravidade do defeito e potencial risco de falha do isolamento.

Neste contexto, será discutido nesta seção diferentes metodologias de diagnóstico para cabos isolados encontrados na literatura, com enfoque na maneira de como os dados medidos foram utilizados para qualificar o estado do cabo, além da quantidade de informação necessária para obter tal diagnóstico. Também será mencionado brevemente a maneira que o diagnóstico de DPs é utilizado para testes em cabos novos e testes pós instalação.

#### **4.1 Testes em cabos novos e pós instalação**

Fabricantes de cabos isolados devem realizar uma série de ensaios de controle para assegurar que os materiais e processos utilizados atendam aos requisitos de projeto cobertos por normas (NTC-34 CELG, 2005), entre estes ensaios está listado o ensaio de descargas parciais. Para as normativas brasileiras, quando o cabo em análise possui isolamento XLPE ou PE, e tensão de isolamento iguais ou superiores a 8,7/15 kV o ensaio de DPs deve seguir as orientações da ABNT NBR 7294 (2010), para cabos com mesmo tipo de isolamento mais com tensão de isolamento inferiores a 8,7/15 kV o ensaio de descargas parciais não é exigido.

O ensaio de DPs exigido pede que seja utilizada uma tensão senoidal com limite de frequência de 48 Hz a 62 Hz, a tensão deve ser aplicada entre o condutor e blindagem da isolação, sendo que esta deve ser elevada gradualmente até o valor de tensão de exploração e em seguida decrescida até o valor de tensão de medição, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de tensão de exploração e medição para o ensaio de descargas parciais

Seção (mm <sup>2</sup> )	Tensão de ensaio (kV)					
	8,7/15		12/20		20/35	
	Exploração	Medição	Exploração	Medição	Exploração	Medição
35	21	18	24	20	-	-
50	22	19	25	21	34	29
70	23	19	26	22	36	31
95	23	20	27	23	38	32
120	24	21	28	24	39	34
150	25	21	29	25	40	35
185	25	21	29	25	42	36
240	26	22	30	26	43	37
300	26	22	31	26	44	38
400	27	23	32	27	46	39

Fonte: NBR 7294 (2010).

O valor limite de carga aparente permitido que o cabo apresente nesta aplicação é de 3 pC na tensão de medição, os valores de carga aparente na tensão de exploração também devem ser registrados. Internacionalmente, o valor limite de carga aparente de 5 pC para cabos novos também é aceitável (Bartinkas, 2002).

Em relação aos testes feitos pós instalação do cabo, vale ressaltar que o objetivo destes testes são verificar a presença de defeitos nos acessórios dos cabos (conexões e terminações) que possam surgir durante o próprio processo de instalação e também verificar se algum dano foi causado ao cabo durante seu transporte e armazenamento, após ter passado pelos testes de controle realizados pelo fabricante.

Entre os testes que podem ser realizados pós instalação do cabo, os testes de DPs *off-line* são comumente utilizados, principalmente os métodos convencionais ou não



convencionais com tensão alternada e o método DAC (Cichecki *et al.*, 2010). Isto ocorre pois a aplicação de métodos como o método DC e VLF possuem diversos problemas e limitações (Gulski *et al.*, 2008). Tensões contínuas não representam o estresse elétrico gerado por uma tensão AC, portanto as DPs em tensões contínuas apresentam características muito diferentes as DPs em tensões alternadas. O mesmo pode ser afirmado para o método VLF, o qual apresenta características como a tensão de início e magnitude das descargas com comportamento diferentes.

No capítulo 3, foi mencionado os padrões de tensões utilizados para testes pós instalação de cabos de alta tensão seguindo as normas IEC 60840 e IEC 62067, Tabela 3.2. Para tais padrões de tensões e modelos de testes, a medição de DPs também é recomendada, a fim de obter um diagnóstico mais preciso sobre a condição do cabo testado, e assim, evitar falhas inesperadas de cabos recém instalados no sistema.

## 4.2 Diagnósticos para avaliação da condição do isolamento e expectativa do tempo de vida de cabos isolados

Existem três tipos de indicadores chaves da condição do isolamento de um cabo, sendo estes: propriedades químicas, mecânicas e elétricas (Simmons *et al.*, 2013). Descargas parciais fazem parte do grupo elétrico e são utilizadas como uma ferramenta de diagnóstico por serem um parâmetro representativo do nível de degradação da isolação. Neste contexto, a forma mais comum de se aplicar as DPs em diagnósticos de cabos é através da comparação do valor de carga aparente com valores de referências. A seguir será apresentado algumas tabelas que relatam possíveis valores que podem ser utilizados para tal aplicação.

Tabela 4.2 – Valores limites para carga aparente de DPs.

Nível (pC)	Condição
0 - 500	Nível aceitável
500 - 1000	Recomendado o monitoramento do nível de descargas
1000 - 2500	Risco potencial, monitoramento periódico
> 2500	Preocupação principal, sugerido o reparo ou substituição

Fonte: Arnold *et al.* (2012).

A Tabela 4.2 apresenta quatro faixa de valores limites de carga aparente em cabos XLPE de baixa e média tensão e qual o risco que cada faixa representa. Esses valores são utilizados para comparação de medições *online*. Em Arnold *et al.* (2012), o autor menciona que não há valores limites propostas para cabos de alta tensão, então toda atividade de descarga observada para estes cabos deve ser investigada.

Em Gouda e El-Faraskory (2011) é apresentado a Tabela 4.3, a qual também expõe valores limites para a carga aparente em medições *online* de cabos XLPE, porém o nível de tensão de 66 até 440 kV. Nota-se que os valores de carga aparente em pC são consideravelmente menor para este nível de tensão.

Tabela 4.3 – Valores limites para carga aparente de DPs em cabos de alta tensão.

Nível (pC)	Condição
0 - 250	Descargas com valores toleráveis
250 - 1000	Monitoramento regular recomendado
> 1000	Risco potencial, reparo ou troca do condutor

Fonte: Gouda e El-Faraskory (2011).

Analogamente, tem-se a Tabela 4.4 (Hartlein *et al.*, 2010), a qual apresenta os valores limites de carga aparente aceitos para os métodos de medição *off-line* a 60 Hz ou VLF, método de medição *online* e método DAC, além de mencionar mais de um tipo de isolamento.

Tabela 4.4 – Diferentes valores limites para carga aparente de DPs em cabos isolados.

Isolamento	Método	Indicativo de aprovação	Indicativo de reprovação
HMWPE WTRXLPE XLPE	<i>Off-line</i> 60 Hz e VLF (0,1 Hz)	Cabo: < 5 pC em $4 \cdot U_0$ Acessórios: 3-5 pC em $1,25 - 1,5 \cdot U_0$	Desconhecido

EPR	<i>Online</i>	Cabo: Sem DPs em $U_0$ ( $< 250$ pC)	Cabo: $> 500$ pC em $U_0$
		Acessórios: $< 500$ pC em $U_0$	Acessórios: $> 2500$ pC em $U_0$
	DAC	Desconhecido	Desconhecido
PILC	<i>Off-line</i> 60 Hz e VLF (0,1 Hz)	Desconhecido	Desconhecido
	<i>Online</i>	Cabo: $< 3000$ pC em $U_0$	Cabo: $> 10000$ pC em $U_0$
		Acessórios: $< 5000$ pC em $U_0$	Acessórios: $> 15000$ pC em $U_0$
DAC	Desconhecido	Desconhecido	

Fonte: Hartlein *et al.* (2010)

A Tabela 4.3 foi montada baseada em valores encontrados nas normas ICEA S-94-649, ICEA S-97-682 e IEEE 48<sup>TM</sup>, 386<sup>TM</sup> e 404<sup>TM</sup>, além de valores retirados de *IPEC High Voltage Ltd.* (Renforth e Mackinlay, 2006), baseados em dados retirados de circuitos europeus. Vale ressaltar que  $U_0$  representa a tensão fase-terra de teste.

Por sua vez, a Tabela 4.5 (Renforth e Mackinlay, 2006) apresenta os valores baseados em normas e regulamentos chineses para cabos XLPE de média tensão (6 kV – 35 kV) quando testados via o método de tensão oscilatória.

Tabela 4.5 – Valores limites de carga aparente em cabos XLPE de acordo com normas e regulamentos chineses

Nível (pC)	Condição
0-100	Valores de referência considerados normais
$> 300$ (Cabo) $> 500$ (Acessórios)	Valores considerados anormais
$> 5000$	Monitoramento contínuo on-line recomendado

Fonte: Renforth e Mackinlay (2006).

Com isso, percebe-se que não existe métodos de avaliação nem valores de carga aparente precisos e unificados para diagnósticos do isolamento de cabos isolados. Mesmo assim, existem métodos de cálculo do tempo de vida restante que utilizam a carga aparente como único parâmetro de análise, os métodos mais comuns são: Método da

Regressão Linear (Zaeni *et al.*, 2019a) e Equação de Caso de Degradação (Zaeni *et al.*, 2019a; Zaeni *et al.*, 2019b; van Schaik *et al.*, 2005).

#### 4.2.1 Método da Regressão Linear

Este é um método de análise estatístico que verifica a influência de duas ou mais variáveis, sendo a relação entre as mesmas manifestada por meio de um modelo matemático, o qual pode ter forma linear, logarítmica, exponencial e outras dependendo do tipo de tendência que os dados obtidos possuem. No exemplo em Zaeni *et al.* (2019a), com dados de três valores de carga aparentes coletados de forma anual no período de três anos, foi realizado a análise entre o valor da carga aparente ( $q$ ) como função do tempo de maneira linear, seguindo a equação (5).

$$q(t) = a + bt \quad (5)$$

Onde, os coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ” são obtidos da seguinte forma:

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X) - (\sum X)(\sum XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{(\sum Y)(\sum X) - (\sum X)(\sum XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (7)$$

Utilizando os valores de DPs coletados (variável “ $X$ ” nas equações 6 e 7) e conhecendo o tempo de uso do cabo em estudo (variável “ $Y$ ” nas equações 6 e 7), foi possível calcular os valores dos coeficientes pelas equações (6) e (7). Tendo a equação completa, o próximo passo foi assumir qual valor limite de carga aparente em pC o cabo deve suportar (foi utilizado 500 pC no exemplo mencionado), para então encontrar o valor em anos do tempo de vida restante deste cabo em estudo.

Destaca-se que este método depende de valores históricos e de valores de referência para que possa ser aplicado corretamente e mesmo assim, o tipo de equação utilizado, como o tipo linear, muitas vezes não é o mais adequado para analisar a evolução das DPs ao passar do tempo. O método também pode ser utilizado com valores de resistência de isolamento, mas continuará a sofrer com as limitações mencionadas.

### 4.2.2 Equação do Caso de Degradação

Este método utiliza uma equação matemática para a comparação do nível de degradação atual com valores de referência. Pode ser utilizado como variáveis de entrada qualquer parâmetro de degradação como a resistência de isolamento e valor de carga aparente (Zaeni *et al.*, 2019b). De maneira similar ao método da regressão linear, este método depende de valores de referências para ser aplicável. A Equação (8) demonstra como é feito o cálculo do tempo de vida restante para um caso linear.

$$Rlt = t_{now} \cdot \left( \left( \frac{D_m}{D_{now}} \right) - 1 \right) \quad (8)$$

Na equação (8), “*Rlt*” é tempo de vida restante (normalmente em anos) a partir do momento da análise, “*t<sub>now</sub>*” é o tempo em anos que o cabo está em serviço, “*D<sub>m</sub>*” e “*D<sub>now</sub>*” são respectivamente o nível de degradação limite e o nível de degradação atual.

Percebe-se que ambos os métodos da Regressão Linear e Equação do Caso de Degradação são métodos simplificados que buscam encontrar estimativas para o tempo em que se pode continuar utilizando o cabo antes que este venha a falha. Porém, a utilização de um único parâmetro de análise neste tipo de diagnóstico e as suas simplificações tem como produto um resultado muito básico, o que pode não retratar corretamente o estado do isolamento do cabo.

Por esta razão, é importante utilizar outros parâmetros de análise além da carga aparente para que o diagnóstico tenha um resultado mais completo e que melhor represente a condição do isolamento. A seguir será apresentado alguns métodos que buscaram aprimorar de alguma forma o diagnósticos de cabos isolados via DPs, com objetivo de escapar do problema mencionado anteriormente.

### 4.2.3 Métodos com Distribuições Estatísticas

Uma maneira de analisar a confiabilidade de um sistema é por meio de curvas e modelos estatísticos, tal como realizado em Dong e Nassif (2019), onde foram utilizados modelos de Weibull modificados para encontrar um modelo aceitável que represente o

nível de confiabilidade de sistemas de distribuição, e também em Tang *et al.* (2014), onde foi montado um modelo estatístico de Cox que representa a curva de sobrevivência de cabos isolados considerando diversos fatores (embora nesse trabalho, especificamente, nenhum parâmetro de degradação, como as DPs, tenha sido utilizado na elaboração do modelo).

Em Cheng *et al.* (2020) é realizado o estudo estatístico da relação entre o tempo de vida e o valor de descargas aparentes para cabos XLPE de 110 kV. Para isso, foram analisados diversos cabos, nos quais alguns já vieram a falha, e foi extraído o valor de descarga máxima local para estes cabos. Com esta base de dados, foi estudado qual modelo de distribuição representava melhor os dados, sendo analisados os modelos *Weibull* e *Log-normal*. A distribuição *Log-normal* apresentou melhores resultados e partir desta escolha foi realizado a análise de probabilidade de falha para certos valores de carga aparente referenciados nas normas e regulamentos chineses, tais valores foram: 250 pC, 500 pC, 1000 pC, 3000 pC e 5000 pC, como mostra a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Probabilidade de Falha para Cabos de Alta Tensão.

Nível (pC)	Probabilidade de Falha (%)
250	20,97
500	43,73
1000	68,86
3000	93,59
5000	97,72

Fonte: Cheng *et al.* (2020)

Este tipo de análise contribui para ter uma visão mais ampla sobre o risco que cabos isolados tem de chegar a falha pelo nível de DPs que o mesmo apresenta. Porém, é importante ter em mente que os resultados obtidos por este estudo não se aplica para todo tipo de sistema. Primeiramente devido ao fato das diversas características que pode variar de sistema para sistema, como nível de tensão, flutuação de carga, temperatura, umidade, etc. E segundo, devido ao fato que a base de dados utilizada para realizar o estudo foi de cerca de 19 unidades de cabos, quantidade que é consideravelmente baixa para poder generalizar os resultados para um grupo maior.

#### 4.2.4 Sistemas de Classificação

Uma maneira de utilizar o diagnóstico de cabos isolados via DPs como auxílio na tomada de decisões é via sistemas de classificação. Os sistemas de classificação se resumem em tabelas onde o diagnóstico e a ação recomendada são determinados de acordo com um código representativo da condição do isolamento. Tal tipo de aplicação resume várias propriedades além do nível de carga aparente por código, porém, nem sempre essa informação é bem descrita.

Um exemplo de sistema de classificação foi aplicado em Dias e Costa (2014), no qual existem três níveis distintos classificados na forma de um “semáforo” (alertas verde, amarelo e vermelho), tal como mostrado na Tabela 4.7. A luz verde indica níveis aceitáveis de DPs, não sendo necessária, portanto, nenhuma ação corretiva; a luz amarela indica a presença de níveis preocupantes de DPs, recomendando-se, assim, medições mais frequentes; por fim, a luz vermelha indica risco eminente e sugere a intervenção imediata do cabo no qual foram detectadas as descargas.

Tabela 4.7 – Sistema de classificação para diagnóstico de DPs.

<b>Luzes</b>	<b>Diagnóstico / Ação</b>
Verde	Sem presença de DPs / Nenhuma ação corretiva
Amarela	DPs detectadas / Repetir medições em até 6 meses
Vermelha	DPs ativas / Substituir o condutor imediatamente

Fonte: Dias e Costa (2014)

Este sistema foi complementado por uma técnica de avaliação de tendências ou taxa de incremento (Grossi *et al.*, 2014), apresentada na Tabela 4.8, que permite analisar a evolução das descargas por medições periódicas para cada tipo de descarga. Desta forma, a identificação dos defeitos é fundamental, pois tipos diferentes de defeitos evoluem em taxas desiguais, mesmo que apresentem amplitudes semelhantes.

Tabela 4.8 – Técnica para avaliação de tendência após a segunda medição.

<b>Tendência de aumento (TI)</b>	<b>Repetir dentro de 6 meses</b>	<b>Repetir dentro de 3 meses</b>	<b>Inspeção / Manutenção</b>
<b>DP Interna</b>	TI < 10%	10% < TI < 50%	TI > 50%

<b>DP Superficial</b>	TI<20%	20%<TI<70%	TI >70%
<b>DP Corona</b>	TI<50%	TI<50%	TI >50%

Fonte: Grossi *et al.* (2014)

A avaliação das mudanças de tendências das DPs é uma ótima ferramenta para o diagnóstico de cabos, porém existe a necessidade de medições periódicas para a aplicação efetiva da metodologia. Vale ressaltar que tais observações sobre as taxas de incremento são apenas sugestivas, caso seja observado a necessidade de intervenção em qualquer instante é de responsabilidade da equipe de manutenção analisar a situação.

Um sistema de classificação interessante é apresentado em Hartlein *et al.* (2010), neste caso é combinado um sistema com códigos de classificação com modelos estatísticos de probabilidade de falha. O sistema foi dividido em cinco códigos diferentes, apresentados na Tabela 4.9, juntamente com suas probabilidades de falhas para dois anos após a medição de DPs foi realizada.

Tabela 4.9 – Sistema de classificação para diagnóstico de cabos de alta tensão com probabilidade de falha.

<b>Código de classificação</b>	<b>Probabilidade de falha (%)</b>
1	<< 3
2	< 3
3	3
4	18
5	90

Fonte: Hartlein *et al.* (2010)

Esses resultados foram obtidos a partir da análise de medições *online* de DPs de cerca de 262 milhas de condutores. As curvas de sobrevivência encontradas no estudo indicam que os seguimentos classificados como Código 5 tem 40% de chance de falhar em cerca de um ano após o teste ser realizado e mais de 99% de chance de falhar após dois anos e meio do teste ser realizado.

De forma similar, foram analisados mais de 490 milhas de condutores utilizando métodos de medição *off-line*, entre esses estava um sistema de média tensão com cerca de 14 milhas dividido em cerca de 100 seguimentos. As estimativas mostram que



aproximadamente 12% dos defeitos encontrados nestes seguimentos chegariam a falha em um período de até cinco anos após a realização dos testes.

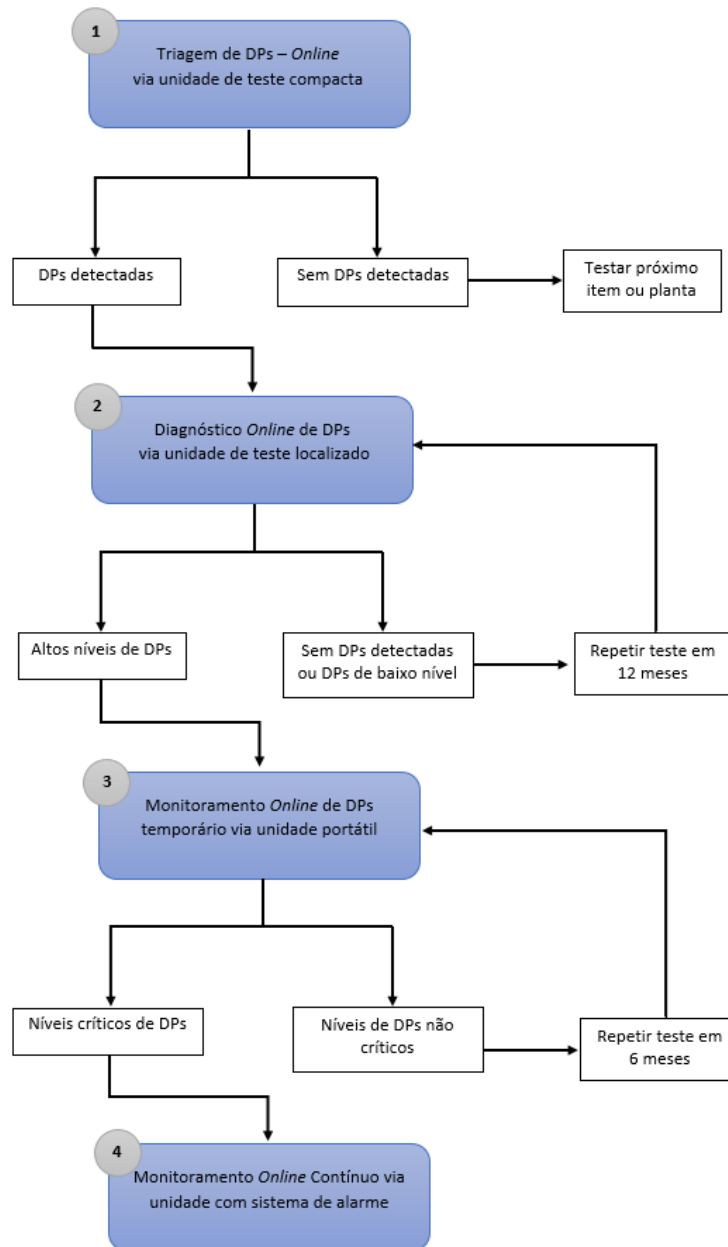
A principal vantagem de se utilizar tais sistemas de classificação é resumir uma quantidade elevada e complexa de informações em um único quadro de resultados; porém, as características que serão analisadas e qual o peso que cada uma irá possui no sistema e no resultado final variam em cada aplicação. Além disso, a correlação do nível das grandezas medidas (como a carga aparente das DPs, por exemplo) com o nível de comprometimento da isolamento e/ou probabilidade de falha é algo complexo e ainda carece de aperfeiçoamento e investimento em pesquisa.

#### **4.2.5 Monitoramento Online Contínuo de DPs**

As técnicas de detecção *online* podem ser divididas em quatro níveis de monitoramento (Dodd et al. 2017), como exibido na figura 4.1, sendo essas: *OLPD Screening* ou triagem *online* de DPs, na qual objetivo é apenas detectar a presença de DPs, normalmente utilizando sensores acústicos de fácil operação; *OLPD Spot Testing* ou teste *online* localizado de DPs, utilizada para verificar os níveis de DPs presentes e avaliar se é necessário aplicar o próximo nível de diagnóstico ou se o teste pode se repetir no período de 6-12 meses, este método possui duração de testes entre 10 e 60 minutos; *Temporary OLPD Monitoring* ou Monitoramento *online* temporário de DPs, utilizada para monitoramento *online* durante um período pré determinado (podendo ser dias ou até semanas) e costumasse a ser repetida em até 6 meses para verificação do níveis de DPs; O último nível de monitoramento é o *Permanent OLPD Monitoring* ou monitoramento *online* contínuo, aplicado quando os níveis de DPs são considerados críticos e a falha do equipamento pode ocorrer a qualquer momento.

Os sistemas para esta metodologia de monitoramento são compostos de aparelhos de alta tecnologia com sistemas de filtragem e análise de sinais e sistema PRPDA para melhor estudo dos dados obtidos pelo sistema de medição. A principal vantagem do monitoramento *online* contínuo é a possibilidade de analisar os dados em situações anormais do sistema e realizar a análise de tendências das características de DPs de maneira contínua.

Figura 4.1 - Esquema da evolução do estilo de medição de DPs utilizado para o diagnóstico online de cabos isolados



Fonte: Dodd *et al.* (2017). Modificado.

### 4.3 Outros Parâmetros e Considerações que Auxiliam no Diagnóstico de Cabos

Como discutido neste capítulo, os métodos de diagnósticos de cabos isolados de média e alta tensão pela análise de descargas parciais atualmente aplicados possuem

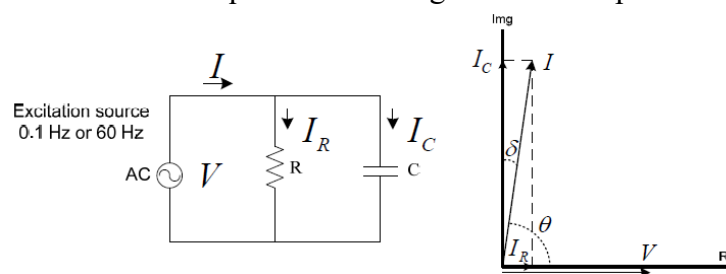
certas limitações que podem prejudicar a precisão ou até mesmo contribuir para um falso diagnóstico da condição do isolamento. A fim de contornar tais limitações, diversas possibilidades de análise podem ser implementadas no diagnóstico. Será apresentado a seguir tais possibilidades e como essas ajudam na produção de um diagnóstico mais completo e preciso.

### 4.3.1 Tangente de Delta (*TanDelta*)

O diagnóstico *TanDelta* é utilizado para determinar o nível de dissipação de potência em um material dielétrico. É uma metodologia de diagnóstico *off-line* e o princípio desta técnica é comparar o valor medido com valores de referência para o tipo de dielétrico testado, tais valores podem ser os próprios valores de fases adjacentes do sistema, valores de cabos do mesmo tipo com aplicações semelhantes, padrões de referência industriais (*IEEE 400.2-2013*) ou uma base de dados extensa.

O ensaio funciona da seguinte maneira: aplica-se uma tensão alternada no equipamento e então é realizado a medição da diferença de fase entre a tensão aplicada e a corrente resultante. Este ângulo é usado para encontrar as componentes da corrente, as quais são a corrente de carregamento  $I_C$  que representa a propriedade capacitiva do material dielétrico e a componente  $I_R$  que representa os componentes de perdas no isolamento. A Tangente de Delta é a razão entre a corrente de perda e a corrente de carregamento.

Figura 4.2 – Circuito equivalente e Diagrama de fase para medição *TanDelta*



Fonte: Hartlein *et al.* (2010).

Esta técnica pode ser simplificada para um circuito equivalente que possui uma capacitância ( $C$ ) em paralelo com um resistor ( $R$ ). Para um cabo novo, o valor de  $R$  é muito alto e conseqüentemente a corrente  $I_R$  será praticamente nula, fazendo que o ângulo Delta ( $\delta$ ) será bem pequeno. Ao decorrer do tempo o nível de degradação aumenta, reduzindo

o valor de R, aumentando conseqüentemente a corrente  $I_R$  e o ângulo  $\delta$ . A razão entre  $I_R$  e  $I_C$  é a  $\text{Tan}(\delta)$ , de acordo com a Equação (9).

$$\tan(\delta) = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V/R}{V/(1/\omega C)} = \frac{1}{\omega RC} \quad (9)$$

O tipo de tensão utilizada nesta metodologia pode variar, sendo as mais comuns tensões VLF ou a própria tensão de operação do cabo (50 ou 60 Hz). A utilização do método DAC não é recomendada pelo fato de esta técnica resultaria em resultados menos precisos devido ao fato da tensão mudar seu valor RMS ou longo do tempo. O nível de tensão aplicado varia de 0,5 a 2  $U_0$ , sendo  $U_0$  a tensão fase terra do cabo. O tempo recomendado de ensaio para testes pós instalação ou teste de suportabilidade de cabos novos é de 60 minutos a 0,1 Hz. Testes de circuitos já envelhecidos devem durar no mínimo 30 minutos podendo ser estendido até 60 minutos, já no caso de testes de suportabilidade, o tempo recomendado é de 30 minutos.

Em *IEEE Std 400.2<sup>TM</sup>* (2013), pode ser encontrado os valores de referência que indicam a condição do isolamento de cabos com isolamento do tipo PE (PE, XLPE e TRXLPE), estes são apresentados para a aplicação do método com tensão VLF, Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores de referência para o teste VLF –  $\text{Tan}(\delta)$  em cabos com isolamento do tipo PE.

Avaliação	VLF – $\text{Tan}(\delta)$ Time Stability ( $10^{-3}$ )		VLF – $\text{Tan}(\delta)$ Diferencial Entre 0,5 e 1,5 $U_0$ ( $10^{-3}$ )		VLF – $\text{Tan}(\delta)$ Média em $U_0$ ( $10^{-3}$ )
Nenhuma ação requerida	< 0,1	E	< 5	E	< 4
Estudo adicional aconselhado	0,1 até 0,5	Ou	5 até 80	Ou	4 até 50
Ação requerida	> 0,5	Ou	> 80	Ou	> 50

Fonte: *IEEE Std 400.2<sup>TM</sup>* (2013)

Em relação a outros tipos de isolamento como EPR e PILC, também são apresentadas as tabelas com valores de referência para o teste com tensão VLF na *IEEE Std 400.2* (2013). A principal crítica quanto a este tipo de sistema de aprovação “passa/não passa” é o fato que a faixa do meio do sistema “Estudo adicional aconselhado”

é muito ampla, podendo caracterizar no mesmo grupo cabos com condição geral de envelhecimento, mas sem nenhum defeito severo e cabos com defeitos individuais que possuem potencial para se tornar defeitos preocupantes. Por esta razão, a utilização do diagnóstico  $\text{Tan}(\delta)$  juntamente com o diagnóstico de DPs é recomendado.

O método VLF para medição de DPs permite, de uma maneira não destrutiva, a detecção, localização e qualificação de defeitos presentes no cabo. As características das DPs para o método VLF ( $< 1$  Hz) pode diferenciar das características para os métodos que utilização as frequências nominais de operação (50 e 60 Hz). Os procedimentos recomendados para esta aplicação podem ser encontrados nas normas *IEC 60060-3* e *60885-3*.

O procedimento que deve ser seguido para a utilização da medição de DPs juntamente com o teste de suportabilidade VLF é descrito em *IEEE Std 400.2 (2013)*. A tensão aplicada deve ser elevada devagar até o nível de teste de suportabilidade, Tabela 4.11. Se ocorrer DPs, a tensão que a atividade é detectada é salva como tensão de início (PDIV), então a tensão aplicada pode ser mantida neste nível ou elevada até o nível de suportabilidade por um período de 20 até 50 segundos onde a atividade de DPs também deve ser medida. A partir daí, a tensão é diminuída lentamente até a tensão onde a atividade de DPs não é mais detectada, sendo conhecida como tensão de extinção (PDEV), mais detalhes sobre as tensões PDIV e PDEV serão discutidos no próximo seguimento desta seção.

Na situação onde nenhuma atividade de DPs é detectada até que a tensão chegue na tensão de suportabilidade, então o processo deve seguir o procedimento padrão mantendo esta tensão por 30 minutos, ao menos que DPs sejam detectadas durante este processo. Na situação onde as DPs aparecem na tensão de suportabilidade, o teste deve ser mantido por 30-60 segundos adicionais antes da redução da tensão até encontrar o valor de PDEV. Isto se dá pela possibilidade da formação de uma arborescência elétrica que pode levar o cabo a falha em alguns minutos com o nível de estresse elétrico aplicado neste método.

As DPs parciais gravadas neste procedimento são utilizadas para analisar o nível de degradação presente no cabo, além de localizar o defeito o que não é possível com o método da  $\text{Tan}(\delta)$ . Com base nas informações obtidas, recomendações sobre o reparo ou substituição do cabo podem ser feitas, porém, a quantidade de informação sobre este fenômeno é limitada, sendo recomendado certa precaução na interpretação dos dados de

DPs. A utilização de dados históricos de sistemas parecidos são de grande ajuda para este tipo de análise.

Tabela 4.11 – Tensões de teste de suportabilidade VLF para onde senoidal e cosseno-retangular.

Forma de onda	Tensão nominal (Fase-fase)	Instalação (Fase-terra)		Aceitação (Fase-terra)		Manutenção (Fase-terra)	
		(kV rms)	(kV pico)	(kV rms)	(kV pico)	(kV rms)	(kV pico)
Senoidal	(kV)	(kV rms)	(kV pico)	(kV rms)	(kV pico)	(kV rms)	(kV pico)
	5	9	13	10	14	7	10
	8	11	16	13	18	10	14
	15	19	27	21	30	16	22
	20	24	34	26	37	20	28
	25	29	41	32	45	24	34
	28	32	45	36	51	27	38
	30	24	48	38	54	29	41
	35	39	55	44	62	33	47
	46	51	72	57	81	43	61
	69	75	106	84	119	63	89
Cosseno-retangular	5	13	13	14	14	10	10
	8	16	16	18	18	14	14
	15	27	27	30	30	22	22
	20	34	34	037	037	28	28
	25	41	41	45	45	34	34
	28	45	45	51	51	38	38
	30	48	48	54	54	41	41
	35	55	55	62	62	47	47
	46	72	72	81	81	61	61
	69	106	106	119	119	89	89

Fonte: *IEEE Std 400.2 (2013)*.

A combinação do diagnóstico  $\text{Tan}(\delta)$  e diagnóstico de DPs é comum devido as características complementares que um método possui com o outro. Por exemplo, a  $\text{Tan}(\delta)$  não é capaz de caracterizar a gravidade nem localizar defeitos, mas apenas fornece

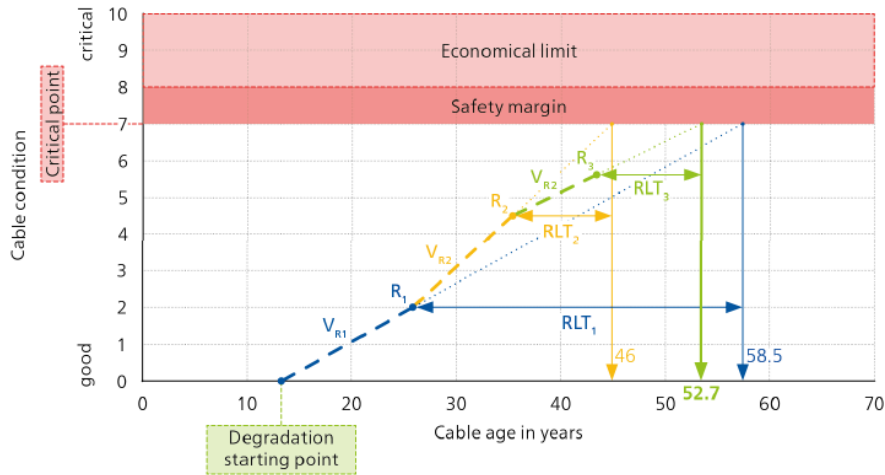
a condição geral de degradação do sistema, por outro lado, os diagnósticos DPs é capaz de localizar tais defeitos mas não é sensível a problemas relacionados a arborescências (Lima, 2008).

Tabela 4.12 – Tabela comparativa das vantagens e desvantagens entre os métodos de diagnóstico via DPs ou Tangente de Delta

Tipo de diagnóstico	Vantagens	Desvantagens
Descargas parciais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificação e localização dos defeitos</li> <li>- Técnicas <i>online e off-line</i></li> <li>- Detecta arborescências elétricas</li> <li>- Diversidade de técnicas com diferentes níveis de tensão e/ou frequências</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não detecta todos os defeitos do cabo, apenas aqueles com descarga</li> <li>- Não detecta arborescências em água</li> <li>- Diagnóstico “local” e não “global”</li> <li>- Não existe método/modelo uniforme de diagnóstico</li> </ul>
Tangente de Delta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os resultados dos testes são valores numéricos que podem ser facilmente comparados com outras medições ou valores de referência</li> <li>- Indicador geral de arborescências em água</li> <li>- Interferência mínima de ruídos/campo elétrico externo</li> <li>- Valores instáveis durante o teste podem ser indicadores do componente estar progredindo a falha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não localiza os defeitos</li> <li>- O circuito deve estar fora de serviço para ser testado</li> <li>- Não é um método efetivo para testar cabos recém instalados</li> <li>- Um sistema preciso de diagnóstico ainda não estabelecido</li> </ul>

O estudo realizado em Neier *et al.* (2019) contou com uma extensa base de dados de diagnósticos VLF-  $\tan(\delta)$  de cerca de 15000 circuitos de distribuição com cabos XLPE. Desta maneira foi realizado a análise estática dos dados obtidos e gerado um modelo de estimativa do tempo de vida via velocidade de envelhecimento, figura 4.3.

Figura 4.3 – Estimativa do tempo de vida restante para diferentes testes.



Fonte: Neier *et al.* (2019)

Pelos dados analisados, cabos com tempo de serviço menor que 13 anos não apresentavam nenhum sinal considerável de envelhecimento, sendo assim 13 anos é considerado o ponto de início da degradação (DSP). O modelo criado possui 10 níveis de degradação, onde o nível 7 representa uma margem de segurança e a partir do nível 8 o cabo pode chegar a falha a qualquer momento, sendo este chamado de ponto crítico (CP).

A partir deste modelo a expectativa de tempo de vida restante (RLT) pode ser encontrada baseado no nível de degradação atual ( $R_n$ ) em relação ao DSP ou em relação a medições passadas para o mesmo cabo. Para isso, deve-se calcular a velocidade de envelhecimento ( $V_{R_n}$ ), seguindo a Equação (12).

$$V_{R_1} = \frac{R_1}{DP_1 - DSP} \quad (10)$$

$$RLT_1 = \frac{CP - R_1}{V_{R_1}} \quad (11)$$

$$V_{R_n} = \frac{R_n - R_{n-1}}{DP_n - DP_{n-1}} \quad (12)$$

$$RLT_n = \frac{CP - R_n}{V_{R_n}} \quad (13)$$



Tal modelo apresenta uma alternativa as análises comparativas baseadas na tabela 4.10. Destaca-se a importância de medições intermitentes para a melhor atribuição do crescimento do defeito, visto que a aproximação linear nem sempre representa a realidade.

Como já mencionado anteriormente, o principal parâmetro de análise em diagnósticos DPs é a carga aparente, a qual nem sempre é um índice de degradação confiável por se só. Portanto, incluir a avaliação de outros parâmetros dos pulsos e atividades de DPs podem contribuir para um diagnóstico mais preciso e confiável. Para isto, deve-se conhecer o comportamento de tais parâmetros ou longo do tempo, alguns destes serão discutidos a seguir.

### ***4.3.2 Tensão de início (PDIV) e Tensão de extinção (PDEV)***

A tensão de início é o valor de tensão mais baixo em que existe atividade de DPs. Este parâmetro é utilizado em testes que envolvem a elevação gradual de tensão e é expresso como sendo  $1/\sqrt{2}$  da tensão de pico aplicada. A tensão de extinção é o valor mais alto de tensão em que ainda tem ocorrência de descargas parciais após a diminuição gradativa da tensão de teste aplicada. Também é expressa como  $1/\sqrt{2}$  da tensão de pico aplicada.

Muitos fatores podem influenciar no valor de PDIV e PDEV incluindo a taxa na qual a tensão é incrementada ou decrementada, bem como o histórico de tensão aplicada a amostra (Gutnik, 2014). Em muitos casos obter o mesmo valor de PDIV e PDEV pode ser uma tarefa difícil até mesmo para ensaios subsequentes.

Um estudo realizado em Mohamed *et al.* (2017) verificou a faixa em que as tensões PDIV se encontravam para uma série de cabos XLPE e PILC de 33 kV e foram encontrados valores que variavam entre 6 kV e 15 kV. Foi analisada então a hipótese da redução de até 6% da tensão de operação para minimizar a quantidade de atividade de DPs destes cabos. A influência da tensão na atividade de DPs é clara como relatado em Gouda e El-Faraskory (2011), porém mesmo que a redução da tensão de operação dos cabos diminua a quantidade de DPs nos cabos, a mesma redução de tensão pode causar o aumento da corrente que passa pelo cabo em regime permanente e conseqüentemente

elevará a temperatura do condutor promovendo o processo de degradação que em si influencia para o aumento da atividade de DPs no cabo.

A evolução da PDIV ao longo do tempo foi estudada em Wang *et al.* (2010), onde foram realizados testes de envelhecimento em diversas espécimes de isolamento compostas de XLPE e LDPE (polietileno de baixa densidade). Foram observados durante todo o período de teste os valores de magnitude das DPs, seus padrões, taxa de repetição e as PDIV. Os resultados encontrados indicam que a PDIV tem uma tendência de aumentar ao longo do envelhecimento do isolamento, sendo o maior aumento próximo ao estágio final do tempo de vida do isolamento. A hipótese apresentada para explicar esta tendência é as mudanças químicas e físicas que ocorrem na cavidade e possivelmente na composição do gás que a preenche.

Não há estudos suficientes que avaliem criteriosamente a evolução da PDEV ao longo do tempo, porém, acredita-se que esta siga uma tendência semelhante a PDIV devido aos mesmos motivos mencionados anteriormente.

### ***4.3.3 Taxa de Repetição***

A taxa de repetição é a quantidade ou a média de pulsos que ocorrem em um determinado período de tempo, normalmente segundos ou ciclos. A taxa de repetição faz parte do diagrama de análise  $\phi-q-n$  e pode ser de grande auxílio no diagnóstico de cabos. De acordo com Wang *et al.* (2010), a taxa de repetição de DPs segue um padrão parecido com o comportamento da carga aparente nos estágios iniciais de vida do isolamento tendo um comportamento crescente no primeiro quarto do tempo de vida do cabo. A partir deste ponto o comportamento da taxa de repetição e carga aparente são espelhados, a taxa de repetição decresce lentamente até o momento da falha enquanto a carga aparente cresce lentamente.

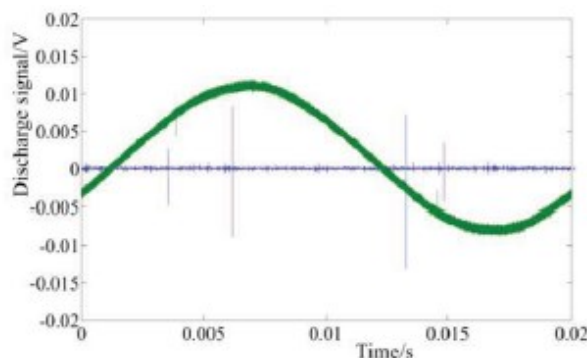
Como já mencionado anteriormente, existe o fenômeno das SPMDs o qual é um indicativo da proximidade da falha no isolamento. Este fenômeno é caracterizado pelo decaimento anormal dos valores de carga aparente e aumento na taxa de repetição. Essas informações contribuem para uma melhor avaliação da condição do isolamento, entretanto, não existem faixas de referências para os valores de taxa de repetição, fazendo que esta análise seja dependente de dados históricos provenientes de medições periódicas.

#### 4.3.4 Análise de sequência de pulso ou “pulse sequence analysis” (PSA) e análise do formato do pulso

A técnica PSA baseia-se na análise de pulsos consecutivos que ocorrem em uma escala de alguns milissegundos, como cada descarga gera uma tensão local que influencia a ignição de descarga seguinte, diferentemente da técnica PRPDA que analisa cada descarga como independente e perde informações neste processo.

Os métodos padrões de análise de DPs acumulam os dados coletados em diversos ciclos de tensão e então os transforma em um único ciclo de referência. Todas as descargas estão sobrepostas neste ciclo de referência, sincronizadas para o início do ciclo (ângulo de fase igual a 0). Não é estudada a correlação entre os pulsos no mesmo ciclo ou ciclos diferentes, portanto as DPs são tratadas como eventos independentes (Arief, 2011).

Figura 4.4 – Exemplo do método padrão de análise de DPs.



Fonte: Wang *et al.* (2019).

Os parâmetros básicos de análise da PSA são: o valor de tensão externa necessária para aumentar o campo elétrico local e acionar a próxima descarga parcial; e o valor de tempo entre as descargas consecutivas. A utilização deste método pode auxiliar os casos onde as DPs surgem com campos elétricos baixos e possuem apenas algumas descargas por ciclo, sendo possível separar se há um ou mais pontos produzindo as descargas.

Utilizando esta técnica em conjunto com a análise do formato do pulso é possível analisar o comportamento de pulsos individuais ao longo do tempo de vida da isolamento (Wang *et al.*, 2019). A informação encontrada indica uma variação substancial no formato

dos pulsos quando o cabo isolado se aproxima da falha, apresentando pulsos mais finos/estreitos, ou seja, pulsos com menor tempo de subida e menor tempo de descida.

Tal informação pode ser uma grande contribuição para a formulação de um diagnóstico, porém o mesmo obstáculo das taxas de repetições é presente nesta análise. Não existem valores padrões para comparativo de tempo de subida ou tempo de descida do pulso, além da dificuldade de se obter tais valores precisamente. Portanto, a utilidade desta informação é extremamente dependente de dados históricos provenientes de medições periódicas.

#### **4.3.5 Análise de Padrões $\phi$ - $q$ - $n$ ao Longo do Tempo de Vida da Isolação**

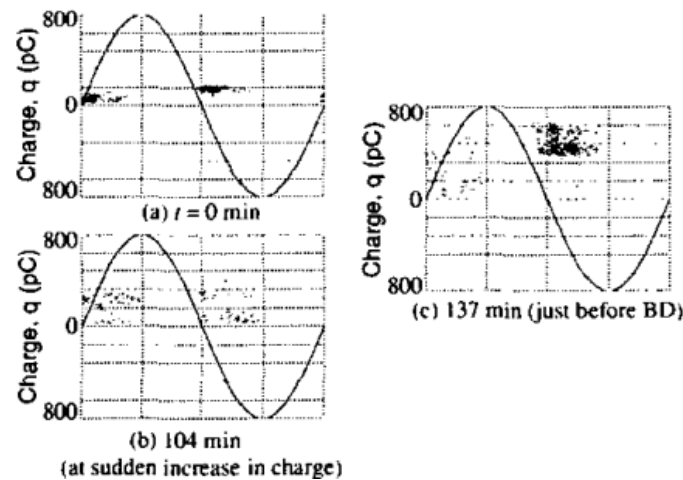
Como mencionado no capítulo 3, o sistema PRPD de análise é comumente utilizado como forma de apresentação dos resultados obtidos em medições de descargas parciais por exibir três características diferentes em um único gráfico, sendo estas, a magnitude da descarga ( $q$ ), a taxa de repetição ( $n$ ) e o ângulo de fase de ocorrência ( $\phi$ ).

As informações extraídas dos padrões podem ser utilizadas de diversas maneiras a fim de se obter o diagnóstico da condição do isolamento do cabo. A inclusão de análises estatísticas sobre os parâmetros dos padrões e o treinamento de algoritmos de aprendizagem de máquina para utilizar os padrões como classificadores de DPs podem ser encontrados com frequência na literatura (Si *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2013).

Classificadores de DPs são técnicas empregadas para determinar o tipo de descarga presente no sistema em análise. As DPs são divididas em três tipos diferentes de acordo com seu ponto de origem, podendo ser classificadas em: descarga interna, descarga superficial ou descarga externa (ou descarga corona). Cada tipo de descarga apresenta diferentes comportamentos em seus padrões, podendo assim, ser identificado o tipo de descarga presente pela análise dos padrões (Grossi *et al.*, 2014; Gulski e Krivda, 1993; Hao e Lewin, 2006).

Outra forma de se utilizar os padrões como uma ferramenta auxiliar no diagnóstico do isolamento é o estudo da evolução destes padrões ao decorrer do tempo. Em Tokunaga *et al.* (2003), é feita a breve análise sobre o comportamento dos padrões ao decorrer do envelhecimento de um cabo, figura 4.5.

Figura 4.5 – Exemplo dos padrões  $\phi$ - $q$ - $n$  em ao decorrer do envelhecimento do cabo.



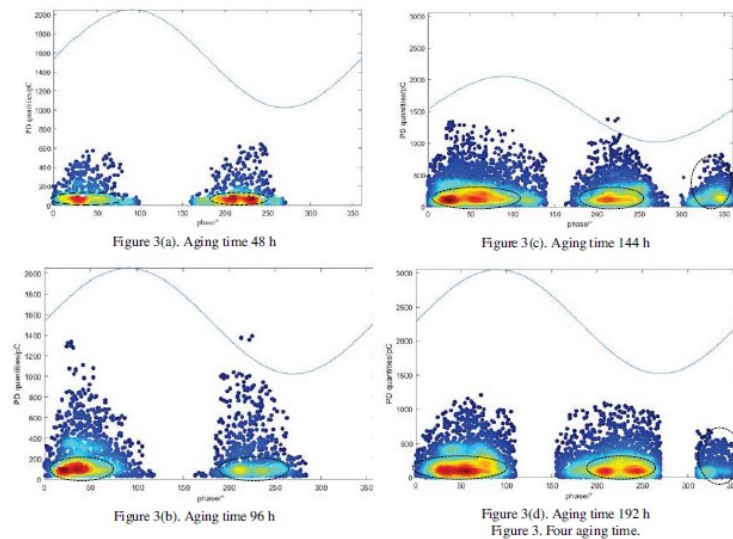
Fonte: Tokunaga *et al.* (2003).

É mencionado em Tokunaga *et al.* (2003), que o acréscimo repentino dos valores  $q$  e  $n$  são um indicativo do surgimento de arborescências elétricas e seu processo de desenvolvimento, tal indicador pode ser de grande auxílio no diagnóstico de cabos isolados. De forma semelhante, foi estudado em Xiang *et al.* (2019) o comportamento dos padrões de DPs ao longo do envelhecimento de um cabo isolado a borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM) de 100 kV, este material ocupa uma crescente proporção dos cabos utilizados em linhas de transmissão submarinhas e possui temperatura máxima de operação em torno de 140 e 150°C.

O estudo utilizou a temperatura de envelhecimento de 160°C e tempos de envelhecimentos de 48 h, 96 h, 144 h e 192 h de acordo com a norma IEC 60216-1-2013. Para cada tempo de envelhecimento foram retirados um total de 80 imagens dos padrões, as quais foram divididas em dois grupo de 40 imagens para cada tempo de envelhecimento. Desta forma, os grupos foram utilizados como base para um treinamento e teste de um algoritmo de aprendizagem de máquina que tem o objetivo de identificar o nível de degradação da isolação pela análise das características presentes nas imagens obtidas.

Entre as características do espectro PRPD utilizadas no algoritmo tem-se: níveis de cores, aspecto da textura e aspecto do formato dos padrões. Um exemplo das imagens obtidas é mostrado na Figura 4.6. Em relação ao aspecto da textura são considerados fatores como: a intensidade dos pixels, o contraste entre os pontos mais claros e mais escuros da imagem e a variação horizontal e vertical dos pontos.

Figura 4.6 – Exemplo do comportamento dos padrões ao longo do envelhecimento do cabo.



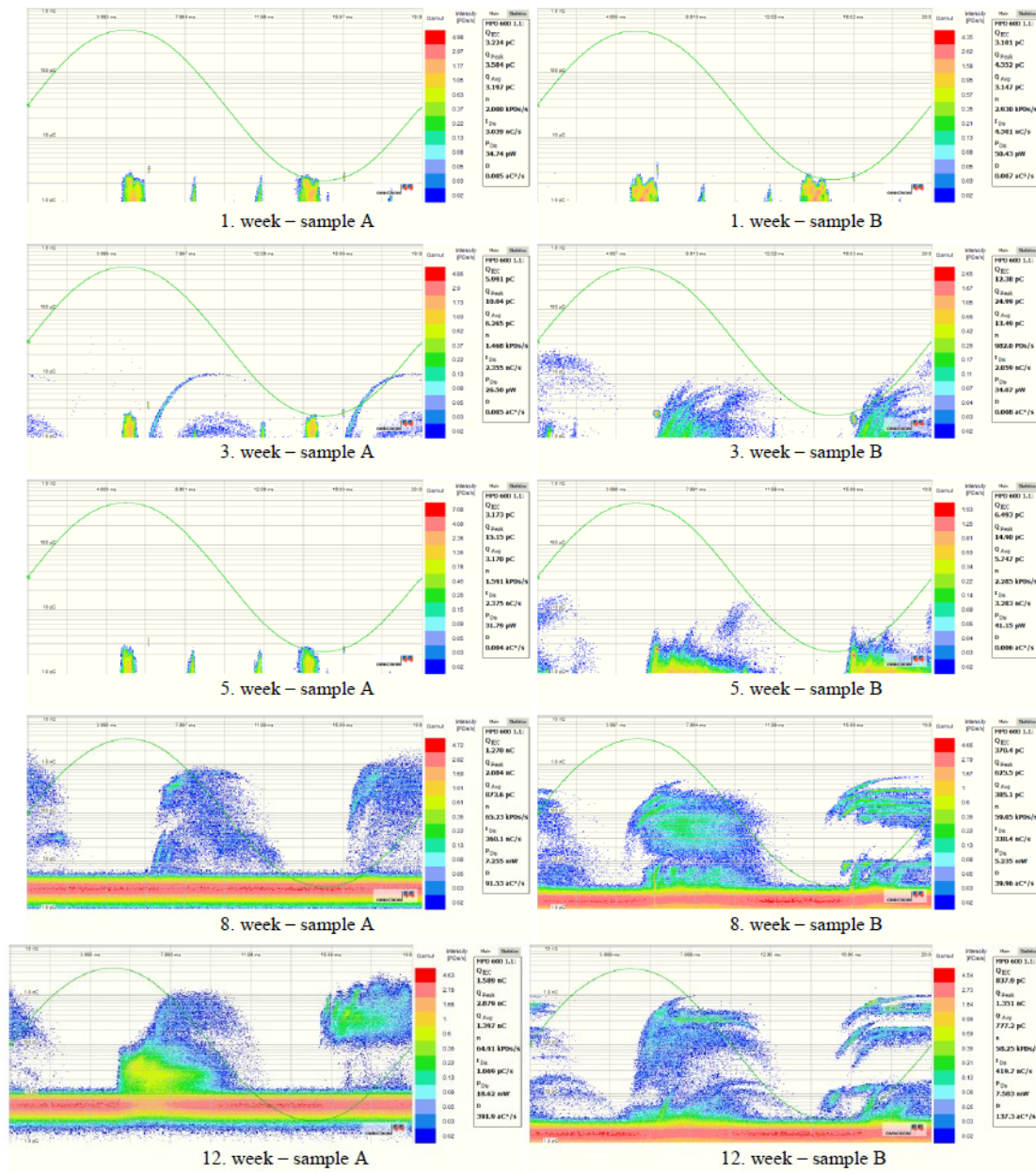
Fonte: Xiang *et al.* (2019).

De forma análoga, em Knenicky *et al.* (2018) é realizado o estudo da evolução dos padrões PRPD de duas espécimes de cabos XLPE de 22 kV ao longo do envelhecimento acelerado por métodos térmicos (circulação de corrente) e por tensão. Durante as diversas condições de envelhecimento os padrões de DPs foram obtidos para ambas espécimes em análise, Figura 4.7.

Foi relatado pelos autores em Knenicky *et al.* (2018) que a evolução dos padrões PRPD pode ser dividida em quatro estágios. No primeiro estágio, DPs não são detectadas e os padrões são ruídos presentes nas medições. No segundo estágio, DPs pequenas aparecem. O terceiro estágio é caracterizado por uma atenuação das DPs. No quarto e último estágio, acontece um aumento significativo da atividade de DPs, com a gradual extinção de DPs de pequena magnitude para o polaridade negativa da tensão aplicada.

Em ambas Figuras 4.6 e 4.7, é perceptível que o comportamento do padrões seguem uma tendência ao longo do envelhecimento do material isolante. Nos estágios iniciais os padrões obtidos possuem formatos mais estreitos que relembram uma orelha de coelho, por esta razão são conhecidos como padrões “*rabbit-like*”. Enquanto nos estágios finais os padrões são mais preenchidos e relembram o formato de um casco de tartaruga e por isso são conhecidos como padrões “*turtle-like*”.

Figura 4.7 – Padrões DP durante o envelhecimento acelerado de cabos de média tensão.

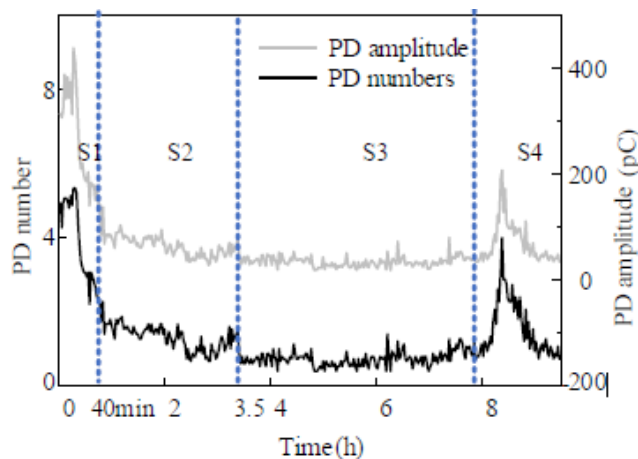


Fonte: Knenicky *et al.* (2018)

É interessante ressaltar que o fenômeno de atenuação das DPs do terceiro estágio também é visível nos padrões mostrados por Tokunaga *et al.* (2003), na passagem de 96 a 144 h de tempo de envelhecimento, como mostrado pela Figura 4.5 e também pelos resultados encontrados em Kim *et al.* (2004). Para o último estágio, o crescimento significativo das arborescências elétricas é a principal causa do aumento da atividade de DPs e a mudança dos padrões de “*rabbit-like*” (presentes nos estágios iniciais) para padrões “*turtle-like*”.

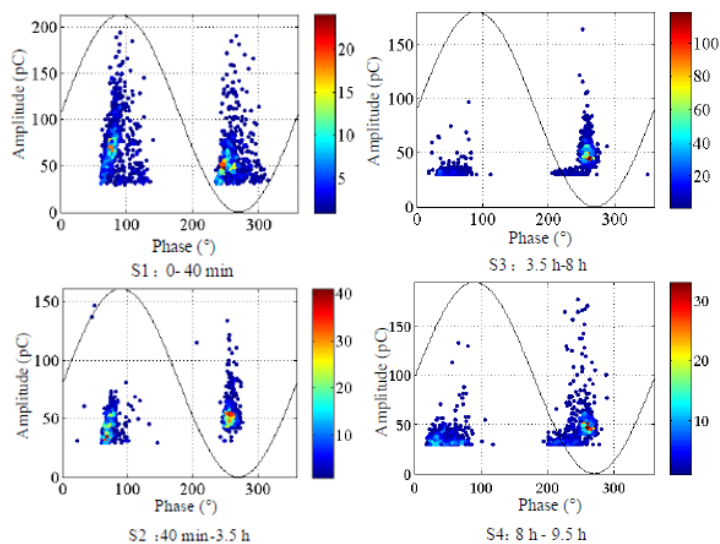
Resultados semelhantes são encontrados em Feng *et al.* (2021), onde as amplitudes e números de descargas encontrados são mostrados na figura 4.8 e os padrões na figura 4.9. O método de envelhecimento utilizado foi um método combinado de envelhecimento térmico e por tensão em um cabo XLPE de  $U_0 = 35$  kV. O comportamento dos padrões e dos parâmetros das DP's foram divididos em quatro estágios, sendo o primeiro, caracterizado pela elevação de temperatura até a temperatura de teste, e esta elevação rápida da temperatura é responsável por facilitar a presença de descargas parciais, desta forma, a amplitude e números de descargas observados neste estágio são relativamente altos.

Figura 4.8 – Amplitudes e números de descargas obtidas durante o teste de envelhecimento acelerado.



Fonte: Feng *et al.* (2021)

Figura 4.9 – Padrões obtidos para os diferentes estágios de envelhecimento.



Fonte: Feng *et al.* (2021)



Os padrões observados no primeiro estágio apresentam uma característica de simetria entre as distribuições de descargas nas metades positivas e negativas, a qual é um indicador de descargas internas.

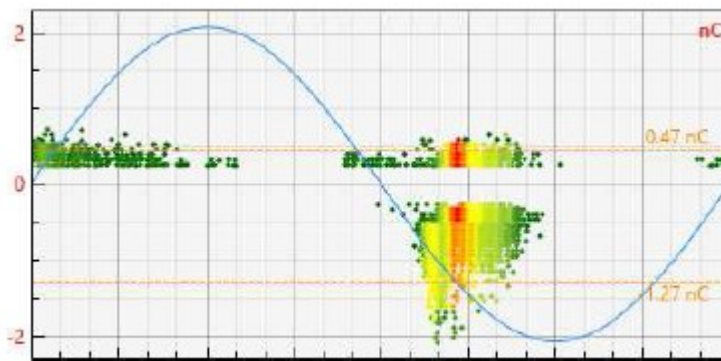
No estudo realizado em Kim *et al.* (2004), também foi observado o comportamento do formato dos pulsos de DPs ao longo dos diferentes estágios de envelhecimento. A partir do estágio em que ocorre a atenuação sutil da ocorrência de DPs é observado que existe um pulso de corrente inicial mais “estreito” que os demais pulsos seguintes. Para o último estágio de envelhecimento é observado que este pulso inicial possui magnitude muito menor, mas com tempo de subida e descida maiores que os demais pulsos. Embora a discrepância entre estes pulsos iniciais, o demais pulsos não apresentavam diferenças para ambos estágios de envelhecimento analisados.

#### ***4.3.6 Análise das características das DPs em cabos com múltiplos defeitos***

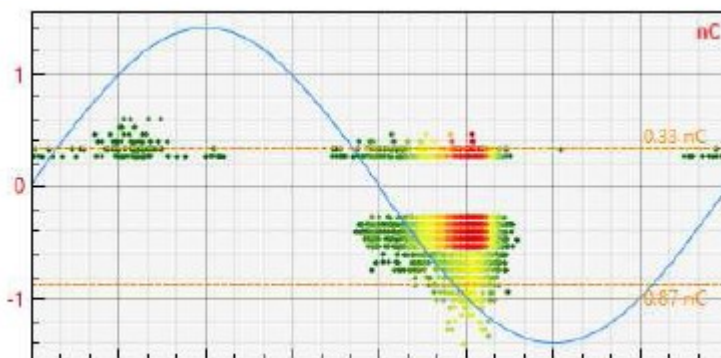
Um ponto importante a se considerar ao analisar as características das descargas parciais e seus comportamentos, é que em condições reais a quantidade de cavidades/defeitos presentes na isolação não é conhecida. Desta forma, surge a necessidade de conhecer como múltiplas cavidades que permitam a atividade de descargas parciais simultâneas possam influenciar as características dos parâmetros de DPs.

Atacando este problema, foi analisado em Polyakov *et al.* (2021) o comportamento dos padrões e formato dos pulsos em cabos XLPE de 10 kV para situações com defeito único e defeitos múltiplos. Foram realizadas medições para uma quantidade de até 6 defeitos no cabo, os padrões de cada situação foram obtidos, a figura 4.10 mostra três exemplos dos padrões encontrados.

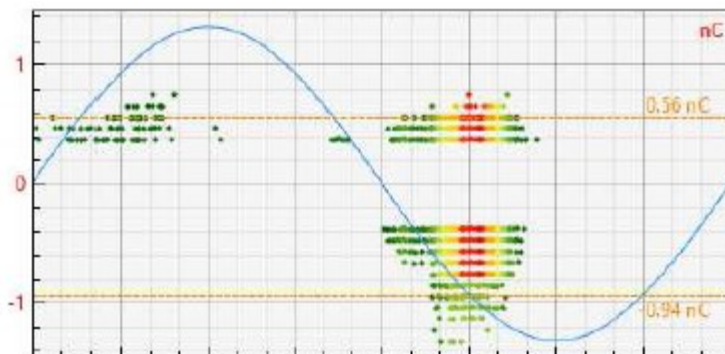
Figura 4.10 – Padrões de DPs para diferentes números de defeitos. (A): Padrão PRPD encontrado para o cabo com um único defeito. (B): Padrão PRPD encontrado para o cabo com dois defeitos. (C): Padrão PRPD encontrado para o cabo com seis defeitos.



(A): Padrão PRPD encontrado para o cabo com um único defeito.



(B): Padrão PRPD encontrado para o cabo com dois defeitos.



(C): Padrão PRPD encontrado para o cabo com seis defeitos.

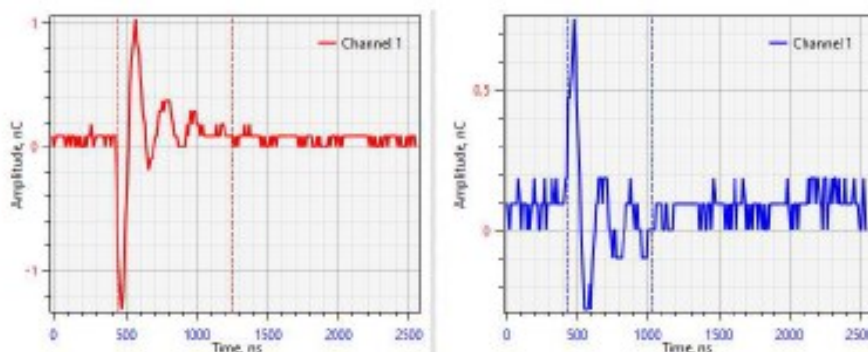
Fonte: Polyakov *et al.* (2021).

Todos os padrões obtidos são semelhantes entre si, isto ocorre pois, o tipo de defeito presente é o mesmo em todas as situações, além disto, as características de carga aparente e intensidade (potência) não mostraram nenhuma dependência em relação ao número de defeitos.

Em relação ao formato do pulso, o resultado encontrado também indicava que a quantidade de defeitos não influenciam de forma significativa esta característica, sendo apenas observado uma mudança na magnitude do pulso, figura 4.11. Tal comportamento

do formato do pulso não é esperado, já que diversos pontos de origens deveriam gerar diversos pulsos.

Figura 4.11 – Exemplos de pulsos DPs obtidos.



Fonte: Polyakov *et al.* (2021).

Desta forma, é importante ressaltar que o pequeno comprimento das espécimes utilizadas no estudo (cerca de 1,5 metros) pode ser a razão dos resultados serem semelhantes para todas as situações de teste e a dependência das características de DPs em relação ao número de defeitos presentes na isolação não foi estabelecida.

Com interesse semelhante, foi analisado por Zhu *et al.* (2016) a utilização de um algoritmo de probabilidade para a localização de múltiplas fontes de DPs em uma subestação isolada a ar. O método de medição utilizado no estudo em questão foi o método acústico UHF com arranjo de quatro antenas no total. A estratégia utilizada pelos autores foi baseada na utilização de um algoritmo de probabilidade para solucionar as equações encontradas pela utilização do método de Diferença do Tempo de Chegada (TDA) dos sinais DPs medidos. A combinação destas técnicas com o algoritmo de agrupamento *K-Means* para a separação dos sinais, possibilitou a detecção e localização de múltiplas fontes de DPs com alta acurácia.

Desta forma, pode-se inferir que uma aplicação semelhante em um sistema de cabos também será bem sucedida, desde que os sinais DPs medidos sejam obtidos com boa qualidade e os sensores sejam posicionados adequadamente. Este tipo de análise é de extrema importância para o diagnóstico completo do isolamento de cabos de média e alta tensão, a separação dos sinais em uma ou mais fontes pode significar um envelhecimento acelerado do material isolante e deve ser tratado apropriadamente.

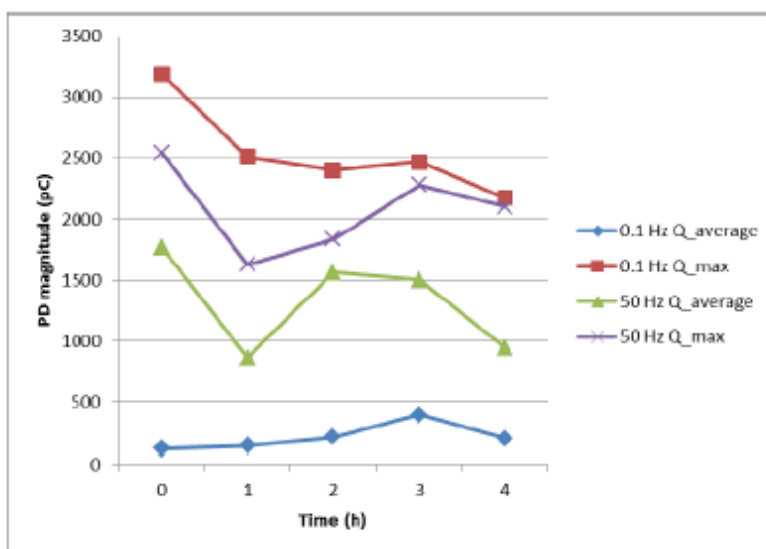
### 4.3.7 Diferenças de características para testes VLF e testes em 50 Hz

Foi estudado por Nguyen *et al.* (2016) a diferença entre os diversos parâmetros de DPs para quando o isolamento é testado sobre tensões com frequências de 0,1 Hz (VLF) e 50 Hz. O isolamento utilizado foi uma espécime de resina termoplástica com diâmetro de 50 mm e grossura de 3 mm, o mesmo foi submetido a medição de DPs sobre o método convencional IEC 60270 com tensão de 20 kV pico para ambas frequências desejadas.

Entre as características analisadas estão: descarga aparente máxima e média, figura 4.12, padrões, figura 4.13 e taxa de repetição, figura 4.14.

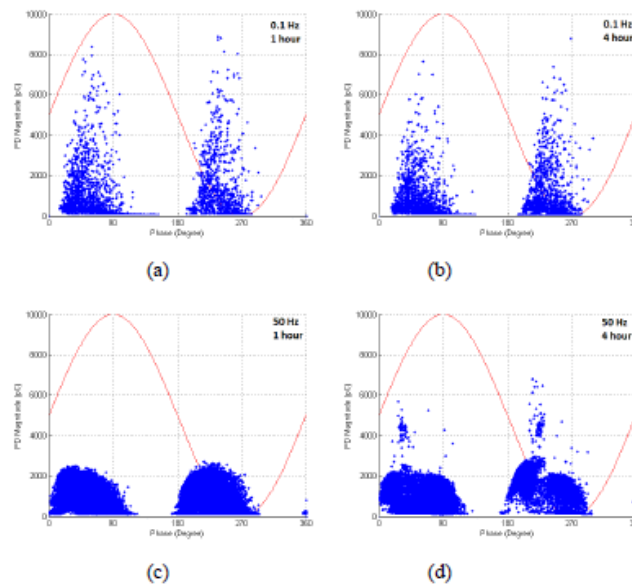
Entre os resultados foi observado que o comportamento das DPs para ambas frequências poderia ser dividido em dois estágios. No primeiro estágio, há a ocorrência de descargas de alta magnitude devido à falta de elétrons livres no início do teste, mas ao longo do período de teste as magnitudes das descargas diminuem e passam a ocorrer em instantes de tensão menores.

Figura 4.12 – Descarga aparente máxima e média para 0,1 Hz e 50 Hz.



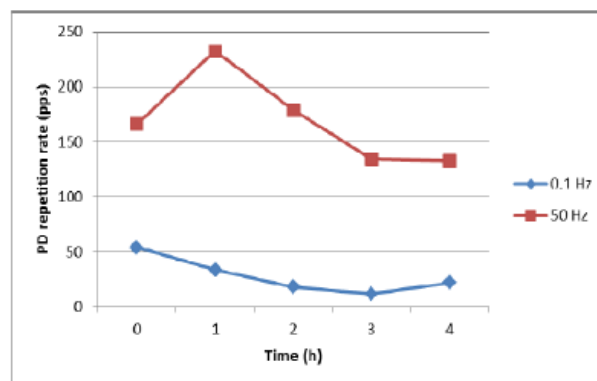
Fonte: Nguyen *et al.* (2016).

Figura 4.13 – Padrões PRPD para 0,1 Hz (a,b) e 50 Hz (c,d) para 1 e 4 horas após aplicação das tensões.



Fonte: Nguyen *et al.* (2016)

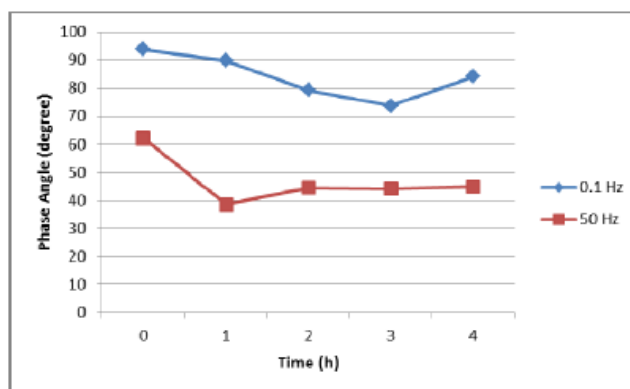
Figura 4.14 – Taxa de repetição para 0,1 Hz e 50 Hz.



Fonte: Nguyen *et al.* (2016)

É importante ressaltar que a diferença entre o tempo de duração deste primeiro estágio é substancial entre as duas frequências. Isto ocorre devido ao fato de que o tempo de excitação em frequência nominal (50 Hz) é muito menor do que em VLF (0,1 Hz). A principal diferença observada é em relação a distribuição dos padrões para ambas frequências, figura 4.13, onde os padrões obtidos no teste em 0,1 Hz possuem uma distribuição vertical e picos mais elevados que os padrões obtidos com aplicação da tensão em 50 Hz, o quais por sua parte se assemelham notoriamente aos padrões “*turtle-like*”.

Figura 4.15 – Distribuição da ocorrência de DPs em relação a tensão de aplicação.



Fonte: Nguyen *et al.* (2016).

Um aspecto importante que pode ser extraído desta análise é a relação da metodologia de teste utilizado com o resultados obtidos. Para os dois métodos utilizados por Nguyen *et al.* (2016) houve uma discrepância considerável em todos os parâmetros analisados (descarga aparente, taxa de repetição e formato dos padrões PRPD). Desta forma, implica-se que a escolha da metodologia de diagnóstico deve estar interligada com o método de detecção e medição escolhido, principalmente em análises baseadas em dados históricos como encontrado nas tabelas com faixas de referências para valores de descarga aparente.

A relação dos resultados obtidos em diferentes métodos de medição também pode ser utilizada como uma ferramenta auxiliar no diagnóstico, caso por algum motivo especial deseja-se comparar os dados obtidos por um método de medição com os dados históricos de outros métodos para avaliar a evolução do defeito, porém para essa estratégia ser eficaz necessita-se que a relação entre a resposta de ambos métodos esteja estabelecida previamente.

#### ***4.3.8 Evolução de DPs em relação ao crescimento de arborescências***

O crescimento das arborescência elétricas ocorre ao longo do envelhecimento do isolamento até a eventual falha, desta forma estas podem ser utilizadas como um grande indicador de estado da isolação. Pensando nisto, foi estudado em Lv *et al.* (2017) como as diferentes características de magnitude, intensidade e seus padrões de acordo com a estrutura e crescimento das arborescências em um material isolante de resina de epóxi. Um total de 10 espécimes foram submetidas a testes sobre tensões de 15 kV pico e

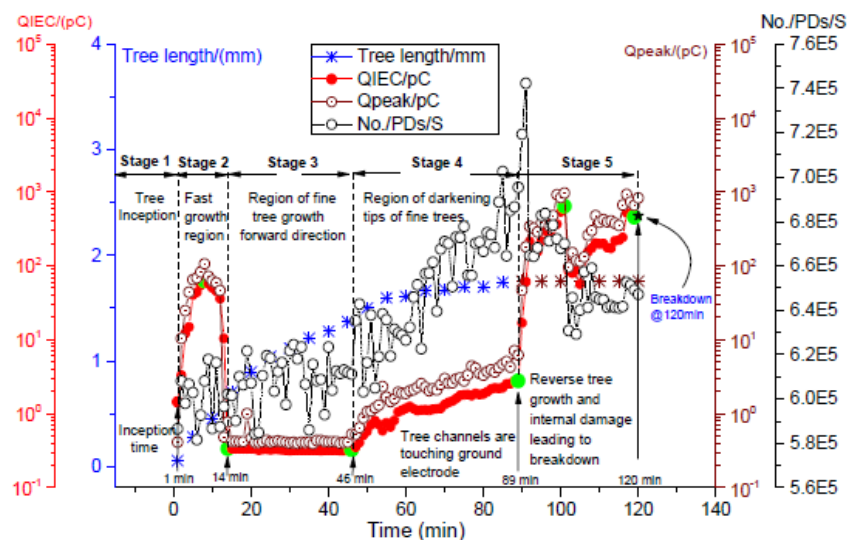
frequência de 50 Hz, imagens das arborescências foram obtidas a cada 60 segundos de teste, juntamente com as medições de DPs.

Com a análise das imagens e padrões obtidos, fica nítido a influência do tamanho da arborescência com o nível de atividade de DPs, sendo crescente até certo ponto (oitavo minuto). Foi apresentado pelos autores que canais mais longos de arborescências geravam DPs do tipo “wing-like” e suas magnitudes aumentavam linearmente com o comprimento do canal da arborescência, além disso, as descargas “wing-like” de alta magnitudes auxiliam no crescimento dos “galhos” das arborescência, pois são capazes de alcançar as pontas e a energia gerada pelas descargas contribui para o crescimento do galho de ocorrência das DPs. Em relação as descargas do tipo “turtle-like” foi observado que estas são geradas da atividade de DPs nas junções entre galhos e em galhos recém formados.

Também foi analisado por Idrissu *et al.* (2016) o comportamento da carga aparente e taxa de repetição das descargas parciais em relação ao crescimento da arborescência. Este estudo utilizou um setup parecido com o utilizado em Lv *et al.* (2017), a figura 4.16 mostra os resultados encontrados.

Os autores dividiram o estudo em cinco estágios de crescimento, onde, o primeiro estágio ou estágio de iniciação é quando surgem os primeiros indícios de arborescências elétricas e não foram realizadas medições de DPs neste período. A partir do segundo estágio, chamado de região de crescimento rápido, as arborescências começam a aumentar de comprimento e as características das DPs foram obtidas. Durante o segundo estágio foi observado altos valores de carga aparente.

Figura 4.16 – Características das DPs e crescimento das arborescências.



Fonte: Lv *et al.* (2017).

Durante o terceiro e quarto estágio são observados valores menores de carga aparente, porém o comportamento crescente da carga aparente e taxa de repetição juntamente com o crescimento das arborescências. Porém no último estágio, a taxa de repetição sofre uma queda, enquanto a carga aparente apresentar picos ainda maiores. Neste último estágio, também não ocorre mais o crescimento do comprimento das arborescências elétricas, mas sim o crescimento reverso partindo do segundo eletrodo de teste, este processo não leva a falha imediatamente, levando alguns minutos até a que a falha ocorra.

#### 4.3.9 Análise estatística para diagnóstico de cabos isolados

Em ordem de obter um diagnóstico apropriado e consistente de cabos isolados foi utilizado por Cichecki *et al.* (2008) modelos estatísticos baseados na análise de sobrevivência e intervalos de confiança para obter valores de amplitude de DPs que representem o envelhecimento de cabos isolados.

Para obter os valores dos intervalos de confiança foram realizados testes de envelhecimento por meio da aplicação contínua de tensão com duração de 8 semanas, diferentes sistemas de cabos com defeitos artificiais foram analisados e os resultados encontrados foram postulados por um modelo estatístico, tabela 4.12 e figura 4.17.

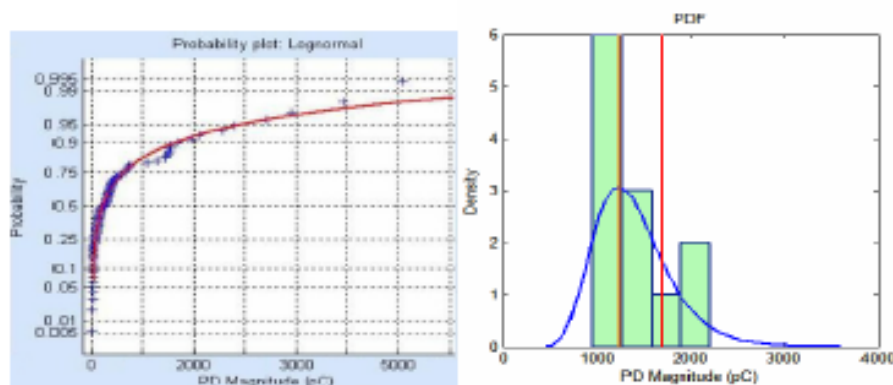
Tabela 4.13 – Estágios de envelhecimento para terminações de cabos.

Número de semanas	Amplitude média das DPs (pC)	Condição
2	1000	Muito boa
4	1200	Boa
6	1700	Moderada
8	3200	Ruim

Fonte: Cichecki *et al.* (2008).



Figura 4.17 – Modelo estatístico encontrado com fronteiras em 40% e 80%.



Fonte: Cichecki *et al.* (2008).

A escolha das fronteiras veio a partir dos valores de 1200 pC e 1700 pC que representam a transição entre as condições de “boa” para “moderada”. Efetivamente, os valores de 40% e 80% representam o nível de confiabilidade do sistema, ou seja, 40% das espécimes chegam a falha com 1200 pC e 80% chegam a falha com 1700 pC.

Com isso, também foram analisados diferentes sistemas de distribuição com nível de tensão de 20 kV. O estudo possui 3 grupos, sendo o primeiro consistente de 30 circuitos trifásicos de cabos isolados a massa de papel, o segundo grupo é formado por nove circuitos trifásicos de cabos XLPE e o terceiro grupo possui 42 circuitos trifásicos de cabos com isolação mistas. Os parâmetros analisados incluíam a magnitude de DPs durante a aplicação da tensão de início (PDIV), a magnitude de DPs durante a tensão de serviço ( $U_0$ ) e a magnitude de DPs durante a aplicação da tensão de  $1,7U_0$ .

A partir da análise estatística é possível estimar as fronteiras de valores perigosos que representam o envelhecimento do cabo, os resultados encontrados são observados na Tabela 4.14.

De forma similar, também foi estudado em Cichecki *et al.* (2008) onze sistemas de transmissão com cabos de 50 kV isolados a óleo, porém, para estes sistemas foram realizadas medições dos valores da tangente de delta juntamente com as medições de DPs.

A análise estatísticas dos dados de DPs permite atribuir faixas de valores mais adequados para cada condição de deterioração do material isolante, como a tabela 4.12. A separação da análise entre os tipos de isolamento é importante para mapear a evolução dos defeitos em cada tipo de isolamento individualmente, além de avaliar a velocidade de evolução em cada um, o que gera um impacto diretamente no tempo de vida esperado para o cabo.

Tabela 4.14 – Valores para as fronteiras de 40% e 80%. “x” representa que a estimacão não foi possível ou que não havia espécimes.

Mass insulated cables (20kV)									
	Nr of samples			PD at PDIV		PD at Uo		PD at 1,7Uo	
	$PDIV \leq 0,3U_0$	$0,3 < PDIV < 1,2U_0$	$PDIV \geq 1,2U_0$	40%	80%	40%	80%	40%	80%
<b>Termination</b>									
Type 1	x	7	2	364pC	1147pC	x	x	442pC	1393pC
Type 6	6	29	15	358pC	910pC	x	x	439pC	1062pC
<b>Joints</b>									
Type 1	x	9	2	1394pC	4263pC	x	x	1407pC	4305pC
Type 3	x	10	4	389pC	1055pC	x	x	458pC	1289pC
Type 5	x	60	47	464pC	1122pC	262pC	601pC	560pC	1290pC
<b>Insulation</b>									
NA2XS(F)2Y	x	12	4	457pC	763pC	x	x	482pC	1113pC
NAEKBA	x	67	19	389pC	978pC	341pC	715pC	543pC	1363pC

Mix-insulated cables (20kV)									
	Nr of samples			PD at PDIV		PD at Uo		PD at 1,7Uo	
	$PDIV \leq 0,3U_0$	$0,3 < PDIV < 1,2U_0$	$PDIV \geq 1,2U_0$	40%	80%	40%	80%	40%	80%
<b>Termination</b>									
Type 1	x	9	14	425pC	1624pC	x	x	716pC	2387pC
Type 4	x	11	3	574pC	2356pC	x	x	1179pC	3573pC
Type 2	x	10	18	650pC	3499pC	x	x	1052pC	4792pC
<b>Joints</b>									
Type 1	x	30	35	485pC	1566pC	x	x	677pC	2152pC
Type 2	x	30	33	613pC	2484pC	x	x	783pC	2948pC
Type 3	x	34	10	426pC	933pC	x	x	783pC	1668pC
Type 5	x	35	5	304pC	758pC	x	x	414pC	1016pC
<b>Insulation</b>									
NA2XS(F)2Y	x	78	60	384pC	1050pC	x	x	534pC	1689pC
NAEKBA	x	92	50	390pC	1320pC	232pC	612pC	702pC	2100pC

XLPE insulated cables (20kV)									
	Nr of samples			PD at PDIV		PD at Uo		PD at 1,7Uo	
	$PDIV \leq 0,3U_0$	$0,3 < PDIV < 1,2U_0$	$PDIV \geq 1,2U_0$	40%	80%	40%	80%	40%	80%
<b>Termination</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>Joints</b>									
Type 1	x	7	4	1274pC	3896pC	x	x	1349pC	4130pC
Type 5	x	10	7	456pC	1212pC	x	x	417pC	1321pC
<b>Insulation</b>									
NA2XS(F)2Y	x	19	9	x	x	174pC	731pC	207pC	871pC

Fonte: Cichecki *et al.* (2008).

#### 4.4 Consideraes finais sobre os métodos de diagnóstico de cabos isolados

Com tudo apresentado neste capítulo, pode-se afirmar que existem uma grande diversidade de opções de métodos de diagnóstico de cabos isolados e cada um destes métodos possui pontos positivos e negativos. Em muitos casos, um método pode ser um complemento auxiliar a outro, pela análise de uma quantidade maior de informações

pode-se aprimorar a qualidade geral do diagnóstico. Com isso, a Tabela 4.15 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos principais métodos de diagnósticos de cabos isolados via descargas parciais apresentados neste capítulo.

Tabela 4.15 – Vantagens e desvantagens dos principais métodos de diagnóstico de cabos isolados via DPs

Diagnóstico via descargas parciais		
Método	Vantagens	Desvantagens
Diagnóstico por meio de tabelas com faixas de valores limites aceitáveis e críticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagnóstico é feito de forma rápida</li> <li>- Pode ser combinado com outros métodos para estimar o tempo de vida restante do componente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não existe um sistema com níveis de DPs unificado e preciso</li> <li>- A utilização de apenas uma característica de DPs (descarga aparente) pode gerar um diagnóstico incompleto</li> <li>- Grande discrepância entre valores encontrados em diferentes tabelas devido a diferença de nível de tensão, isolamento e outros</li> <li>- Não indica de forma limpa o risco que o componente tem de ir a falha</li> </ul>
Diagnóstico baseado em níveis de confiança de distribuições estatísticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite uma visão mais ampla sobre o risco de falha do componente</li> <li>- Leva em consideração o envelhecimento do cabo como um todo, não apenas a carga aparente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é sempre possível comparar os valores obtidos em um sistema com outros sistemas</li> <li>- Os valores estudados também se conectam as tabelas de valores limites, o que pode deixar o diagnóstico incompleto</li> </ul>
Diagnóstico por meio de sistemas de classificação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resume uma quantidade alta e complexa de informações em um único quadro de resultados/diagnósticos</li> <li>- Usualmente combinados com métodos de ação preventiva e preditiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cada sistema utiliza seu próprio critério na avaliação dos dados, fazendo assim, que o diagnóstico combinado ou o comparativo de diagnóstico não seja uma tática viável</li> <li>- Muitas vezes os critérios de formação das classes de classificação não são bem expostos</li> </ul>

Diagnóstico via análise dos padrões $\phi-q-n$	<ul style="list-style-type: none"><li>- Representa de forma visual 3 características das DPs</li><li>- Forma fácil e efetiva de relacionar o comportamento de diferentes características</li><li>- Padrões característicos já são conhecidos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Altamente dependente de dados históricos</li><li>- Qualidade dos dados obtidos é sensível a deformações na onda de tensão aplicada</li></ul>
--	--	--

## Capítulo 5:

# Proposta de Estratégia para Diagnóstico de Cabos Isolados com Sistema de Apoio à Tomada de Decisão

Tendo em mente os métodos e sistemas de diagnósticos discutidos nos capítulos anteriores, pode-se utilizar-se dos mesmos para a elaboração de um sistema/formulário mais completo e aprimorado, que não sofra com algumas das desvantagens encontradas nestes modelos. Porém, espera-se que tal aplicação eleve o nível de complexidade de análise exigida por parte do usuário; por essa razão, foi decidido dividir o sistema em etapas, para uma melhor compreensão.

Vale ressaltar que o princípio de análise/diagnósticos de cabos isolados, seja por meio de descargas parciais ou por qualquer outra característica, é baseada no mapeamento do comportamento de tais características (crescimento ou decaimento, por exemplo) ao longo do tempo de vida do equipamento. Dentre estas, a descarga aparente, por ser a mais utilizada, possui valores limites que podem ser utilizados como referência (ainda que haja grande divergência entre tais faixas limites, nas diferentes propostas encontradas na literatura). Porém, o mesmo não ocorre para outras características dos pulsos de descargas parciais, como a taxa de repetição, tensão de início e formato dos pulsos, as quais serão inseridas na metodologia a ser proposta nesse trabalho. Com isso, torna-se importante a avaliação de cada característica a partir das medições ao longo do tempo.

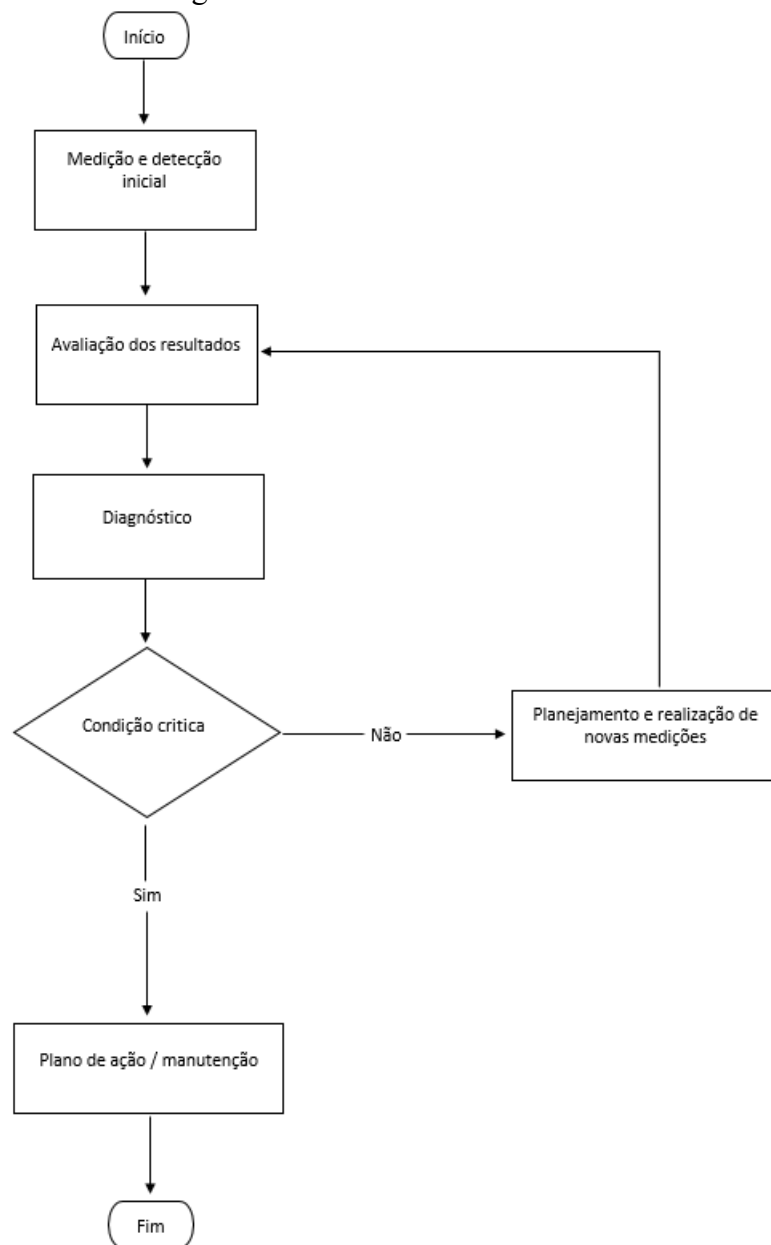
Um ponto importante em relação à análise a ser realizada é a distinção entre as características supracitadas, que podem ser utilizadas em metodologias de diagnóstico tanto *online* como *off-line*, e aquelas que podem ser aplicadas apenas em medições *off-line*. Comentários mais aprofundados sobre este aspecto serão apresentados oportunamente.

Portanto, para iniciar a descrição deste modelo/sistema, é mostrada na figura 5.1, a visão geral sobre o seu formato. Tal figura apresenta um sistema que altera o seu resultado final, representado pela ação a ser tomada (manutenção ou reavaliação periódica

do cabo), de acordo com o comportamento dos parâmetros analisados ao longo de novas medições. Com o que foi apresentado no Capítulo 4, sabe-se que a maneira mais prática de gerar um diagnóstico inicial de cabos isolados é por meio do valor de descarga aparente (em pC), desde que o sistema em análise seja semelhante (tipo de isolamento, nível de tensão, etc.) àquele utilizado para a criação da tabela de referência.

A principal vantagem de se utilizar tabelas de referências com valores limites de descarga aparente é a forma rápida com que isto pode ser feito; entretanto, isto custará na exatidão do diagnóstico.

Figura 5.1 – Fluxograma descritivo da estrutura do sistema/modelo adotado



Dentre os diferentes meios de se apresentar o diagnóstico, os sistemas de classificação, mencionados no Capítulo 4, são utilizados por concentrar uma quantidade maior de informações na formulação dos níveis destes sistemas, embora nem sempre as características que formam cada nível sejam expostas, o que gera dúvidas sobre a exatidão desses sistemas. Com isso, a combinação deste tipo de sistema com a divisão em estágios da evolução das características de descargas parciais pode representar uma ferramenta propícia para o diagnóstico de cabos isolados.

Por efeito destas circunstâncias e das variadas características das DPs que podem ser atribuídas ao diagnóstico, surge a necessidade da utilização de um sistema que integre tais características de maneira inteligente, a fim de aprimorar a eficiência e precisão do diagnóstico. Uma alternativa seria a utilização de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD).

## **5.1 Sistemas de Apoio à Tomada de Decisão (SAD)**

Um SAD pode ser definido como um sistema de informação computadorizado que combina modelos e dados em uma tentativa de resolver os problemas semiestruturados e alguns problemas não estruturados, com intenso envolvimento do usuário (Turban *et al.*, 2007). A utilização de um SAD é uma boa adição aos modelos de diagnóstico de cabos isolados, pois estes sistemas podem examinar várias alternativas rapidamente, além de poderem ser integrados a sistemas de comunicação e banco de dados.

Existem duas categorias de SAD, orientados a dados ou orientados a modelos. A primeira opção fornece ferramentas para a manipulação e análise de dados e permite a execução de diversos testes estatísticos. Já a segunda opção é baseada em um modelo matemático que represente o sistema (Turban *et al.*, 2007).

Com isso, neste capítulo será apresentado a formulação de um SAD para o diagnóstico de cabos isolados pela análise de DPs que combine os sistemas orientados a dados e os orientados a modelos, de forma a criar um sistema híbrido que permita avaliar o comportamento das diversas características dos pulsos DPs (além da descarga aparente) com base em um sistema de pesos e então, por fim, serão apresentadas algumas considerações sobre a utilização de um SAD.

## 5.2 Parâmetros e comportamentos significativos das DPs escolhidos para aplicação no diagnóstico com modelo SAD

Efetivamente, os defeitos encontrados na isolação de cabos evoluem ao longo do tempo com o crescimento das arborescências elétricas, até o momento que a arborescência infringe a isolação por completo, levando o cabo à falha. Como já apresentado nos capítulos anteriores, alguns trabalhos já mapearam algumas características de descargas parciais (descarga aparente e taxa de repetição) de acordo com a evolução das arborescências elétricas, o que facilita a elaboração de um diagnóstico sem a necessidade de visualizar tais arborescências. Desta forma, a combinação dos sistemas de classificação com os estágios de crescimentos das arborescências se mostra razoavelmente adequado para a concepção de um sistema de diagnóstico. O comportamento da descarga aparente e taxa de repetição de descargas parciais de acordo com o comprimento das arborescências elétricas é indicado na Tabela 5.1 abaixo construída com os dados de Lv *et al.* (2017), também apresentados previamente na Figura 4.16.

Tabela 5.1 – Descrição dos parâmetros de descarga aparente e taxa de repetição para os estágios de crescimento das arborescências elétricas

Estágio	Características
1° Estágio – Estágio de iniciação	Estágio de início da aparição de arborescências
2° Estágio – Região de crescimento rápido	Estágio no qual apresenta altos valores de descarga aparente, com baixa taxa de repetição
3° Estágio – Região de crescimento “fino” das arborescências	Os valores de descarga aparente se normalizam, mantendo-se praticamente constante durante todo este estágio. A taxa de repetição média tem uma tendência de aumentar levemente neste estágio.
4° Estágio - Região de escurecimento das pontas dos “galhos” das arborescências	Descarga aparente e taxa de repetição aumentam consideravelmente neste estágio, mesmo que o crescimento da arborescência não seja grande.
5° estágio – Região de crescimento das arborescências reversas e danos internos que levam à falha	Descarga aparente tem um grande aumento e a taxa de repetição sofre uma redução. Ocorre a iniciação de arborescências reversas e danos internos que conseqüentemente levam à falha. Vale ressaltar que este estágio não é instantâneo e pode ter um período considerável



	entre a iniciação dos fenômenos e a falha em si.
--	--

A Tabela 5.1 apresenta uma relação importante entre a evolução dos parâmetros de descarga aparente e taxa de repetição com o crescimento das arborescências elétricas, o que eventualmente causará a falha no isolamento. Porém, existe uma grande dificuldade de situar e estimar a duração relativa esperada para os estágios de evolução citados. Pelos resultados apresentados por Lv *et al.* (2017), é possível observar que os primeiros dois estágios possuem uma duração combinada menor que 12% (aproximadamente 13 minutos) do tempo total de teste (o qual foi realizado até a falha do isolamento), enquanto os restantes 88% (cerca de 107 minutos) tempo de teste é bem dividido entre os outros três estágios. Mas devido as particularidades de cada sistema (nível de tensão, tipo de isolamento, temperatura, umidade, etc.) é esperado, entre diferentes sistemas elétricos, variações na duração relativa de cada estágio de evolução, mas permanecendo as relações das características que os definem.

Com essas informações, a combinação da descarga aparente e taxa de repetição seria a combinação mais simples e efetiva para o diagnóstico inicial de um cabo isolado. Inclusive, o método de análise de padrões costuma utilizar estes dois parâmetros evidenciados ao longo da tensão fase de medição aplicada (Fuhr e Aschwanden, 2017). A visualização desses parâmetros em um gráfico permite a identificação de certos padrões que podem indicar certos comportamentos das arborescências elétricas (Knenicky *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2021), tal como descrito na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Descrição e particularidades dos tipos padrões de DPs

Tipo de padrão	Características
“Rabbit-like”	Padrões presentes nos estágios iniciais de envelhecimento do equipamento; assemelham-se às orelhas de um coelho, com espessura pequena e baixa amplitude.
“Turtle-like”	Padrões observados nos estágios mais avançados; assemelham-se ao casco de uma tartaruga, com alta amplitude e grande espessura. São geradas das atividades de DPs nas junções entre “galhos” das arborescências elétricas e em “galhos” recém formados.
“Wing-like”	São gerados pelos canais mais longos das arborescências e suas magnitudes aumentam linearmente com o

	comprimento do canal da arborescência; contribuem para o crescimento do galho onde há ocorrência de DPs.
--	--

A partir da combinação destas informações já é possível estimar com certa exatidão em qual estágio de degradação que o cabo se encontra. Entretanto, para medições e testes realizados de forma *off-line* é possível analisar o parâmetro de tensão de início, que é o menor valor de tensão em que as descargas parciais são detectadas. É conhecido que esta tensão de início ou PDIV tende a aumentar o seu valor com o aumento da degradação do defeito, devido a motivos já discutidos em capítulos anteriores.

Então, para testes realizados de forma *off-line*, é importante gravar as informações relacionadas ao parâmetro de PDIV, para que estes possam ser utilizadas no modelo completo de diagnóstico. Por outro lado, não existem faixas de valores ou incrementos tabelados para a análise desta elevação do valor de PDIV; assim, todo incremento observado deve ser tratado com cautela.

Semelhante a PDIV, a análise do formato do pulso de DPs também pode ser implementada no diagnóstico, é relatado que o pulso de DPs possui um formato mais “arredondado” nos estágios iniciais da vida útil do cabo, com amplitude menor e largura maior, e ao longo do envelhecimento este pulso se torna mais íngreme, passando a ter alta amplitude e largura pequena. Da mesma forma da PDIV, este parâmetro de formato de pulso não possui níveis tabelados de taxa de decaimento de largura ou algo semelhante, além de ter sido pouco explorado na literatura, portanto, deve ser utilizado com cautela.

Desta forma, os principais parâmetros de descargas parciais a serem considerados para o modelo de diagnóstico SAD a ser proposto são apresentados na Tabela 5.3, que descreve o comportamento esperado de cada um.

Tabela 5.3 – Descrição do comportamento dos parâmetros a serem considerados no modelo

Parâmetro	Características / Comportamento
Descarga aparente	A tendência da descarga aparente é ser crescente ao longo do tempo; porém, o nível de elevação varia de acordo com o estágio em que o cabo se encontra.
Taxa de repetição	A taxa de repetição é crescente até o último estágio, a partir do qual passa a apresentar um comportamento decrescente.

Padrões $\phi-q-n$	Os padrões nos estágios iniciais são os chamados de “rabbit-like”, enquanto que ao longo do envelhecimento e aumento da degradação do isolamento passam para os padrões do tipo “turtle-like”.
Tensão de início (Aplicável apenas para as metodologias <i>off-line</i> )	A tensão de início tende a aumentar com o envelhecimento do cabo, ou seja, a tensão mínima para a ocorrência de DPs é cada vez maior com o aumento da degradação do isolamento.
Formato do pulso	Ao longo da vida útil do cabo, o pulso de DPs passa a ser mais estreito e apresentar maior amplitude; ou seja, o pulso se torna mais íngreme ao longo do tempo.

Vale mencionar que existe um impasse sobre os comportamentos descritos na tabela 5.3, tal impasse é a divergência entre as etapas em que cada parâmetro apresentará os comportamentos correspondentes. Ou seja, com exceção da combinação de descarga aparente e taxa de repetição que foi apresentado na tabela 5.1, é difícil dizer se a evolução de um parâmetro será alinhada com a evolução dos demais, exemplificando: é possível que seja observado uma grande evolução do valor descarga aparente, mas por outro lado o formato do pulso observado não sofreu mudanças significativas, situação que pode gerar conflito no diagnóstico.

Então, com finalidade de contornar situações adversas sobre o comportamento de cada parâmetro, será utilizado um sistema de pesos que prioriza a avaliação dos parâmetros mais conhecidos e explorados pela literatura, porém, mantendo a avaliação dos demais parâmetros como ferramentas auxiliares.

É importante ressaltar que existe a possibilidade da ocorrência do fenômeno *Swarming pulsive micro discharges* (SPMDs), que ocorre no estágio final do tempo de vida do cabo e é caracterizado pelo decaimento anormal dos valores de descargas aparentes em conjunto com o aumento no número de pulsos ou taxa de repetição (Ehara et al., 2000), os quais são os comportamentos opostos ao esperado para estes parâmetros no estágio final.

Com isso, a proposta de diagnóstico com SAD a ser apresentada pode ser dividida entre as metodologias *off-line* e *online* e apresentará um esquema em fluxograma e sistema de pontuação, sendo o seu resultado apresentado na forma de um sistema de

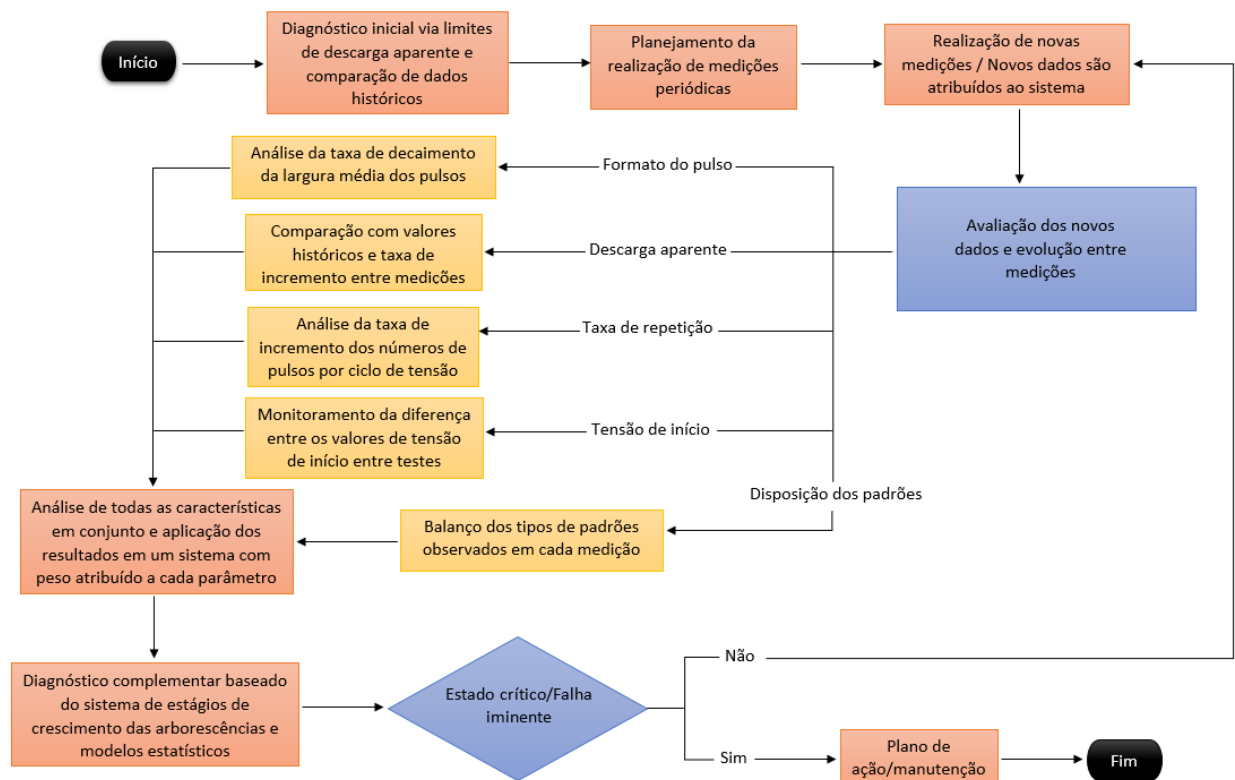
classificação dividido em estágios, da mesma forma em que os estágios de crescimentos das arborescências são divididos.

### 5.3 Divisão entre as metodologias de medição *off-line* e *online*

Devido às características individuais de cada sistema, a medição *online* pode ser prejudicada pela presença de ruídos externos, de forma que ruídos eletromagnéticos sejam confundidos com a atividade de DPs. Com isso, a obtenção e análise dos padrões e formato dos pulsos são cruciais, sendo que a qualidade da análise destes fatores pode exigir a utilização de técnicas de filtragem de sinais para a remoção de ruídos externos. Os testes *online* podem ser divididos em quatro etapas, que evoluem de acordo com o nível do defeito detectado como exibido na figura 4.1 no capítulo 4.

Para os testes *off-line*, tem-se a adição da análise da tensão de início como parâmetro de análise e uma preocupação reduzida quanto a ruídos externos. O princípio geral a ser seguido é demonstrado no fluxograma apresentado pela figura 5.2.

Figura 5.2 – Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico de cabos isolados



Para ambas metodologias de medição (*online* e *off-line*), a combinação entre a descarga aparente e taxa de repetição terá o maior impacto no diagnóstico, devido à maior quantidade de estudos e dados históricos sobre o comportamento de ambos, de forma que as demais características podem ser consideradas como parâmetros auxiliares/adicionais.

O fluxograma apresentado na figura 5.2 serve apenas como um trilho a ser seguido para a realização do diagnóstico, as escolhas dos parâmetros e os sistemas auxiliares a serem utilizados fica a decisão do usuário, embora é recomendado a utilização do maior número de parâmetros possíveis e utilização de sistemas auxiliares como os modelos estatísticos ou sistemas de classificação.

Uma alternativa de análise encontrada em modelos avançados de diagnóstico de Tangente de Delta é a “velocidade de envelhecimento”, que considera a relação da variação de valores entre medições e o tempo de utilização do cabo ou equipamento. De forma semelhante, os parâmetros “auxiliares” de DPs a serem aplicados podem ser um indicativo entre a evolução rápida ou lenta do defeito, mesmo sem mudanças significativas em outros parâmetros. Por exemplo, a tensão de início pode sofrer alterações enquanto a descarga aparente permanece a mesma; essa e outras situações devem ser consideradas para evitar surpresas/mudanças drásticas entre uma medição e outra. O padrão mais utilizado entre a disposição de medições é mostrado na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Exemplo de estratégia adotada para repetição das medições de acordo com o nível de DPs encontrado

Nível de DPs	Ação
Baixo	Próxima medição em torno de 12+ meses
Médio	Próxima medição em torno de 6 meses
Alto	Manutenção / Troca do condutor

Com a utilização da análise de velocidade de envelhecimento e com modelos estatísticos que tragam estimativas em relação ao tempo de vida restante até a falha, é possível alcançar uma disposição mais segura de medições periódicas, sem prejudicar o funcionamento do sistema para que sejam feitas medições constantes.

Um ponto a ser estudado mais profundamente é a combinação entre os diagnósticos de DPs e Tangente de Delta. Já se sabe que a utilização de ambos de forma conjunta é favorável para o diagnóstico; porém, encontrar os estágios em que seria mais vantajosa a utilização de ambos testes requer uma sequência de análises, principalmente

em relação ao tipo de defeito a ser detectado, já que as arborescências (*water trees*) não geram descargas e, portanto, não são detectadas nos testes DP; por outro lado, os defeitos que geram descargas podem não ser detectados adequadamente pelos testes de Tan de Delta. Com isso, uma análise inicial sobre o ambiente de instalação pode estabelecer a necessidade ou não da utilização de um ou mais modelos de testes, sendo que alguns dos fatores a serem considerados são o nível de umidade, se há ou não ventilação no ambiente, idade da instalação, etc.

Deve-se considerar que nem sempre é possível conciliar a utilização de ambos testes, seja por motivos financeiros, logística ou devido ao método de detecção escolhido (VLF, DAC, convencional, medição *online*, etc.). Por isso, a aparição repentina de um defeito com elevado valor de descarga aparente pode ser indicativo de uma evolução de um defeito de arborescência a ponto de surgir arborescência elétrica.

#### 5.4 Considerações para a Formulação do SAD

Como mencionado anteriormente, a ideia central da utilização de um SAD para o diagnóstico de cabos é a aplicação de um sistema de pontuação com pesos para os parâmetros de DPs e outros parâmetros auxiliares (Tangente de Delta) disponíveis. Desta forma, a Tabela 5.5 apresenta a divisão de prioridade escolhida para cada parâmetro.

Tabela 5.5 – Divisão de prioridade dos parâmetros no sistema de pontuação

Descarga aparente	Parâmetro principal – valor de pontuação maior deverá ser atribuído a este parâmetro
Taxa de repetição	Parâmetro principal – valor de pontuação maior deverá ser atribuído a este parâmetro
Tensão de início	Parâmetro secundário – um valor menor de pontuação será aplicado a este parâmetro / dependente da variação entre medições;
Formato do pulso	Parâmetro secundário – um valor menor de pontuação será aplicado a este parâmetro / dependente da variação entre medições;
Padrões <i>PRPD</i>	Parâmetro secundário – um valor menor de pontuação será aplicado a este parâmetro

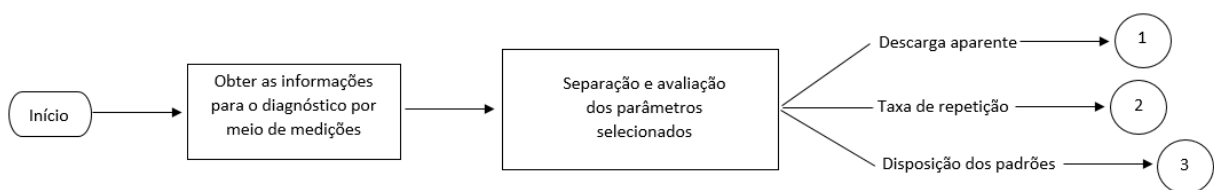
Tangente de Delta	Parâmetro auxiliar – aplicação em situações específicas e com pontuação similar ou igual a dos parâmetros principais;
-------------------	---

O principal desafio no momento é buscar uma forma de obter o melhor diagnóstico inicial (primeira medição do sistema) sem bases de comparação dos parâmetros secundários, já que a avaliação destes é feita de forma mais efetiva a partir da segunda medição, por meio da avaliação de crescimento entre medições.

Assim, o objetivo é elaborar um sistema de classificação com 4 ou 5 faixas que descrevem o nível de degradação do isolamento (baixo, intermediário, alto e crítico) e estabelecer um limite de pontuação para cada faixa, de forma que, a pontuação dos parâmetros analisados será obtida pelo sistema de pontuação integrado ao SAD.

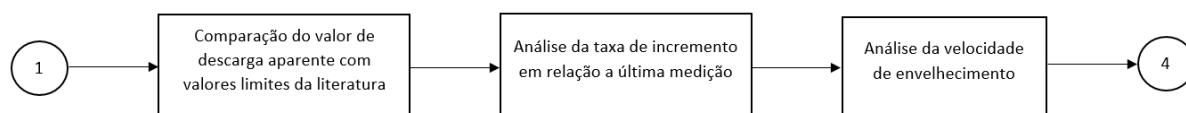
Desta maneira, uma opção mais “simplificada” para a análise/diagnóstico de cabos, a qual também pode ser aplicada no diagnóstico inicial, seria utilizar apenas os parâmetros e características que podem ser abstraídos dos padrões *PRPD*, que são a descarga aparente, a taxa de repetição e o ângulo de ocorrência ( $\phi$ ), os quais em conjunto determinam disposição de cada padrão. Com essas informações, pode-se utilizar o esquema a seguir para efetuar o prognóstico da condição do isolamento de cabos de potência.

Figura 5.3 – Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 1



Cada parâmetro será primeiramente analisado de forma individual. Caso o diagnóstico em questão seja o primeiro realizado em um dado sistema de cabos, não será possível empregar uma análise com base na taxa de incremento ou na velocidade de envelhecimento; neste caso, uma alternativa é utilizar dados de um sistema semelhante (nível de tensão, tipo de isolamento, método de medição, etc.) para critérios de comparação.

Figura 5.4 - Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 2

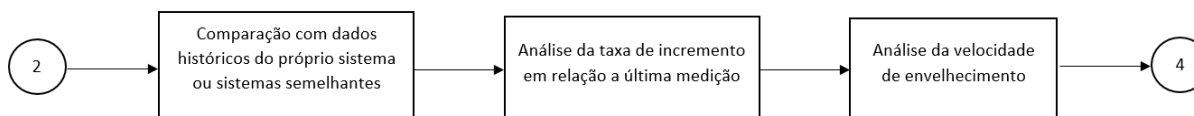


Pelo fato da descarga aparente ser o parâmetro mais utilizado para diagnosticar o estado do isolamento de cabos, pode-se encontrar diversas tabelas com valores limites adequados na literatura que podem auxiliar na análise inicial a ser feita. Vale ressaltar que é importante utilizar a tabela de referência que foi formulada com base nas características mais semelhantes possíveis do sistema analisado, principalmente em nível de tensão e tipo de isolamento.

O propósito de análise da taxa de incremento (ou decaimento) é identificar em qual dos estágios de sua vida o cabo está, o que, quando feito na análise conjunta com a descarga aparente, possibilita uma representação mais adequada do estado da isolação e proporciona uma melhor decisão em relação a realização das próximas medições e/ou intervenção para reparo ou troca do cabo.

Quanto à taxa de repetição, não se pode fazer o mesmo tipo de análise individual da descarga aparente, pois não há registros de valores de referência para este parâmetro. Por outro lado, o comportamento deste parâmetro ao longo do tempo de vida do cabo é conhecido e pode ser utilizado como um indicativo do envelhecimento do isolamento.

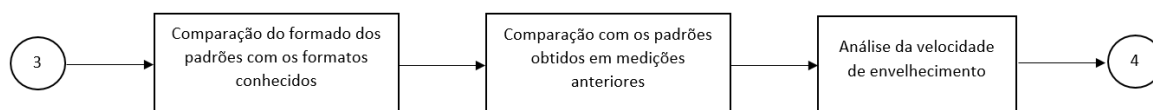
Figura 5.5 - Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 3



Já para os Padrões *PRPD*, o formato obtido pode ser utilizado como um indicativo do envelhecimento da isolação do cabo, sendo que formatos mais estreitos e pontiagudos (conhecidos como “*rabbit-like*”) são comuns nos estágios iniciais do tempo de vida do cabo, enquanto formatos mais preenchidos e fechados (“*turtle-like*”) são mais comuns nos estágios mais avançados da vida do cabo.



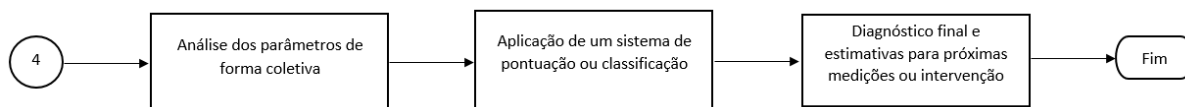
Figura 5.6 - Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 4



Desta forma, é comum a utilização de algoritmos de inteligência artificial para o melhor reconhecimento destes padrões, principalmente para a separação dos ruídos presentes nas medições com o que são, de fato, descargas parciais. Geralmente, o equipamento de medição de DPs é equipado com um *software* que permite obter tais padrões, e, dependendo da qualidade da medição, os mesmos podem ser facilmente reconhecidos mesmo sem a utilização de algum algoritmo secundário que realizaria esta função.

Por apresentar visualmente mais de uma característica das DPs e possuir comportamento conhecido, os padrões PRPD são uma opção atrativa de análise para o diagnóstico inicial de cabos isolados. A combinação de todos os parâmetros mencionados com a análise de evolução ao longo do tempo permite um resultado mais preciso no diagnóstico. Portanto, a próxima etapa será constituída basicamente do processo de verificação de cada análise individual dos parâmetros com os comportamentos esperados dos conjuntos e da aplicação do sistema de pontuação aos resultados encontrados.

Figura 5.7 - Esquema da estratégia utilizada para o diagnóstico inicial – Parte 5



A análise dos parâmetros de forma coletiva tem como principal objetivo evitar falsos diagnósticos que podem ser gerados quando se foca no comportamento de apenas um parâmetro. Com isso, é importante que o sistema de pesos e o sistema de classificação seja construído de forma adequada, levando todos os parâmetros em consideração de forma individual (quando conveniente) mas também de forma conjunta.

### 5.4.1 Tabela de pontuação para o SAD – Opção 1

Dentre os parâmetros a serem considerados nesta etapa, a descarga aparente e os padrões PRPD possuem um comportamento mais uniforme, tornando mais simples atribuir pesos a suas evoluções. Porém, como relatado na Tabela 5.1, a taxa de repetição apresenta um comportamento menos uniforme, ou seja, pode sofrer grandes incrementos ou decaimentos em seu valor dependendo do “estágio” em que o isolamento se encontra. Portanto, os pesos atribuídos a este parâmetro no sistema a ser apresentado serão baseados nas variações que o parâmetro apresentar e não em seu valor absoluto. A Tabela 5.6 apresenta os valores iniciais de pontuação a serem atribuídos a cada parâmetro.

Tabela 5.6 – Parâmetros e respectivas pontuações para diferentes situações

Parâmetro	Situação	Pontuação
Descarga aparente	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>normais</i>	1 ponto
	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>perigosos</i>	3 pontos
	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>críticos</i>	5 pontos
Taxa de repetição	Valores <i>baixos ou regulares</i> de taxa de repetição	1 ponto
	Valores <i>altos</i> de taxa de repetição	2 pontos
	Variações repentinas no valor de taxa de repetição*	+2 pontos
Padrões PRPD	Presença de Padrões “Rabbit-like”	1 ponto
	Presença de Padrões “Turtle-like”	3 pontos
	Presença de Padrões “Wing-like”*	+1 ponto

\*Essas pontuações sempre serão aplicadas em conjunto com outra pontuação referente ao mesmo parâmetro e não será aplicada de forma individual.

A Tabela 5.6 apresenta o valor total a ser atribuído ao sistema analisado pela soma das pontuações obtidas em cada parâmetro. Já a Tabela 5.7 mostra os níveis de degradação do isolamento esperados para as faixas de pontuações possíveis.

Tabela 5.7 – Faixas de pontuações para os níveis de degradação – SAD1

Pontuação	Nível do defeito
$\leq 3$	Normal
$> 3 \text{ e } < 8$	Intermediário
$\geq 8 \text{ e } \leq 10$	Alto
$> 10$	Crítico

A confecção da Tabela 5.7 foi realizada pela combinação dos pontos atribuídos na Tabela 5.6 com a análise dos comportamentos de cada parâmetro ao longo do tempo, como os descritos na Tabela 5.8, apresentada mais à frente.

Mesmo com a divisão de valores apresentada pela Tabela 5.6, existem algumas considerações que devem ser feitas ao se fazer o diagnóstico pelo modelo apresentado, como a escolha da tabela de valores referência a ser utilizada para a descarga aparente deve ser de um sistema que se assemelhe ao máximo ao sistema de cabos em análise e também a evolução que os Padrões *PRPD* podem sofrer entre medições sem trocar o seu “tipo”, ou seja, os padrões “turtle-like” podem aumentar de tamanho entre medições e esta evolução não é levada em conta na tabela de pontuação apresentada. Por esta razão, a etapa de análise dos parâmetros em conjunto faz parte do processo de diagnóstico, permitindo avaliar o nível do defeito com base em comportamentos já conhecidos, como os relatados na Tabela 5.1, e os comportamentos anormais, como o fenômeno das SPMDs.

Assim, a Tabela 5.8 apresenta as características que se deve atentar em relação aos valores de descarga aparente e taxa de repetição e o que tal comportamento pode representar para o sistema em análise.

Tabela 5.8 – Descrição das situações relevantes para a relação dos parâmetros de descarga aparente e taxa de repetição

Comportamento	O que equivale
Valores considerados baixos para ambos os parâmetros de descarga aparente e taxa de repetição	Fase inicial do envelhecimento do cabo. Nenhum dos parâmetros representa risco em potencial.
Valores baixos/intermediários de descarga aparente e valores intermediários de taxa de repetição	Característico do início da fase intermediária do envelhecimento da isolamento. Não representa risco iminente; porém, vale monitorar a rapidez da evolução dos parâmetros.

Valores baixos/intermediários de descarga aparente e valores altos de taxa de repetição	Característico do final da fase intermediária do envelhecimento da isolação.
Valores altos de descarga aparente e valores altos de taxa de repetição	Início do último estágio da vida do isolamento.
Valores altos de descarga aparente e valores intermediários de taxa de repetição	Típico do último estágio da vida do isolamento, no qual a taxa de repetição tende a diminuir e a descarga aparente aumentar.
Valores baixos de descarga aparente e valores altos da taxa de repetição.	Característico do fenômeno das SPMDs, principalmente se ambos os parâmetros sofrem uma mudança repentina/brusca de seus valores, sendo o decaimento da descarga aparente e a elevação da taxa de repetição

A Tabela 5.8 permite corrigir algum erro ou distorção que possa ocorrer na análise dos parâmetros no sistema de pontuação e localizar de forma mais adequada a situação em que o isolamento do cabo se encontra no momento e o que isto afeta para o restante do seu tempo de vida em operação.

Os padrões *PRPD* não são utilizados nesta etapa, pois os parâmetros de descarga aparente e taxa de repetição já estão inseridos nos padrões, restando, assim, apenas o ângulo de ocorrência ' $\phi$ ' para ser utilizado como parte do SAD. Porém, o estudo sobre o ângulo de ocorrência é muito limitado, sendo uma melhor alternativa a utilização da disposição dos padrões como um todo, podendo incluir métodos de reconhecimento de padrões com base em aprendizado de máquina.

A Tabela 5.8 mostra a importância de se realizar medições periódicas e de se guardar as informações obtidas. A análise do comportamento dos parâmetros ao longo do tempo permite uma visão mais adequada da evolução do defeito, o que é de grande auxílio na formulação do diagnóstico.

Uma questão importante é a relação entre a classificação dos níveis do defeito citados pela Tabela 5.7 e os estágios de degradação da Tabela 5.1, pois embora ambos sejam divididos em basicamente quatro ou cinco estágios relevantes, afirmar que os estágios de ambas tabelas podem ser representados de forma equivalente é inadequado, por exemplo: o estágio 5 da Tabela 5.1 pode apresentar características dos níveis críticos e altos da Tabela 5.7 e não apenas críticos.

Devido às características peculiares de iniciação do defeito dos Estágios 1 e 2, pode-se omiti-los desta comparação, restando os Estágios 3, 4 e 5 para os quatro níveis possíveis da Tabela 5.7. Desta forma, a maneira mais adequada se relacionar ambos sistemas seria estabelecer o Estágio 3 como nível normal, por apresentar valores de descarga aparente pequenos que não sofrem variações durante este estágio. Então, o nível intermediário representa a parte inicial do Estágio 4, devido a evolução dos parâmetros, porém a parte mais próxima da transição do Estágio 4 para o Estágio 5 pode ser classificada como nível alto de degradação. Por fim, o Estágio 5 seria o nível crítico de degradação.

Esta comparação permite consolidar o risco potencial de cada faixa Tabela 5.7 representa, o que é um ponto muito criticado de outros métodos de diagnósticos, principalmente os métodos que utilizam um sistema de classificação em cores ou números. Uma outra alternativa para verificar o risco em potencial e a probabilidade de falha do sistema com base nos resultados do diagnóstico seria a partir da verificação dos resultados conforme um modelo estatístico, porém, nem todo modelo é viável para esta aplicação. O modelo só é viável se os cabos utilizados para sua confecção forem semelhantes aos cabos analisados e caso o método de medição seja o mesmo utilizado para ambos, tais fatores limitam este tipo de análise mas a não eliminam como uma opção.

Nada impede a implementação de outras ferramentas como a análise dos dados do cabo de acordo com os modelos estatísticos já conhecidos ou a utilização de dados de tangente de delta que também podem ser medidos. Porém, a ideia principal desta proposta gira em torno de atribuir ao cabo um diagnóstico preciso, que não ao mesmo tempo, não seja de extrema complexidade de ser realizado.

#### ***5.4.2 Tabela de pontuação para o SAD – Opção 2***

A segunda alternativa para modelo de diagnóstico com SAD, seria uma versão que incorporasse outros dois parâmetros, sendo esses: a tensão de início e formato (largura) dos pulsos de DPs. Ambos parâmetros podem fornecer informações importantes para o diagnóstico, principalmente em relação a velocidade da evolução do defeito.

O principal problema da utilização destes dois parâmetros é o mesmo que ocorre com a taxa de repetição, que é a falta de valores absolutos de referência em relação ao parâmetros, seja o valor de tensão ou a largura do pulso. O que se conhece é o

comportamento ao longo do tempo para os parâmetros, o que limita a utilização destes em metodologia com medições periódicas, exclusivamente, para a tensão de início, métodos realizados de forma *off-line*.

Sabe-se que tensão de início possui uma tendência de aumentar de acordo com o aumento da degradação da isolamento do cabo, o que é contraditório ao pensamento comum. No caso do formato do pulso, sabe-se que o pulso tem uma tendência de estreitar sua largura e de aumentar seu valor de pico ao longo do tempo. Entretanto, até mesmo o incremento ou decremento desses parâmetros não possuem valores postulados nem estudos aprofundados sobre estas características. Desta forma, a inclusão destes parâmetros no sistema de pontuação será feita de forma conservadora, utilizando-os apenas como ferramentas auxiliares aos demais parâmetros.

Para a largura do pulso, podem ser utilizados diferentes pontos para a medição de sua largura. Em Wang et al. (2019), foram utilizados os tempos de subida, tempos de descida, as larguras para as amplitudes positivas e negativas no valor de 50% do valor de pico e o tempo de duração total do pulso. As medições realizadas revelaram que ao se aproximar da falha, o valor de pico dos pulsos sofre aumentos e as características verificadas da largura sofrem diminuições, ou seja, o pulso se torna mais íngreme ao longo do envelhecimento do cabo. A Tabela 5.9 apresenta os resultados encontrados pelos autores.

Tabela 5.9 – Valores dos parâmetros de um pulso de DPs ao se aproximar da falha.

Pontos de verificação	Valor na primeira medição (s)	Valor na última medição (s)	Diferença encontrada
Tempo de subida (+)	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$0,7 \cdot 10^{-5}$	86%
Tempo de subida (-)	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	74%
Tempo de descida (+)	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$	68%
Tempo de descida (-)	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	55%
Largura da amplitude (+)	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	57%
Largura da amplitude (-)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	70%
Tempo de duração total	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$3,65 \cdot 10^{-4}$	39%

*\*(+) representa o pico positiva do pulso e (-) representa o pico negativo do pulso*

Além desses valores para a largura do pulso, o valor de pico para cada medição também foi verificado, sendo que os resultados mostram que o pico dos pulsos subiu de

0,0044 V para 2,2250 V entre a primeira e última medição. Tais resultados permitem uma visão diferente da evolução dos defeitos em cabos isolados e análises semelhantes à realizada pelos autores pode ser integrada ao diagnóstico proposto.

Entretanto, a análise será dependente de medições periódicas e a verificação dessas características do pulso de DPs exige uma qualidade de medição e análise de dados avançada, o que pode ser motivação para a escolha de não utilizar essa metodologia de análise no diagnóstico.

De forma semelhante, o mesmo pode ser aplicado com a tensão de início ou PDIV, desde que o método de medição permita a aferição deste parâmetro. Como já mencionado, a PDIV possui uma tendência em aumentar de valor conforme o envelhecimento do cabo. Em Wang (2010), foram observados os valores de PDIV para espécimes de isolamento XLPE que chegam à falha em laboratório. Os resultados de tal estudo mostram que o aumento da PDIV ocorre principalmente durante as etapas em que há a diminuição da taxa de repetição. O experimento de envelhecimento acelerado das espécimes de teste era parado em determinados momentos para a aferição da PDIV, sendo que os valores iniciais encontrados para a tensão de início eram, em média, iguais a 2,1 kV, enquanto os valores de PDIV mais próximos da falha estavam na faixa de 5,8 kV. Tal aumento é significativo, uma vez que os testes e medições de DPs eram realizados com tensão de 10 kV (valor RMS).

Considerando que o método de medição deve ser um método *off-line* que permita a obtenção da PDIV e que a análise será dependente da avaliação dos dados obtidos em medições periódicas, a inclusão deste parâmetro no modelo de diagnóstico será realizada de forma mais conservadora, como um parâmetro auxiliar que possua uma pontuação menor, já que a evolução mais acentuada da PDIV também está relacionada com o declínio dos níveis de taxa de repetição, que já estão inclusos no modelo proposto.

Esta segunda versão do modelo de diagnóstico, com os parâmetros de largura de pulso e tensão de início inclusos, seguirá o mesmo princípio de pontuação apresentado no modelo anterior, porém, com os ajustes necessários para a utilização das novas inclusões ao modelo.

Figura 5.8 – Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias *off-line*

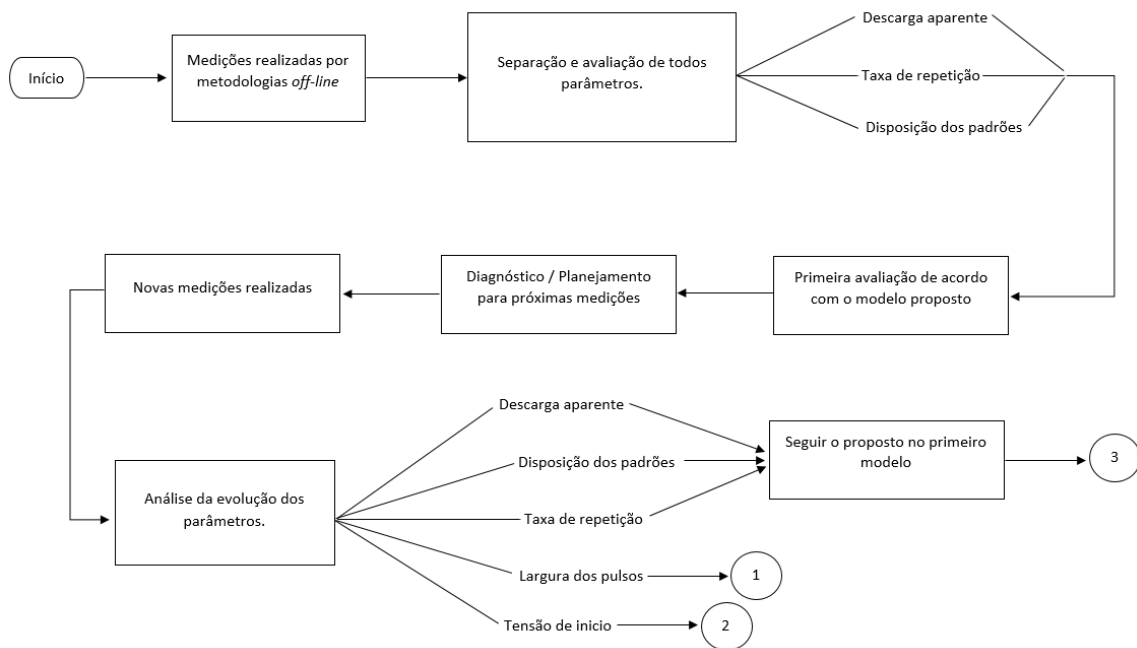
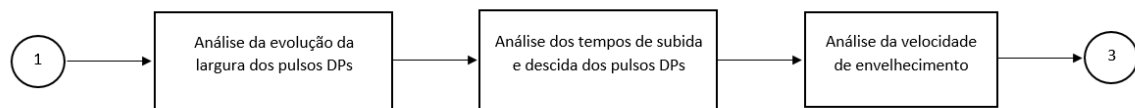


Figura 5.9 - Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias *off-line* – Parte 2



A melhor maneira de avaliar esta evolução das larguras dos pulsos é estabelecendo uma taxa de decaimento considerada crítica e que já apresentaria riscos potenciais para o cabo em estudo. Pela Tabela 5.9, pode-se inferir que um decaimento de mais de 70% no tempo de subida (positivo e negativo) e 50 % no tempo de descida (positivo e negativo) em relação aos valores iniciais são decaimentos críticos. Porém, nem sempre é possível obter tais valores enquanto o cabo ainda é novo e as medições ocorrem apenas com o cabo envelhecido. Sem a referência inicial, opta-se por avaliar o decaimento relativo entre uma medição e outra. Pela avaliação do estudo realizado por Wang *et al.* (2019), um decaimento entre 25% e 30% entre medições é um sinal claro de envelhecimento da isolamento do cabo.

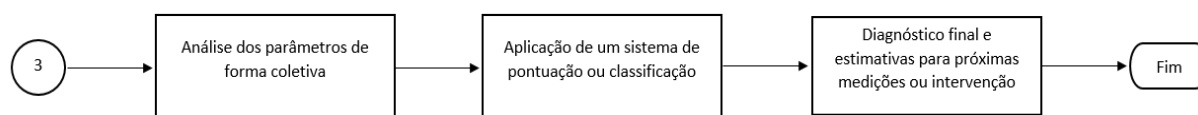


Figura 5.10 - Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias *off-line* – Parte 3



Para a avaliação da evolução da tensão de início, deve-se considerar que um aumento elevado no valor deste parâmetro tem uma grande chance de ocorrer de forma simultânea ao decaimento da taxa de repetição, evento que já é levado em consideração no modelo apresentado anteriormente. Porém, pode ocorrer casos onde a PDIV sofre aumentos e outros parâmetros se mantêm praticamente os mesmos, o que pode ser um sinal que o defeito está começando a evoluir e podem ser esperadas evoluções rápidas dos outros parâmetros.

Figura 5.11 - Esquema da estratégia adotada para diagnóstico por metodologias *off-line* – Parte 4



A etapa final desta versão do método de diagnóstico é idêntica à etapa final da versão anterior, porém com ajustes no sistema de pontuação para acomodar os novos parâmetros.

Tabela 5.10 – Parâmetros e as respectivas pontuações para determinadas situações – SAD 2

Parâmetro	Situação	Pontuação
Descarga aparente	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>normais</i>	1 ponto
	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>perigosos</i>	3 pontos
	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>críticos</i>	5 pontos
Taxa de repetição	Valores <i>baixos ou regulares</i> de taxa de repetição	1 ponto

	Valores <i>altos</i> de taxa de repetição	2 pontos
	Variações repentinas no valor de taxa de repetição	+2 pontos
Padrões PRPD	Presença de Padrões “Rabbit-like”	1 ponto
	Presença de Padrões “Turtle-like”	3 pontos
	Presença de Padrões “Wing-like”	+1 ponto
Formato / Largura dos pulsos de DPs	Decaimento de 20 a 30% entre medições ou valor de referência	1 ponto
	Decaimento maior de 30% entre medições ou valor de referência	2 pontos
Tensão de início	Aumento de 35 a 50% entre medições ou valor de referência	1 ponto
	Aumento maior de 50% entre medições ou valor de referência	2 pontos

Com a adição dos novos parâmetros, a Tabela 5.11 apresenta o resultado final do sistema de pontuação.

Tabela 5.11 – Faixas de pontuações para os níveis de degradação – SAD 2

Pontuação	Nível do defeito
$\leq 3$	Normal
$> 3 \text{ e } < 8$	Intermediário
$\geq 8 \text{ e } \leq 12$	Alto
$> 12$	Crítico

Desta forma, determina-se o período de tempo até a próxima medição por meio do resultado encontrado nas tabelas 5.7 e 5.11. Como mostrado na Tabela 4, a maioria dos modelos de diagnósticos encontrados na literatura atribuem períodos que variam de 6 a 12 meses entre medições. Para o sistema criado, devido à quantidade de parâmetros analisados, é possível posicionar o nível de defeito com uma precisão maior; portanto, será atribuído, como recomendação, os períodos da tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Estratégia de repetição de medições / intervenção para os níveis de DPs resultantes dos SADs

Nível de DPs	Ação
Normal	Próxima medição em torno de 18+ meses
Intermediário	Próxima medição em torno de 12 meses
Alto	Próxima medição em torno 3 a 6 meses
Crítico	Manutenção / Troca do condutor / Monitoramento contínuo recomendado

As propostas apresentadas são baseadas em diversos estudos que acumulam informações sobre a degradação e evolução dos defeitos do isolamento em cabos de média e alta tensão. O objetivo principal é agrupar diversos parâmetros em um único sistema, de forma que permita um resultado mais preciso do diagnóstico, mas evitando elevar a complexidade da metodologia a um nível muito elevado ou inserindo parâmetros que necessitariam de outros tipos de medições e ensaios para obtê-los. Entretanto, a segunda opção apresentada possui um custo mais elevado em relação a primeira opção, principalmente pela necessidade da obtenção do parâmetro da PDIV.

Ao se considerar que seria possível atribuir outros parâmetros que auxiliariam no diagnóstico, de forma a supor que não existem limitações econômicas para a obtenção do máximo de dados possíveis para o diagnóstico de cabos isolados, pode-se criar um sistema conceitual similar aos modelos apresentados, porém com sistema de pontuação dinâmico, que sofre ajustes de acordo com a adição de novos dados no modelo.

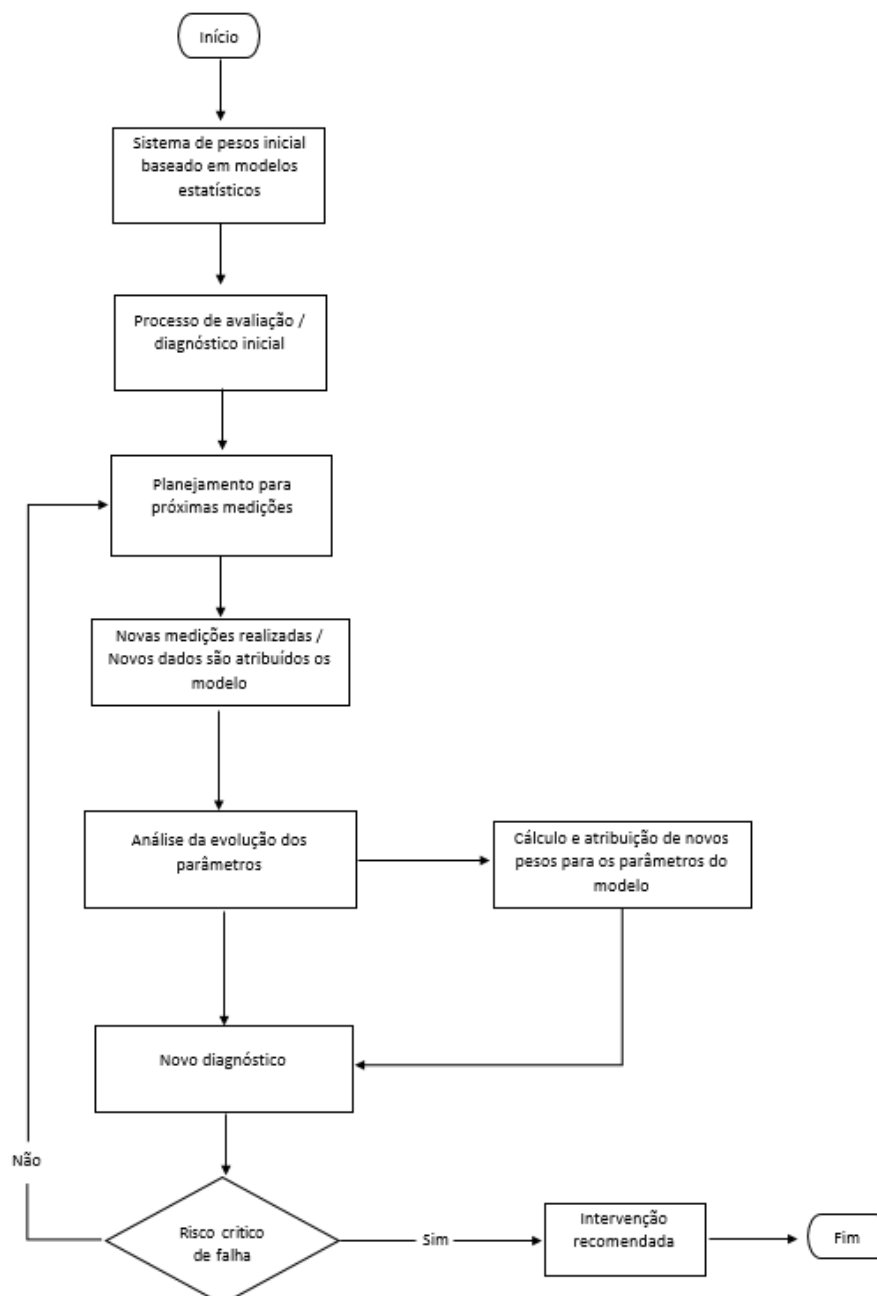
Este sistema começaria pela inclusão de modelos estatísticos de diversos sistemas de cabos, de forma que o sistema de diagnóstico contaria com valores de referência para os diversos parâmetros. Com estes dados seriam estabelecidos diferentes pesos a cada parâmetro que pertence ao modelo, seja os parâmetros de DPs utilizados nos modelos anteriores, como a descarga aparente, taxa de repetição, padrões *PRPD*, largura do pulso e tensão de início ou também parâmetros obtidos de outras metodologias, como a Tangente de Delta.

A tendência é que sejam obtidos diversos sistemas, com pesos diferentes para grupos de cabos diferentes, variando em níveis de tensão, tipo de isolamento, o tipo de variação de carga que o cabo é submetido durante sua operação, além de outros fatores como umidade, temperatura e o tipo de instalação que o cabo está inserido. Com isto seria possível atribuir pesos adequados para um novo sistema de cabos a ser testado, e,

conforme novas medições fossem realizadas, os novos resultados seriam inseridos no sistema. Desta forma, a cada medição uma nova avaliação de evolução dos parâmetros seria realizada e, caso fosse necessário, o sistema atualizaria os valores dos pesos atribuídos a cada parâmetro.

A ideia inicial para este modelo inclui a combinação de algoritmos de aprendizado de máquinas para o cálculo e atribuição dos pesos e um algoritmo baseado em sistema de Árvores de Decisões, para uma análise completa da evolução dos parâmetros entre medições.

Figura 5.12 – Estrutura a ser adotada para o modelo com atribuição de pesos dinâmica



## 5.5 Considerações Finais sobre o modelo SAD

Um Sistema de Apoio à Decisão, mais comumente empregado no setor empresarial, envolve quatro tipos básicos de atividade de modelagem analítica (Turban *et al.*, 2007):

- Análise do tipo *what-if*;
- Análise de sensibilidade;
- Análise de busca de metas;
- Análise de otimização.

Entre estes, o modelo que mais se enquadra com os modelos SAD propostos neste trabalho é o modelo de Análise de otimização, já que a proposta é encontrar o diagnóstico de cabos isolados mais preciso, dadas certas restrições, que neste caso são os parâmetros analisados em cada proposta.

A inserção de um modelo matemático baseado em um sistema de pontuação atribuídos aos diversos parâmetros de DPs permite transformar uma grande quantidade de dados em informações diretas de qualidade para a tomada de decisões, promovendo uma melhoria no diagnóstico do isolamento de cabos.

Embora a validação e otimização do modelo SAD proposto ainda deve ser realizada, percebe-se que a estrutura em si concede espaço para melhorias futuras sem alterar o princípio base do modelo, como por exemplo, é possível alterar os pesos de cada parâmetro e utilizar um sistema de pontuação onde o valor final atribuído ao cabo em análise seria pelo produto das pontuações individuais e não pela soma demonstrada nas Tabelas 5.7 e 5.11.

Enfim, os modelos de diagnóstico com SAD busca entregar o melhor resultado sobre a condição do isolamento de cabos via a análise de descargas parciais, porém a tomada de decisão propriamente dita estará a cargo do usuário, que deve processar as informações mediante uma análise lógica e objetiva, e então avaliar os fatores custo benefício da aplicação do modelo.

### 5.5.1 Alternativas para a tabela de pontuação do sistema SAD

Como mencionado, é possível utilizar o mesmo sistema de pontuação proposto para o SAD mas ao invés de obter a soma das pontuações individuais dos parâmetros pode-se obter o produto das pontuações individuais. Esta mudança é melhor aplicada em conjunto com a alteração dos valores de pontuação individuais, pois os valores unitários (1 ponto) não apresentariam mudanças para o produto obtido.

Com isso, uma reformulação dos valores de pontuação da Tabela 5.10 pode ser realizada, alterando consequentemente a Tabela 5.11, como demonstrado nas Tabelas 5.13 e 5.14 respectivamente.

Tabela 5.13 – Parâmetros e respectivas pontuações ajustadas para modelo com cálculo do produto.

Parâmetro	Situação	Pontuação
Descarga aparente	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>normais</i>	2 pontos
	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>perigosos</i>	5 pontos
	Valor em pC de acordo com tabelas de referência – Valores considerados <i>críticos</i>	10 pontos
Taxa de repetição	Valores <i>baixos ou regulares</i> de taxa de repetição	2 pontos
	Valores <i>altos</i> de taxa de repetição	3 pontos
	Variações repentinas no valor de taxa de repetição*	+3 pontos
Padrões PRPD	Presença de Padrões “Rabbit-like”	2 pontos
	Presença de Padrões “Turtle-like”	3 pontos
	Presença de Padrões “Wing-like”*	+2 pontos
Formato / Largura dos pulsos de DPs	Decaimento de 20 a 30% entre medições ou valor de referência	2 pontos
	Decaimento maior de 30% entre medições ou valor de referência	5 pontos
Tensão de início	Aumento de 35 a 50% entre medições ou valor de referência	2 pontos
	Aumento maior de 50% entre medições ou valor de referência	5 pontos

*\*Essas pontuações serão somadas a pontuação individual primeiramente e o resultado será então aplicado ao cálculo do produto.*

Tabela 5.14 – Faixas de pontuações para os níveis de degradação baseadas no modelo com cálculo do produto

<b>Pontuação</b>	<b>Nível do defeito</b>
$\leq 10$	Normal
$> 10$ e $< 100$	Intermediário
$\geq 100$ e $\leq 1200$	Alto
$> 1200$	Crítico

A principal diferença desta aplicação do sistema são os novos valores das faixas de pontuação que definem o nível do defeito, as quais agora possuem limites mais amplos. Esta mudança não implica nenhuma alteração no funcionamento do modelo SAD, porém os limites maiores entre as faixas da tabela 5.14 pode ser um facilitador caso novos parâmetros e/ou situações sejam incluídas na tabela 5.13 com a descoberta de novas informações e detalhes sobre o comportamento dos parâmetros e o fenômeno da falha em cabos isolados.

Juntamente com o modelo de diagnóstico proposto é apresentado pela tabela 5.15 o compilado de sugestões e considerações, que foram mencionadas ao longo do trabalho, relacionadas ao planejamento estratégico de diagnósticos em cabos isolados.

Tabela 5.15 – Tabela de Decisões para o diagnóstico de cabos isolados

<b>Decisão</b>	<b>Sugestões/Considerações</b>	<b>Apoios possíveis</b>
Escolha dos Métodos de medição e detecção e Metodologias de ensaio ( <i>Off-line</i> ou <i>Online</i> )	Diversos fatores devem ser levados em consideração na escolha do método de medição, como o tipo de sistema, tipo de instalação e a disponibilidade de interrupções programadas, além dos fatores financeiros.	Dados conhecidos de sistemas semelhantes (nível de tensão e tipo de material isolante) podem influenciar a escolha.
Escolha dos métodos de diagnóstico	O nível da qualidade dos dados coletados deve ser levado em consideração para a escolha do método de diagnóstico;	Faixas de valores de referências para o parâmetro de descarga aparente;

	<p>Idealmente escolhe-se o método de diagnóstico mais completo, que utilize a maior quantidade de informação absorvida dos dados obtidos na medição e que permita uma análise mais precisa sobre a espécime em estudo.</p>	<p>Sistemas de classificação; Modelos estatísticos; Modelos que utilizam de sistemas inteligentes como o SAD ou Árvores de decisões.</p>
<p>Análise dos sinais de DPs e seus parâmetros</p>	<p>O monitoramento da evolução dos parâmetros ao longo do tempo fornecem informações preciosas para o diagnóstico, porém obter uma quantidade elevada de dados pode ser desafiador; A análise dos sinais de DPs requer um processo de filtragem para grande maioria dos métodos de medição.</p>	<p>Algoritmos de aprendizagem de máquina são comumente utilizados na análise e filtragem dos sinais de DPs.</p>
<p>Decisão dos períodos entre as medições periódicas</p>	<p>O diagnóstico deve apurar o nível de degradação do isolamento do cabo e com isso deve ser estabelecida uma expectativa para a realização de novas medições; Para casos onde o diagnóstico revelar uma condição crítica do isolamento é recomendado o monitoramento contínuo ou a troca do condutor.</p>	<p>Faixas recomendadas para repetição da medição, como a Tabela 5.12; Sistemas estatísticos que possibilitam o cálculo de expectativa do tempo de vida.</p>



## Capítulo 6:

# Conclusões e Propostas de Continuidade

O presente trabalho, após uma extensa revisão bibliográfica, apresenta uma compilação sobre os principais aspectos do diagnóstico de cabos isolados de média e alta tensão, entre estes estão: os métodos de detecção e medição das descargas, particularidades do processamento e filtragem do sinal, os parâmetros que podem ser extraídos da análise das descargas e seus correspondentes comportamentos ao longo do tempo e as metodologias de diagnóstico de cabos isolados por meio da análise de descargas parciais. Com as informações apresentadas sobre o comportamento de cada parâmetro ao longo do envelhecimento do cabo e a comparação da evolução do defeito com o crescimento das arborescências elétricas foi possível estipular diferentes etapas de envelhecimento do isolamento com comportamento característicos cada.

Desta forma, foi proposto um modelo de diagnóstico baseado em um Sistema de Apoio à Tomada de Decisão (SAD), que engloba os parâmetros de descarga aparente, taxa de repetição, padrões *PRPD* ou padrões  $\phi$ - $q$ - $n$ , tensão de início e formato do pulso. O modelo SAD proposto é baseado em um sistema de pontuação, no qual os parâmetros possuem diferentes pesos atribuídos, de acordo com a influência de cada um no sistema. Outra aplicação foi a atribuição da Tabela de Decisões como ferramenta auxiliar do sistema, de forma a agrupar as ações recomendadas para diferentes situações que podem ser encontradas na utilização do sistema SAD proposto.

Vale destacar que existem ocasiões especiais nas quais uma mudança anormal de comportamento dos parâmetros pode indicar a proximidade da falha, como no caso do fenômeno SPMDs, por este motivo, o monitoramento do comportamento dos parâmetros periodicamente é de extrema importância para a eficácia do diagnóstico. Por outro lado, a avaliação ao longo do tempo de alguns parâmetros (formato do pulso e tensão de início) é um tópico carente de informações e ainda necessita de uma investigação mais profunda, de forma a confirmar a eficácia destes componentes no modelo SAD. Outro ponto importante é a capacidade da incorporação de modelos estatísticos ao diagnóstico, a análise combinada com modelos estatísticos baseados na Análise de Sobrevivência

permite uma visão ampliada em relação a expectativa do tempo de vida restante do isolamento.

Posto isso, a metodologia de diagnóstico com o modelo SAD é proposta como uma alternativa as metodologias “convencionais” encontradas na literatura, com intuito de fornecer um resultado mais preciso sobre o estado do isolamento em cabos isolados. Porém, o modelo há ainda de ser testado com dados reais para sua validação e regulagem dos pesos caso seja necessário. Portanto, para continuidade dos trabalhos referentes ao diagnóstico de cabos isolados via análise de descargas parciais é sugerido:

- Aplicação do modelo SAD proposto, para teste e validação dos pesos utilizados para cada parâmetro;
- Estudo aprofundado sobre o comportamento da tensão de início e formato do pulso;
- Estudo da correlação entre as etapas de evolução das arborescências elétricas com a mudança do formato do pulso.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, M.H.; BASHIR, N.; AHMAD, H.; JAMIL, A.A.; SULEIMAN, A.A. (2014). An Overview of Electrical Tree Growth in Solid Insulating Material with Emphasis of Influencing Factors, Mathematical Models and Tree Suppression. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 12, 5827-5846. Doi: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v12.i8.pp5827-5846>

ANDRADE, M. A. et al., "Partial discharge detection and localization along medium voltage cables," 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), Fort Worth, TX, USA, 2017, pp. 389-392, doi: 10.1109/CEIDP.2017.8257616.

ARIEF, Y. Z. "Partial discharges characteristics in polymeric insulating material. Experimental investigation on XLPE Power Cable and XLPE/EPR interfacial phenomena". VDM Verlag. September 2011.

ARIEF, Y. Z. et al., "Effects of nanosilica and nanotitania on partial discharge characteristics of natural rubber-ldpe blends as high voltage insulation material," Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Niigata, Japan, 2014, pp. 299-302, doi: 10.1109/ISEIM.2014.6870778.

ARNOLD, P.; KMENT, A.; PÍPA, M.; JANICEK, F. 'Onsite partial discharges measurement of XLPE cables', IEEE Transaction on Electrical Engineering, Vol 1 (2012), No. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7294**. "Fios e cabos elétricos – Ensaios de descargas parciais". ABNT. 2010.

BARTNIKAS, R. "Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement". *IEEE TDEI*, v. 9, n. 5, p. 763-808, Oct. 2002. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663>

BELTLE, M.; MULLER, A.; TENBOHLEN, S. "Statistical analysis of online ultrahigh-frequency partial-discharge measurement of power transformers," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, no. 6, pp. 17-22, Nov.-Dec. 2012, doi: 10.1109/MEI.2012.6340520.

BI, X.; REN, A.; LI, S.; HAN, M.; LI, Q. An Advanced Partial Discharge Recognition Strategy of Power Cable. 2015. Journal of Electrical and Computer Engineering. Doi: 10.1155/2015/174538

BOLARIN, O.; PETRI, H.; MARTTI, A.; NING, G. "Dielectric response measurements as diagnostic tool of power cable system. Literature review", Helsinki University of Technology, High Voltage Institute, Report TKK-SJT-47, Espoo, Finland March, 24p, 2001.

CHEN, Z.; CHENG, W.; REN, X.; CUI, T. "Analysis of Genetic-Particle Swarm Optimization Algorithm for PD Localization using Phased Arrays," 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China, 2019, pp. 748-751, doi: 10.1109/IMCEC46724.2019.8984072.

CHENG, Y.; ZHAO, L.; WU, X.; NI, H.; DING, P.; LI, X.; ZHOU, X. Statistical Analysis of Partial Discharge Faults of HV Cables. 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). doi.org/10.1109/EIC47619.2020.9158684

CICHECKI, P.; JONGEN, R. A.; GULSKI, E.; SMIT, J. J.; QUAK, B.; PETZOLD, F.; DE VRIES, F. "Statistical approach in power cables diagnostic data analysis," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 6, pp. 1559-1569, December 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4712658.

CICHECKI, P.; STEWAYAN, J.; GULSKI, E.; SMIT, J. J.; CHMURA, L. "Investigation of PD occurrence and detectability in high voltage power cable accessories," 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, LA, USA, 2010, pp. 264-267, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640813.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE GOIÁS. **NTC-34 CELG**. 2005. Norma Técnica CELG. "Cabos de Potência com Isolamento em XLPE para Tensões de 1 a 35 kV – Especificação NTC-34". 2005.

CUENCA, W. M. H. "Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais". Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

DANIKAS, M. G. "Small partial discharges and their role in insulation deterioration," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 6, pp. 863-867, Dec. 1997, doi: 10.1109/94.654733.

DANIKAS, M.G.; ADAMIDIS, G. "Partial discharges in epoxy resin voids and the interpretational possibilities and limitations of Pedersen's model". *Electrical Engineering* **80**, 105–110 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF01245959>

DIAS, E. J.; COSTA, P. R. "Diagnóstico dos Cabos Subterrâneos de Energia em Belo Horizonte Através do Método de Descargas Parciais: Uma Viabilidade para Manutenção Preventiva/Preditiva", XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

DODD, L.; GIUSSANI, R.; MCPHEE, A.; BURGESS, A. "On-line partial discharge condition monitoring of complete networks for the pulp and paper industry: Challenges and solutions explained through case studies," 2017 Annual Pulp, Paper And Forest Industries Technical Conference (PPFIC), Tacoma, WA, USA, 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/PPIC.2017.8003877.

DONG, M.; NASSIF, A. B. "Combining Modified Weibull Distribution Models for Power System Reliability Forecast," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 2, pp. 1610-1619, March 2019. doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2877743

EDIN, H. "Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage". 2001. Thesis (Ph.D.) – Electrical Engineering. Kungl Tekniska Hogskolan, Stockholm, 2001.

EHARA, Y.; KISHIDA, H.; ITO, T. "Prediction of tree initiation by phase angle analysis of discharge magnitude and discharge luminescence on partial discharge," 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.00CH37132), Victoria, BC, Canada, 2000, pp. 321-324 vol.1, doi: 10.1109/CEIDP.2000.885291.

EL-FARASKOURY, A.; MOKHTAR, M.; MEHANNA, M.; GOUDA, O.E. "Conventional and Un-Conventional Methods in High Voltage XLPE Cables Accessories". 2012. Advances in Electrical Engineering Systems (AEES). Vol. 1, No. 4, 2012, ISSN 2167-633X.

FENG, B.; HOU, S.; ZHANG, L.; ZHU, W.; YU, Y.; DANG, X. "Study on the Developing Regularity of Partial Discharge at the Interface Defects of Cable Accessories under Thermal Cycling," 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Chongqing, China, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEMPE51623.2021.9509250.

FUHR, J.; ASCHWANDEN, T. "Identification and localization of PDsources in power-transformers and power-generators". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 1, pp. 17-30, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005951>

GJAERDE, A. C. "Multifactor Aging Models – Origin and Similarities." IEEE EIM, V. 13, n.1, p.6-13, Jan./Feb. 1997. <https://doi.org/10.1109/57.567392>

GOUDA, O. e EL-FARASKOURY, A. "Partial Discharge Testing of XLPE Underground Cables Insulation". 2011. LAP LAMBET Academic Publishing GmbH & Co. KG. Doi: 10.13140/2.1.2244.9448

GROSS, D. W.; HERBIG, J. G. "Partial discharge fault location and diagnosis on HV power cables," 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.00CH37132), Victoria, BC, Canada, 2000, pp. 630-633 vol.2.

GROSSI, A.; LANA, G.; LIMA, D.; OKUMTOTO, P. "Diagnóstico em Cabos de Média Tensão Utilizando o Método de Descargas Parciais," *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, MG, Set. 2014, pp. 2862-2866.

GULSKI, E. "Digital analysis of partial discharges". IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation", V. 2, n. 5, p. 822-837, 1995. <https://doi.org/10.1109/94.469977>

GULSKI, E.; CICHECKI, P.; WESTER, F.; SMIT, J. J.; BODEGA, R.; HERMANS, T. J. W. H.; SEITZ, P. P.; QUAK, B.; DE VRIES, F. *On-site Testing and PD Diagnosis of High Voltage Power Cables*, Electrical Insulation 2008, ISEI, 2008a. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570415>

GULSKI, E.; KRIVDA, A. "Neural networks as a tool for recognition of partial discharges". *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, pp. 984-1001, 1993. <https://doi.org/10.1109/14.249372>

GULSKI, E.; SEITZ, P. P. BODEGA, R.; HERMANS, T. "On-site Testing and PD Diagnosis of HV Power Cables," Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, 2008b, pp. 650-653. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570415>

GUTNIK, Y. "Estudo dos Piezoeletros na Detecção de Descargas Parciais em Transformadores". 2014. Dissertação de mestrado, USP, São Carlos.

HAO, L.; LEWIN, P. "Comparison of support vector machine based partial discharge identification parameters," in *IEEE Int. Symp. Electr. Insul. (ISEI)*, 2006, pp. 110-113.

HARTLEIN, R. et al. (2010), "Diagnostic Testing of Underground Cable Systems (Cable Diagnostic Focused Initiative)," NEETRAC, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology. Georgia. USA.

HEREDIA, L. C. C.; MOR, A. R. Density-based clustering methods for unsupervised separation of partial discharge sources. 2019. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 224-230, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.015.

IDDRISSU, I.; LV, Z.-P.; ROWLAND, S. M. "The dynamic character of partial discharge in epoxy resin at different stages of treeing," 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Montpellier, France, 2016, pp. 728-731, doi: 10.1109/ICD.2016.7547719.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE P1434 - 2014**. "Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 400.2-2013**. "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)," in *IEEE Std 400.2-2013* , vol., no., pp.1-60, 9 June 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6517854.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60270: 2000**. "High-voltage test techniques – Partial discharge measurements". 2000.

JINSHU, L.; YIJIANG, W.; GANJUN, W.; XIAOASHENG, P.; TAIWEI, L.; YUHANG, J. Gradient Boosting Decision Tree and Random Forest Based Partial Discharge Pattern Recognition of HV Cable. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592402>

KERANEN, J.; HAMALAINEN, A.; VEPSALAINEN, J. "Feasibility Experiences of On-line Partial Discharge Monitoring of Medium Voltage Cables in Helen Electricity Network Ltd". *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, Kärđla, Estonia, 2019, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/PQ.2019.8818233>

KIM, C. -S.; KONDO, T.; MIZUTANI, T. "Change in PD pattern with aging," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, no. 1, pp. 13-18, Feb. 2004, doi: 10.1109/TDEI.2004.1266311.

KNENICKY, M.; PROCHAZKA, R.; HLAVACEK, J. "Partial Discharge Patterns during Accelerated Aging of Medium Voltage Cable System," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8641847.

KOLTUNOWICZ, W.; BADICU, L.; BRONIECKI, U.; BELKOV, A. "Increased operation reliability of HV apparatus through PD monitoring". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1347-1354, June 2016. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005579>

KREUGER, F. H. "Partial discharge detection in high-voltage equipment". London: Butterworths, 1989.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W.; KUFFEL, J. "High voltage engineering: fundamentals". London: Butterworths-Heinemann, 2000.

LANZ, B.T.; BYRNE D.; SPALDING M. "Affordable Cable System Reliability and Life Extension Strategy". *2016 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, Westminster, CO, pp. 50-56. <https://doi.org/10.1109/REPC.2016.16>

LEMKE, E.; SCHMIEGEL, P.; ELZE, H.; RUSSWURM, D. "Procedure for evaluation of dielectric properties based on complex discharge analyzing (CDA)," Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, QC, Canada, 1996, pp. 385-388 vol.1, doi: 10.1109/ELINSL.1996.549362.

LIMA, F. N. "Uma Contribuição à Estimativa de Indicadores de Desempenho do Estado Operacional de Cabos Isolados Sob a Ação das Arborescências". 2008. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14256>.

LIN, T. et al., "An ACRF Technique for PD Detection of XLPE Cables Based on Equivalent Pulse Width Modulation and Time Domain Reflectometry Denoising," 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China, 2020, pp. 337-341, doi: 10.1109/AEEES48850.2020.9121522.

LIN, Y. -H. "Using K-Means Clustering and Parameter Weighting for Partial-Discharge Noise Suppression," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp. 2380-2390, Oct. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2162858.

LV, Z.-P.; ROWLAND, S. M.; CHEN, S.; ZHENG, H.; IDDRISU, I. "Evolution of partial discharges during early tree propagation in epoxy resin," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 5, pp. 2995-3003, Oct. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006731.

MA, H.; CHAN, J. C.; SAHA, T. K.; EKANAYAKE, C. "Pattern recognition techniques and their applications for automatic classification of artificial partial discharges sources," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, pp. 468-478, 2013. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6508749>

MASON, H. M. Enhancing the Significance of PD Measurements. *IEEE TDEI*, v. 2, n. 5, p.876-888, Oct. 1995. <https://doi.org/10.1109/94.469982>

MOHAMED, F. P.; SIEW, W. H.; SHENG, B.; STEWART, B. G.; MORRIS, E. A. "Pre-determination of partial discharge inception voltage in power cables using electrode gaps in air under AC voltage," 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC), Brighton, UK, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PPC.2017.8291314.

MONTANARI, G. C. "Partial discharge detection in medium voltage and high voltage cables: maximum distance for detection, length of cable, and some answers," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 32, no. 5, pp. 41-46, September-October 2016, doi: 10.1109/MEI.2016.7552375.

MOR, A. R.; MUNÓZ, F. A.; WU, J.; HEREDIA, L. C. C. "Automatic partial discharge recognition using the cross wavelet transform in high voltage cable joint measuring systems using two opposite polarity sensors," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105695. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105695>

NEIEIR, T.; KNAUEL, J.; BAWART, M. J.; KIM, S. -. "A Statistical Approach for Condition Evaluation and Residual Lifetime Estimation of MV Power Cables," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 791-795. <https://doi.org/10.1109/GTDAsia.2019.8715922>

NGUYEN, H. V. P.; PHUNG, B. T.; BLACKBURN, T. "Effects of aging on partial discharge patterns in voids under very low frequency excitation," 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Montpellier, France, 2016, pp. 524-527, doi: 10.1109/ICD.2016.7547657.

PETZOLD, F.; BEIGERT, M. "Experiences of PD Diagnosis on MV Cables using Oscillating Voltages (OWTS)," 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005, pp. 1-7, doi: 10.1109/TDC.2005.1547150.

POLYAKOV, D. A.; KOMAROV, I. V.; SARSEMBAYEV, A. B.; NIKITIN, K. I.; POLYAKOVA, U. V. "Research of partial discharge characteristics in XLPE-insulated cables with single and multiple defects," 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9387998.

POLYAKOV, D. A.; KOMAROV, I. V.; TERESCHENKO, N. A.; NIKITIN, K. I.; POLYAKOVA, U. V. "Research of Partial Discharges Intensity Voltage Dependence in XLPE-Insulated Cables," 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/REEPE49198.2020.9059155.



REFAAT, S. S.; SHAMS, M. A. "A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables," 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018), Doha, Qatar, 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/CPE.2018.8372608>

RENFORTH, L.; GIUSSANI, R.; MENDIOLA, M. T.; DODD, L. "On-line partial discharge insulation condition monitoring of complete high voltage (HV) networks," 2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), Calgary, AB, Canada, 2017, pp. 103-112, doi: 10.1109/PCICON.2017.8188729.

RENFORTH, L.; MACKINLAY, R. "An Introduction to On-Line Partial Discharge (PD) Testing & PD Site Location (Mapping) Of Medium Voltage (MV) Cables," IPEC High Voltage Ltd. <<http://www.ipechv.co.uk>>, 17th October 2006, Appendix 1.

RON-PING D. et al., "Application of Genetic Algorithm in PD Source Location in Transformer Oil," 2020 5th International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), Zhangjiajie, China, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSGEA51094.2020.00129.

SHU, E. W.; BOGGS, S. A. "Effect of Dispersion on PD Pulse Propagation in Shielded Power Cable," 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Quebec, QC, Canada, 2008, pp. 427-430, doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772878.

SI, W.; LI, J.; YUAN, P.; LI, Y. "Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, pp. 1663-1674, 2008. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4712671>

SIMMONS, K. L.; PARDINI, A. F.; FIFIELD, L. S.; TEDESCHI, J. R. WESTMAN, M. P.; JONES, A. M.; RAMMUHALLI, P. "Determining remaining useful life of aging cables in nuclear power plants – Interim Study FY13", Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, September 2013. <https://doi.org/10.2172/1095453>

SUWANASRI, S.; KHETCHAROEN, W.; SUWANASRI, T.; PANMALA, N.; RUNGSIVATTAGAPONG, S.; ATIWET, N.; POONPOCH, P. "Partial Discharge Investigation and Failure Analysis on Distribution Network Using Acoustic Camera," 2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, Thailand, 2021, pp. 181-184, doi: 10.1109/iEECON51072.2021.9440301.

TAKAHASHI, T.; TAKAHASHI, T.; OKAMOTO, T. "Study on insulation diagnosis for XLPE cables using dumping oscillating high voltage," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008, pp. 1254-1257. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2008.4772926>

TANG, Z. et al., "Analysis of Significant Factors on Cable Failure Using the Cox Proportional Hazard Model," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 951-957, April 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2287025>

TOKUNAGA, S.; TSURASAKI, T.; ARIEF, Y. Z.; OHTSUKA, S.; MIZUNO, T.; HIKITA, M. "Partial discharge characteristics till breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect," Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417), Nagoya, Japan, 2003, pp. 1206-1209 vol.3, doi: 10.1109/ICPADM.2003.1218641.

TURBAN, E.; RAINER, R. K. Jr.; POTTER, R. E. "Introdução a Sistemas de Informação. Uma Abordagem Gerencial", Editora Elsevier, Janeiro 2007.

VAN DER MAATEN, L.; HINTON, G. "Visualizing data using t-SNE". *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 9, pp. 2579–2605, 2008.

VAN SCHAIK, N.; KRUIHOF, M. G.; STEENNIS, E. F. "Estimation of risk of operation (remaining life) of underground MV power cable systems," CIRED 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Turin, Italy, 2005, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1049/cp:20050888>

WANG, K.; XIANG, E.; XING, L.; ZHAO, X.; LIU, H.; HUANG, J. "Study on Partial Discharge Characteristics of Scratched EPR Cables Based on Pulse Sequence Analysis," 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, 2019, pp. 371-376, doi: 10.1109/ICPRE48497.2019.9034842.

WANG, L.; CAVALLINI, A.; MONTANARI, G. C.; TESTA, L.; SPA, T. "Patterns of partial discharge activity in XLPE: From inception to breakdown," 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSD.2010.5568121.

WANG, Y. -B. et al., "Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-swarm-optimization-route-searching algorithm," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3647-3656, Dec. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006857.

WENZEL, D.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. "A new approach for partial discharge recognition on transformers on-site by means of genetic algorithms," Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, QC, Canada, 1996, pp. 57-60 vol.1, doi: 10.1109/ELINSL.1996.549282.

WESTER, F.J. "Condition Assessment of Power Cables Using PD Diagnosis at Damped AC Voltages". 2004. ISBN 90-8559-019-1, Ph.D. thesis TU Delft.

WU, M.; CAO, H.; CAO, J.; NGUYEN, H.; GOMES, J. B.; KRISHNASWAMY, S. P. "An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 22-35, November-December 2015. <https://doi.org/10.1109/MEI.2015.7303259>

XIANG, E.; WANG, K.; CAO, W.; NIE, D.; XING, L.; WANG, D.; HUANG, J. "Application of PRPD Spectrum Characteristic in the Recognition of the Aging State of EPDM Cable Insulation," 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, 2019, pp. 335-341, doi: 10.1109/ICPRE48497.2019.9034738.

YANG, F.; FENG, X.; RUAN, L.; CHEN J. "Research on the diagnosis of MV power cable insulation based on PD and VLF-Tan $\delta$ ," 2014 2nd International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 123-127.

YUSOFF, N. A.; ISA, M.; HAMID, H.; ADZMAN, M. R.; ROHANI, M. N. K. H.; CHAI, C. Y.; AYOP, N. N. "Denoising technique for partial discharge signal :A comparison performance between artificial neural network, fast fourier transform and discrete wavelet transform," 2016 *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Melaka, 2016, pp. 311-316. <https://doi.org/10.1109/PECON.2016.7951579>

ZAENI, A.; KHAYAM, U.; VIVIANTORO, D. "Methods for Remaining Life Prediction of Power Cable based on Partial Discharge and Cable Failure History Data," 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, 2019a, pp. 662-665. <https://doi.org/10.1109/ICEEI47359.2019.8988904>

ZAENI, A.; KHAYAM, U.; VIVIANTORO, D. "Methods for Remaining Life Prediction of Power Cable based on Partial Discharge with Regard to Loading Factor Calculation and Voltage Variation," 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Denpasar, Indonesia, 2019b, pp. 180-185, doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011113.

ZHANG, T. -T.; ZHOU, G. -P.; WANG, S. -J. "Application of Distributed Partial Discharge Detection Technique Synchronized with AC Withstand Voltage Test of High Voltage Cable," 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/EI2.2018.8582116.

ZHOU, Z. -C.; ZHANG, Y.; LI, H. "Fault reason analysis of 10kV cable lines of city power grid with OWTS state detection," 2012 China International Conference on Electricity Distribution, Shanghai, China, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/CICED.2012.6508413.

ZHU, C.; ZHAO, W.; LU, W.; GAO, Y. LI, F.; TANG, M. "Partial Discharge Detection, Location and Continuous Monitoring in Power Cable by Using Eulerian Video Magnification," 2020 *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Beijing, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279445.

ZHU, M. -X.; WANG, Y. -B.; LI, Y.; MU, H. -B.; DENG, J. -B.; SHAO, X. -J.; ZAHNG, G. -J. "Detection and localization of partial discharge in Air-Insulated Substations using UHF antenna array," 2016 3rd Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Yogyakarta, Indonesia, 2016, pp. 221-224, doi: 10.1109/ICPERE.2016.7904875.

ZHU, Y.; ZHOU, L.; XU, H. Application of improved genetic algorithm in ultrasonic location of transformer partial discharge. *Neural Comput & Applic* **32**, 1755–1764 (2019). Doi: 10.1007/s00521-019-04461-w