



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS



JEZRAEL PAIVA LIRA

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO
LABORATÓRIO DE ISOLAMENTOS ELÉTRICOS**

Campina Grande - PB
Julho de 2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS



JEZRAEL PAIVA LIRA

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO
LABORATÓRIO DE ISOLAMENTOS ELÉTRICOS**

Relatório de Estágio apresentado ao curso de Graduação da Universidade Federal de Campina Grande, como parte das exigências para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Prof. Edson Guedes da Costa
Orientador**

Campina Grande - PB
Julho de 2010

DEDICATÓRIA

Dedico este relatório, aos meus pais: Maria José Paiva Lira e Vicente Silvino de Lira, pelos contínuos incentivos e grandes contribuições, nos mais diferentes aspectos da vida.

E em memória do meu avô Silvino Joaquim de Lira e minha avó Leopoldina Neves de Lira pelo grande exemplo de pessoas honestas, dignas e responsáveis durante toda sua vida.

AGRADECIMENTOS

No decorrer do processo de elaboração deste trabalho, recebi muitos auxílios de formas diretas ou indiretas, colaborando com as pesquisas, conclusões e elaboração de textos. A todos, quero expressar meus sinceros agradecimentos.

Quero, no entanto, agradecer de forma especial, citando-os nesse trabalho, à:

Deus, por me ter dado coragem e determinação para concluir o curso.

Todos da minha família, que sempre incondicionalmente me apoiaram e me deram respaldos, incentivos emocionais, financeiros e culturais a todos os projetos propostos por minha pessoa. Em especial, minha avó Maria da Luz Paiva Lira, minha tia Marta de Souza Paiva e minha bisavó Almerinda de Souza Paiva.

A todas as pessoas que fazem parte do GSE (Grupo de Sistemas Elétricos), sejam elas professores, técnicos, alunos de graduação e pós-graduação. Em especial Prof. Edson Guedes da Costa, pela confiança dada à minha pessoa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE ABREVIACÕES.....	vii
1. Introdução	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
2. Descargas Parciais	3
2.1 Tipos de Descargas Parciais.....	3
2.2 Fatores que Influenciam na Formação das Descargas Parciais.....	5
2.3 Diagnostico da Origem das Descargas.....	6
3. Interferências no Processo de Medição da DP.....	13
4. Equipamentos Utilizados na Medição de DP.....	14
4.1 Circuito de Medição.....	14
4.2 Metodologia	15
5. Análise das Medições	15
6. Conclusão.....	25
7. Referências Bibliográficas.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Descarga Corona.

Figura 2 – Tipos de Descargas Parciais: (a) Superficial, (b) Corona. (c) Interna e (d) em Arborescência Elétrica.

Figura 3 – Curva de Paschen.

Figura 4 – Descargas Internas (a) em um sólido dielétrico (b) Display do Detector de DP.

Figura 5 – Descargas Internas (a) em Fissuras de Elastômeros, (b) Display do Detector de DP.

Figura 6 – Descargas (a) Internas em um Material com Diferentes Números e Formas de Cavidade, (b) na Superfície Externa de um Dielétrico, (c) Sobre uma Superfície Externa em Área de Alta Tensão Tangencial, (d) Display do Detector de DP.

Figura 7 – Material Imperfeito Produzindo Várias Resinas no Isolamento, (b) Display do Detector de DP.

Figura 8 – Descarga (a) em Cavidades Laminar, (b) Display do Detector de DP.

Figura 9 – Descarga Parcial (a) e (b) Feita em Bolhas de Gás em um Isolante Líquido, (c) Display do Detector de DP.

Figura 10 – Descarga (a) Entre Metal ou Carbono e um Material Dielétrico, (b) Display do Detector de DP.

Figura 11 – Descargas Parciais (a) Ocorrem em Cavidades de Vários Tamanhos Coladas pelo Metal de um lado e Dielétrico no outro, (b) Superficiais entre Metal Externo e a Superfície do Dielétrico, (c) Display do Detector de DP.

Figura 12 – Descarga (a) Devido a Transmissão Entre um Condutor Metálico, como uma Conexão Frouxa com um Escudo ou uma Tela, (b) Devido a uma Lacuna entre dois Objetos Independentes de Metal, (c) Display do Detector de DP.

Figura 13 – Descarga (a) Provocada pelo Crescimento Ativo do Carbono, (b) e (c) Displays Referentes a este Caso.

Figura 14 – Descarga (a) que se Originou Dentro de uma Cavidade que Degenerou em uma Faixa Não Crescente Ativamente, (b) Display do Detector de DP.

Figura 15 – Circuito de Medição de DP.

Figura 16 – Eletrodo Ponta Fina – 8 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

Figura 17 – Eletrodo Ponta Fina – 10 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

Figura 18 – Eletrodo Ponta Fina – 12 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

Figura 19 – Eletrodo Ponta Fina – 14 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

Figura 20 – Eletrodo Ponta Fina – 16 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

Figura 21 – Eletrodo Ponta Fina – 17 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

Figura 22 – Eletrodo Ponta Fina – 8 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 23 – Eletrodo Ponta Fina – 10 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 24 – Eletrodo Ponta Fina – 12 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 25 – Eletrodo Ponta Fina – 14 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 26 – Eletrodo Ponta Fina – 16 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 27 – Eletrodo Ponta Fina – 18 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 28 – Eletrodo Ponta Fina – 19 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 29 – Eletrodo Ponta Fina – 8 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 30 – Eletrodo Ponta Fina – 10 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 31 – Eletrodo Ponta Fina – 12 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 32 – Eletrodo Ponta Fina – 14 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 33 – Eletrodo Ponta Fina – 16 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 34 – Eletrodo Ponta Fina – 18 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 35 – Eletrodo Ponta Fina – 20 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 36 – Eletrodo Ponta Fina – 22 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 37 – Eletrodo Ponta Arredondada – 22 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 38 – Eletrodo Ponta Arredondada – 24 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 39 – Eletrodo Ponta Arredondada – 25 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 40 – Eletrodo Ponta Arredondada – 24 kV; 5,5 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 41 – Eletrodo Ponta Arredondada – 26 kV; 5,5 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 42 – Eletrodo Ponta Arredondada – 26 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 43 – Eletrodo Ponta Arredondada – 27 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 44 – Eletrodo Ponta Plana – 23 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 45 – Eletrodo Ponta Plana – 24 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 46 – Eletrodo Ponta Plana – 24 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 47 – Eletrodo Ponta Plana – 26 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 48 – Eletrodo Ponta Plana – 27 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.
Figura 49 – Número de Pontos do Daycor para o Eletrodo Ponta Fina.
Figura 50 – Número de Pontos do Daycor para o Eletrodo Ponta Arredondada.
Figura 51 – Número de Pontos do Daycor para o Eletrodo Ponta Plana.
Figura 52 – Número de Pontos do LDIC para o Eletrodo Ponta Fina.
Figura 53 – Número de Pontos do LDIC para o Eletrodo Ponta Arredondada.
Figura 54 – Número de Pontos do LDIC para o Eletrodo Ponta Plana.

LISTA DE ABREVIACOES

DP – Descargas Parciais.

DIV – Tensão de Incio de Descarga.

DEV – Tensão de Extingo de Descarga.

min – Minutos.

s – Segundos.

LAT – Laboratório de Alta Tensão.

mmHg – Milímetros de Mercúrio.

atm – Atmosfera.

1. Introdução

A isolação elétrica é uma das mais importantes partes dos componentes de alta tensão e sua qualidade determina a confiabilidade dos diversos equipamentos elétricos utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, tais como cabos, capacitores, isoladores, transformadores, geradores e motores. Todo sistema de isolação elétrica é projetado para suportar diversos estresses, aos quais fica submetido durante sua vida. Estes estresses são normalmente classificados em quatro tipos, a saber: elétrico (tensão, frequência de operação e sobretensões), térmico (temperatura de operação e gradientes de temperatura), mecânico (vibração e torção) e ambiental (contaminação, corrosão), e podem agir sobre o sistema de isolação de forma individual ou combinada.

Materiais poliméricos sintéticos, entre os quais o epóxi e o polietileno, são amplamente utilizados na manufatura de sistemas de isolação devido as suas excelentes propriedades dielétricas, entre as quais se destaca a sua elevada rigidez dielétrica. Todavia, deve ser observado que, por mais cuidadoso que seja o controle de qualidade durante o processo de manufatura é praticamente impossível evitar a presença de defeitos, tais como vazios, no produto final.

A medida de descargas parciais é o método mais comum e usual para detecção de vazios presentes na isolação elétrica. Esta tem sido amplamente utilizada em testes de tipo e rotina para avaliação da qualidade de materiais, reconhecimento de defeitos geradores de descargas parciais, monitoramento em linha da evolução das descargas parciais em equipamentos elétricos e estudo dos mecanismos envolvidos na ocorrência de descargas parciais. Duas técnicas têm sido bastante utilizadas para medida e avaliação, qualitativa e quantitativa, de descargas parciais: medidas com resolução temporal e medidas com resolução em ângulo de fase.

A ocorrência contínua de descargas parciais, em especial descargas corona, quando sob estresse elétrico, leva a progressiva deterioração das propriedades físicas dos materiais isolantes podendo vir causar efeito de rádio interferência, ruído em áudio, e em última instância, a causar a falha do equipamento por ruptura dielétrica.

As medidas de descargas corona normalmente são realizadas aplicando-se um campo elétrico bastante elevado na amostra sob ensaio, durante um tempo muito curto, geralmente 1 minuto, a fim de forçar a ocorrência das descargas parciais. Este procedimento, entretanto, tem alguns inconvenientes. A aplicação de um campo elétrico muito elevado ao sistema de isolação pode comprometer a vida útil do equipamento. Além disto, o tempo de aplicação da tensão pode não ser suficiente para que a descarga seja ativada.

A técnica de medição e análise parcial de descargas corona que ocorrem nas estruturas de isolamento ou de conjuntos pode ser usada para detectar pontos fracos antes que eles conduzam a uma falha catastrófica.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento das descargas parciais do tipo corona, em eletrodos de diferentes geometrias (ponta fina, ponta arredondada e ponta plana), através de ensaios em laboratório.

Os equipamentos de medição de descarga corona foram a Câmera de Faixa Ultra-Violeta (Daycor) e um detector digital de descargas parciais (LDIC).

2. Descargas Parciais

Descargas Parciais são fenômenos ocasionados pelo rompimento localizado da rigidez dielétrica do material isolante, e são originadas pelo processo de ionização de um meio gasoso submetido a um elevado campo elétrico.

Descargas Parciais são potenciais fontes de defeitos nos isolamentos elétricos, e sua presença pode ser um forte indicador de um processo que levará à falha total do isolamento. De fato, o fenômeno que ocorre inicialmente e de forma parcial no isolamento elétrico tende com o tempo a se tornar total, isto é, a evolução da falha no isolamento pode levar a um curto-circuito entre as partes energizadas e o terra, danificando o equipamento. É interessante, portanto, do ponto de vista avaliativo, que os níveis de ocorrência de DP sejam periodicamente avaliados em todos os equipamentos de potência.



Figura 1 – Exemplo de Descarga Corona.

2.1 Tipos de Descargas Parciais

Descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre numa região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa. As descargas parciais podem ser classificadas em três categorias de acordo com a sua origem: *descarga superficial*, *descarga corona* e *descarga interna*.

Particular atenção será dispensada na descrição das descargas parciais corona, as quais são os objetos de estudo deste trabalho.

Descargas Superficiais: ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede certo valor crítico o processo de descarga superficial é iniciado. Descargas superficiais ocasionam alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Este fenômeno, conhecido como trilhamento, pode levar à ruptura completa da isolação. Este tipo de descarga normalmente ocorre em cabos protegidos e terminações de cabos isolados, em saias de isoladores e no sistema de alívio de barras de geradores.

Descargas Corona: ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos. Estes pontos concentradores de estresse, ou seja, partes com pequenos raios de curvatura, formam regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem à ocorrência de descargas parciais. Descargas corona no ar geram ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica. Óxidos de nitrogênio combinados com vapor de água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolação promovendo o trilhamento do material.

Descargas Internas: ocorrem em inclusões de baixa rigidez dielétrica, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolação de alta tensão. A formação de vazios na estrutura de materiais poliméricos pode ser devida a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de fabricação. No caso de materiais termoplásticos como, por exemplo, o polietileno, a falha pode ocorrer durante o processo de injeção do polímero devido à infiltração do ar atmosférico. Para polímeros termofixos, tais como as resinas epóxi, a formação dos vazios pode ocorrer durante o processo de cura do material, podendo ser devido à infiltração do ar atmosférico ou a formação de gases residuais provenientes de reações químicas. Além dos fatores relativos ao processo de fabricação, os diversos estresses a que a isolação é submetida ao longo de sua vida também podem causar o aparecimento de vazios. Descargas internas podem ocorrer numa região do material dielétrico onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um dos eletrodos. Um tipo particular de descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas. A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no interior da isolação de equipamentos elétricos, tais como cabos de potência isolados, tendo sua origem devido à ocorrência contínua de descargas parciais internas em vazios ou a partir de uma falha no eletrodo. A Figura 2 apresenta de forma ilustrativa as três categorias de descargas parciais – superficial, corona e interna – que podem ocorrer em sistemas de isolação.

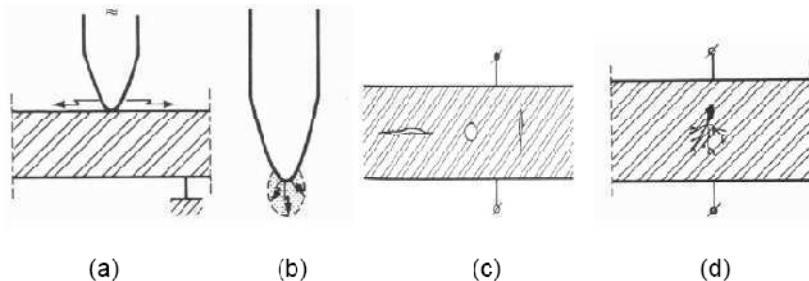


Figura 2 – Tipos de Descargas Parciais: (a) Superficial, (b) Corona. (c) Interna e (d) em Arborescência Elétrica.

2.2 Fatores que Influenciam na Formação das Descargas Parciais

O valor da tensão disruptiva de um equipamento, depende de sua pressão e temperatura; do material, da distância dos eletrodos, da forma e dimensão; ou seja, da intensidade do campo elétrico no espaço.

a) **Distância entre o eletrodo e o GAP:** para haver ruptura no equipamento é necessário a formação de avalanches.

b) **Pressão:** em altas pressões, a quantidade de moléculas do gás é bastante elevada. O número de choques entre as moléculas é muito grande, o caminho médio livre é pequeno, assim a energia dos choques é pouco ionizante. Desta maneira, para haver a ruptura torna-se necessário um aumento na tensão aplicada e assim, os elétrons livres podem adquirir a energia necessária à ionização no mesmo caminho médio livre.

Na região de média pressão, as moléculas apresentam uma distância média entre si bastante favorável à ionização. O caminho médio livre entre as moléculas permite que o número de choques ionizantes seja alto, por conseguinte a tensão aplicada para se obter a ruptura é menor. A pressão atmosférica aferida no laboratório foi de 722 mmHg ou 0,95 atm.

Analisando a curva de Paschen na região de baixa pressão, a diminuição da pressão torna o gás cada vez mais rarefeito. Estando o gás rarefeito, o número de moléculas presentes é pequeno, conseqüentemente o número de choque também o é. Com a elevação da tensão, mesmo sendo pequeno o número de choques, a probabilidade deste se tornarem choques ionizantes cresce, isto é, a rigidez dielétrica do gás em baixas pressões cresce com a diminuição da pressão.

c) **Temperatura:** para grandes aumentos de temperatura, aparecem processos de ionização térmica e emissão termoiônica de elétrons dos eletrodos contribuindo, em qualquer região da curva de Paschen, para o decréscimo da rigidez dielétrica. A temperatura aferida no laboratório em média foi de 28°C à 31°C;

d) **Umidade:** o ar, em condições normais contém certa quantidade de água dissolvida. A rigidez dielétrica do ar é fortemente influenciada pela presença da água na atmosfera (umidade). A umidade relativa do ar aferida no laboratório em média foi de 65% à 70%.

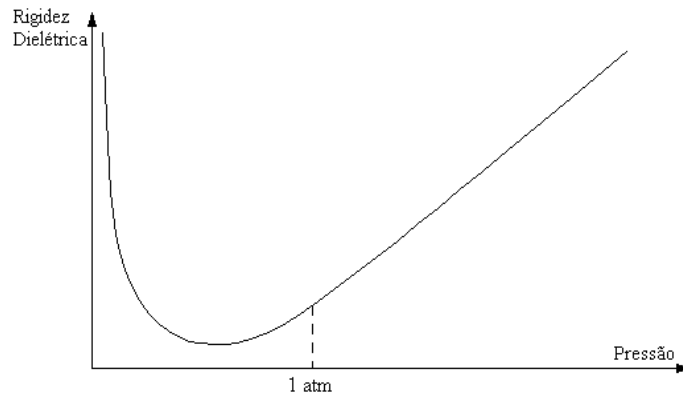


Figura 3 – Curva de Paschen

2.3 Diagnostico da Origem das Descargas

Desde o início dos anos 1940, um volume considerável de dados tem sido acumulado sobre o tema dos ensaios de descargas parciais como realizado em equipamentos como transformadores, condensadores, cabos, entre outros. As mudanças ocorridas desde então, em termos de equipamento de teste e desenvolvimento de técnicas de teste têm sido enormes, mas a interpretação dos resultados, bem como a desenvolvimento de ações corretivas, são dois assuntos que necessitam de desenvolvimento.

O diagnóstico deve ser feito no momento do teste, não em uma data posterior. Ao realizar o diagnóstico, a descarga padrão deve ser registrada em primeiro lugar, a atenção deve ser direcionada para os efeitos do tempo e da tensão, após que outra ação poderia ser considerada adequada, tais como a substituição da amostra em teste com outra amostra.

Algumas interpretações devem ser levadas em consideração, dentre elas podemos destacar:

❖ Caso 1

Descargas internas em um sólido dielétrico-delimitadas cavidade são ilustradas na Figura 3. Isso é típico dos vazios encontrados no material de folha contínua e alguns componentes do elenco. As descargas ocorrem antes dos picos de tensão em ambas as metades positivas e negativas da onda. As descargas são da mesma amplitude e mesmo número em ambos os lados da elipse, embora as diferenças de 3:1 na magnitude de um lado do display para o outro são normais. É normal notar um grau de variação aleatória em amplitude ou localização com o tempo. Existe pouca ou nenhuma variação em magnitude com o aumento da tensão, e a tensão de extinção de descarga (DEV) é igual ou ligeiramente abaixo da tensão de início de descarga (DIV). O tempo de aplicação de tensão geralmente tem pouco efeito sobre o padrão da descarga apresentado durante um único teste (até 10 min de duração).

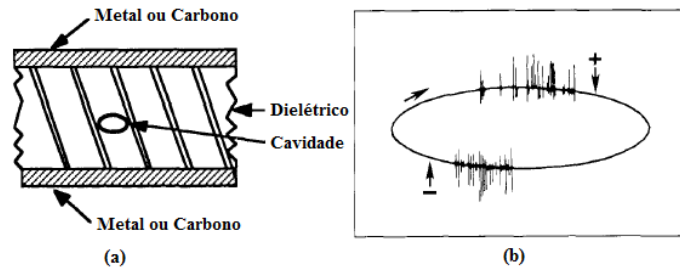


Figura 4 - Descargas Internas (a) em um Sólido Dielétrico (b) Display do Detector de DP.

❖ Caso 2

Descargas internas ocorrem em fissuras nos elastômeros isolamento na direção do campo elétrico. Também ocorre dentro de uma cavidade arredondada na isolação termoplástica contendo inibidores em certos elastômeros. Este fenômeno é típico de alguns problemas em cabos que podem ser encontrados. As descargas ocorrem antes da tensão de picos e muitas vezes são semelhantes, em número e magnitude, embora as diferenças de 3:1 são normais. Há pouca ou nenhuma variação em magnitude, com um justo rápido aumento e diminuição da tensão e do fenômeno aparece semelhante ao Caso 1. O efeito do tempo de tensão aplicação é, no entanto, bastante diferente. Se um nível de tensão máxima é mantido por 30 min, a magnitude da descarga diminui gradualmente, e a tensão de extinção será maior do que a tensão original de início.

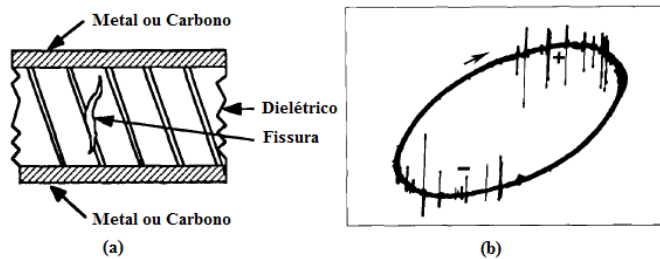


Figura 5 – Descargas Internas (a) em Fissuras de Elastômeros, (b) Display do Detector de DP.

❖ Caso 3

Este caso pode ser um indicativo de qualquer um dos três típicos casos, como mostrado a seguir. Primeiro, as descargas internas em um número de cavidades de diferentes tamanhos e formas, num dielétrico, como mostrado na Figura 6(a). Em segundo lugar, as descargas nas superfícies externas do dielétrico tocam entre dois condutores, como mostrado na Figura 6(b). Terceiro, as descargas sobre uma superfície externa do dielétrico em áreas de alta tensão tangencial, como mostrado na Figura 6(c). Isso é típico de uma má construção da bucha resultando em uma folha de metal excessivo ou uma folha com defeito. As descargas são normalmente da mesma magnitude em ambos +Ve e -Ve picos de tensão e estão localizados em avanço de ambos os picos; diferenças de 3:1 pode ser visto em magnitude nos dois meios-ciclos.

O tempo de aplicação de tensão (pelo menos até cerca de 10 min) tem pouco efeito sobre a exibição da descarga.

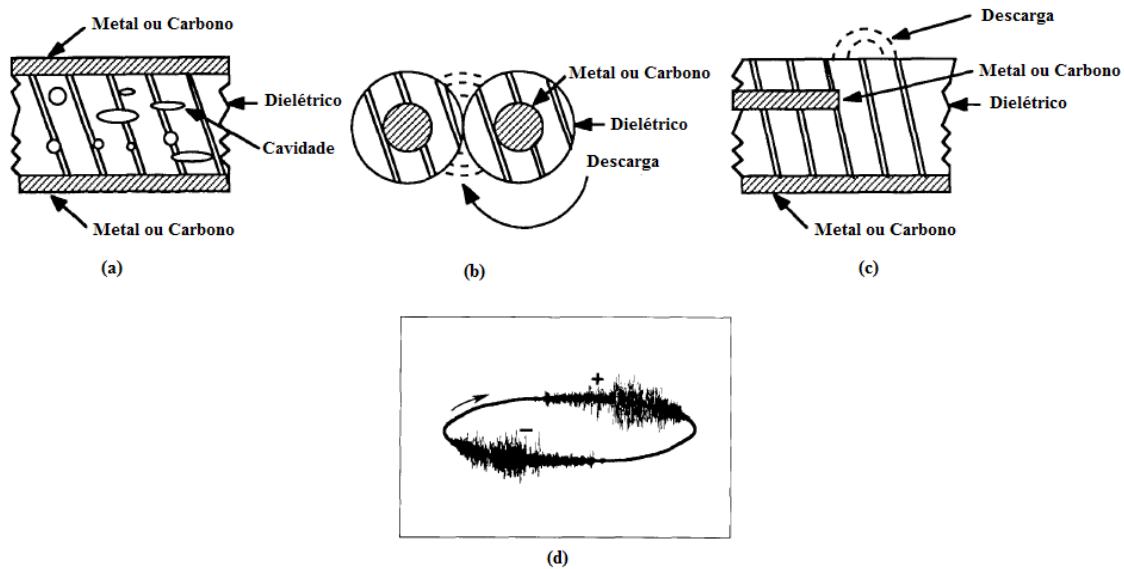


Figura 6 – Descargas (a) Internas em um Material com Diferentes Números e Formas de Cavidade, (b) na Superfície Externa de um Dielétrico, (c) Sobre uma Superfície Externa em Área de alta Tensão Tangencial, (d) Display do Detector de DP.

❖ Caso 4

Processamento imperfeito frequentemente produz vazias resinas no isolamento de sistemas. A formação de produtos condutores de eletricidade pode resultar da ação de descargas sobre a resina nesses locais. As descargas ocorrem antes dos picos de tensão e muitas vezes são iguais em ambas as metades da onda. O padrão é resolvido no início, mas pode tornar-se rapidamente resolvido quando a tensão é maior. Após descansar por um período significativo de tempo, as características iniciais serão restauradas.

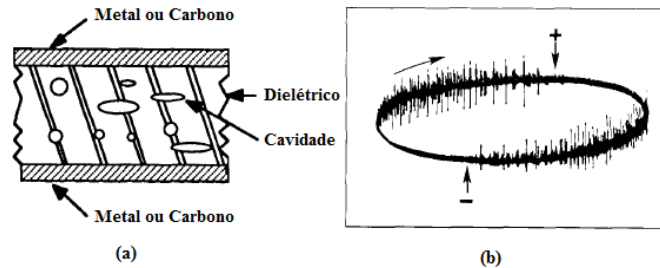


Figura 7 – Material Imperfeito Produzindo Várias Resinas no Isolamento, (b) Display do Detector de DP.

❖ Caso 5

Esta observação geralmente pode ser devido a descargas em cavidades laminar como encontrado no isolamento da máquina contendo mica e outros materiais de folha. As descargas ocorrem antes dos picos de tensão. Magnitudes muitas vezes são semelhantes em ambos os meios ciclos. Há uma clara concepção sobre o mínimo detectável, com a magnitude aumentando continuamente com o aumento da tensão. Se a tensão é realizada em um nível máximo, o valor aumenta gradualmente e torna-se estável, depois de cerca de 10 min.

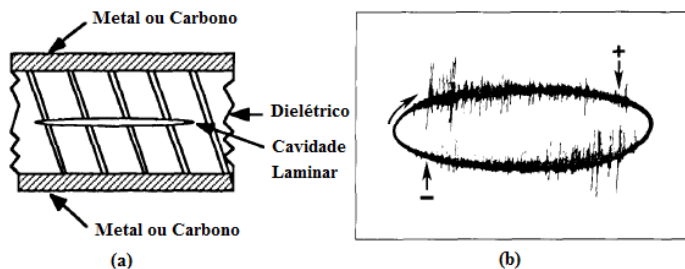


Figura 8 – Descarga (a) em Cavidades Laminar, (b) Display do Detector de DP.

❖ Caso 6

Descarga parcial pode ser feita em bolhas de gás em um isolante líquido em contacto com a altitude de celulose (por exemplo, óleo impregnado papel), muitas vezes em estruturas de capacitores. As bolhas são geradas pela ação da tensão elétrica na celulose. Há um aumento de bolhas no tamanho e número com a ação de descargas, mas se dissolver no líquido e desaparecem eliminando o estresse por um período de tempo. As descargas são da mesma magnitude em cada meio ciclo, e, com antecedência dos picos de tensão, pode haver alguma variação aleatória em amplitude e localização na forma de onda de teste.

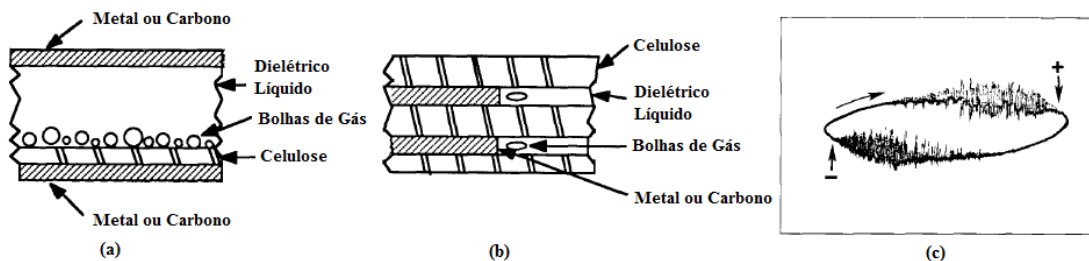


Figura 9 – Descarga Parcial (a) e (b) Feita em Bolhas de Gás em um Isolante Líquido, (c) Display do Detector de DP.

❖ Caso 7

Esse caso é observado quando existe uma cavidade entre metal e carbono ou de um lado metal e material dielétrico sobre o outro lado. O fenômeno de descarga, antes dos picos de tensão é assimétrica, ou seja, a magnitude desiguais e o número na metade de dois ciclos geralmente na

proporção de 3:1, fica cerca de 10:1 distinguindo claramente do Caso 1 descrito anteriormente. Se a tela é como mostrada na Figura 10(b), com um pequeno número de grandes descargas no pico negativo e um grande número de pequenas descargas no pico positivo, o vazão é normalmente localizado em uma posição onde a face do metal é no potencial de terra e a outra face é dielétrica, como mostrado na Figura 10(a). O tempo de aplicação de até 10 min tem pouco efeito sobre a exibição.

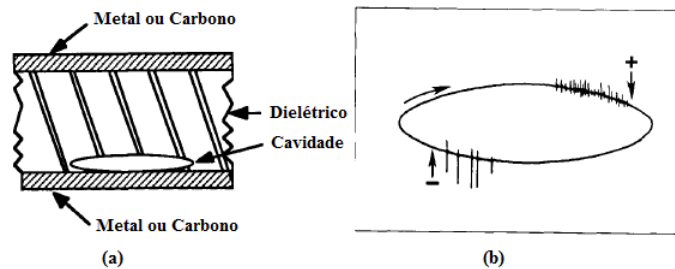


Figura 10 – Descarga (a) entre Metal ou Carbono e um Material Dielétrico, (b) Display do Detector de DP.

❖ Caso 8

O padrão discutido neste caso é um bom exemplo de descargas parciais que ocorrem em cavidades de vários tamanhos coladas pelo metal de um lado e dielétrico no outro. Uma fonte alternativa de que essas descargas podem ser descargas superficiais entre metal externo e a superfície do dielétrico. A descrição do efeito da tensão e tempo é semelhante ao Caso 7. O início é bem definido, com diferentes magnitudes em cada metade do ciclo de 10:1. Aumenta a magnitude lentamente à medida que a tensão é gerada; tensão de extinção é geralmente um pouco menor do que a criação. O tempo de aplicação de tensão é de 10 min e tem pouco efeito.

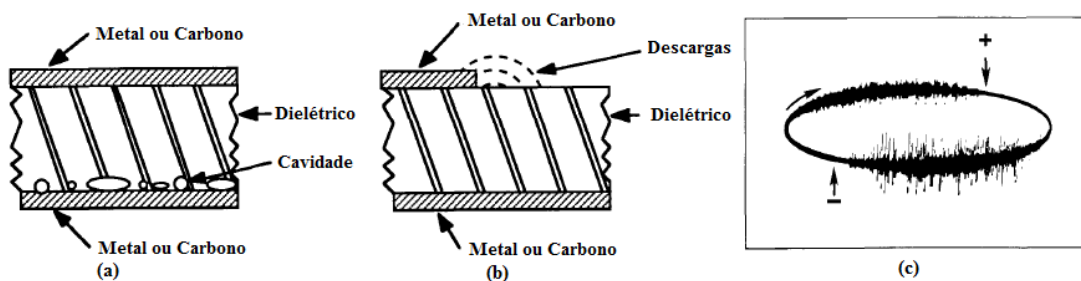


Figura 11 – Descargas Parciais (a) Ocorrem em Cavidades de Vários Tamanhos Coladas pelo Metal de um lado e Dielétrico no outro, (b) Superficiais entre Metal Externo e a Superfície do Dielétrico, (c) Display do Detector de DP.

❖ Caso 9

Este é um caso bastante raro, já que pode ser mais frustrante até que a fonte é diagnosticada, como será descrito. Existem duas causas comuns, o primeiro poderia ser devido a uma transmissão entre um condutor metálico, como uma conexão frouxa com um escudo ou uma tela, como mostrado na Figura 12(a). Alternativamente, pode ser devido a uma lacuna entre dois objetos independentes de metal em que uma tensão é produzida por indução eletrostática do circuito de teste, com objetos metálicos não ligados ao chão da área de ensaio Figura 12(b). As descargas da mesma magnitude e número ocorrem nos dois ciclos e meio de antecedência da tensão de picos. Como a tensão é elevada, os pulsos de descarga abrangem cada vez mais uma maior parcela da onda. A descarga inicial é bem definida acima do nível de ruído, sem qualquer alteração em magnitude que a tensão é aumentada, a extinção tensão coincide com a tensão de início, e a resposta não é afetada pelo tempo de aplicação da tensão de ensaio.

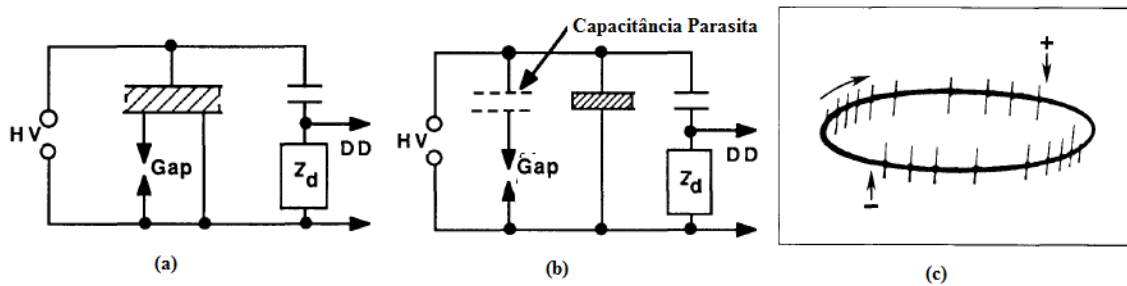


Figura 12 – Descarga (a) Devido a Transmissão entre um Condutor Metálico, como uma Conexão Frouxa com um Escudo ou uma Tela, (b) devido a uma Lacuna entre dois Objetos Independentes de Metal, (c) Display do Detector de DP.

❖ Caso 10

O crescimento ativo do carbono em uma faixa localizada provoca superaquecimento do material orgânico em forma mostrada na Figura 13(a). As descargas estão localizadas simetricamente sobre os dois picos de tensão, como mostrado na Figura 13(b), ou poderia assemelhar-se Figura 13(c). A tensão de início é variável, com a extinção abaixo da tensão de início. Observa-se a magnitude aumentar rapidamente com a tensão, grandes e invariáveis mudanças em magnitude pode ocorrer especialmente em tensões mais elevadas.

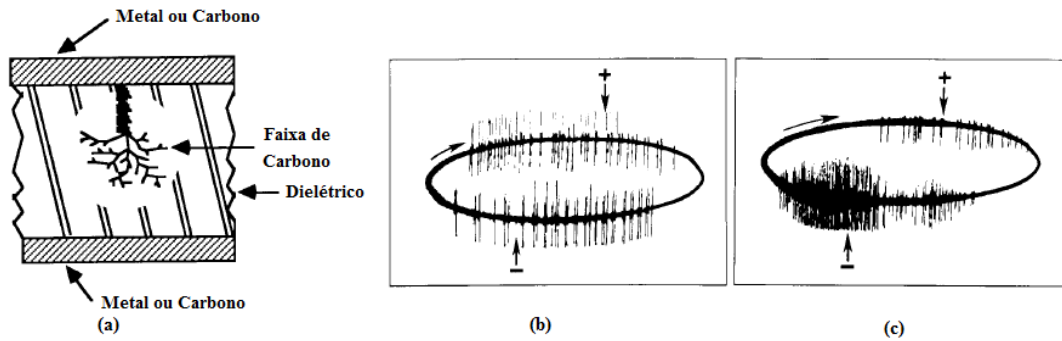


Figura 13 – Descarga (a) Provocada pelo Crescimento Ativo do Carbono, (b) e (c) Displays Referentes a este Caso.

❖ Caso 11

O rastreamento de isolamento orgânico contaminado proveniente de descargas que se originou dentro de uma cavidade que degenerou em uma faixa não crescendo ativamente, como mostrado na Figura 14(a) resultaria em uma tela, como mostrado na Figura 14(b). As descargas são da mesma magnitude em ambos os semi-ciclos de forma de onda de teste. Como a tensão é elevada, o padrão se espalha por mais forma de onda, mas com pouca mudança na magnitude. A resposta não é afetada pelo tempo de tensão aplicada.

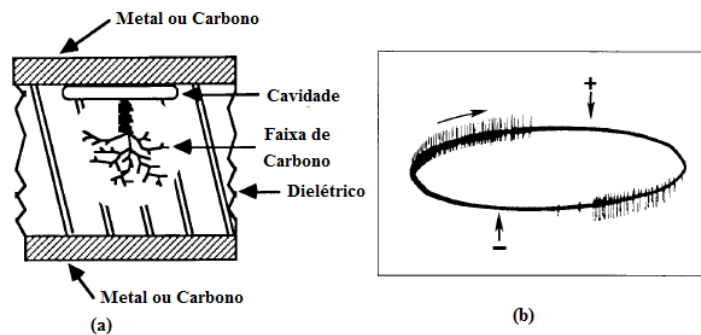


Figura 14 – Descarga (a) que se Originou Dentro de uma Cavidade que Degenerou em uma Faixa Não Crescente Ativamente, (b) Display do Detector de DP.

3. Interferências no Processo de Medição da DP

Em qualquer tipo de ensaios se sujeita a diversos tipos de perturbações (ruídos) que dependendo de sua intensidade, podem comprometer drasticamente os resultados das medições. De fato, ruídos sempre iram existir no sistema. Entretanto, essas perturbações podem ser atenuadas. Na Tabela 1, sintetiza de forma bastante eficaz os diversos problemas e tipos de interferências juntamente com suas sugestões de ação corretivas.

Tabela 1

Lista de Interferências

Problemas	Fonte de Perturbação	Sugestão de Ação Corretiva
Escolha de Fonte Externa	Interferência Principal.	Filtro em ligações de alimentação e / ou da linha de alta tensão. Use um circuito detector equilibrado.
	Radiação HV.	Filtro HV ou seleção terminações HV para quaisquer arestas vivas.
	Sinais de Rádio e ondas eletromagnéticas.	Sala blindada ou outras blindagens
Descargas em Circuitos de Teste	Fonte de Alta Tensão.	Use uma descarga livre de abastecimento, filtro de linha de alta tensão, toróide, ou blindagem. Circuito balanceado.
	Capacitor de Acoplamento.	Capacitor deve ser de descarga livre, use dois em um tempo e um circuito de seleção, se possível.
Ruído dos Contatos	Ruído no circuito de teste. Entre folhas e terminais dos capacitores. Ruído em buchas, trocadores de TAP.	Boas conexões e aterramento. Aplicar pulso de corrente através da cobrança com a DC e de curto-circuito. Verificar todos os contatos bem antes do teste.

4. Equipamentos Utilizados na Medição de DP

Dentre os equipamentos utilizados para medição de Descargas Parciais podemos destacar:

- Impedância de Medição (LDM-5);
- Computador (contendo o software LDIC);
- Capacitores;
- Resistências;
- Indutor;
- Transformador (10 kVA e tensão até 100 kV);
- Câmera de Faixa Ultra-Violeta (Daycor);
- Câmera Digital;
- Eletrodos (Ponta fina, Ponta Arredondada e Ponta Plana);
- Cronômetro.

4.1 Circuito de Medição

Do ponto de vista da análise no domínio da frequência, os circuitos de medição de descargas parciais pelo método elétrico consistem essencialmente em filtros passa altas para alta tensão. O arranjo mais elementar consiste em adicionar em paralelo com o objeto a ser testado um capacitor de acoplamento em série com uma impedância de medição – sobre a qual será medido o sinal de DP.

A Figura 15 mostra o esquema do circuito utilizado para medição de DP.

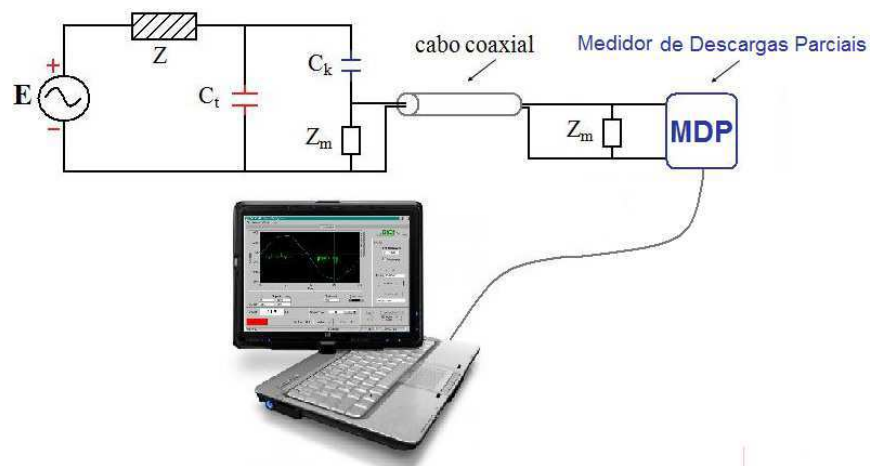


Figura 15 – Circuito de Medição de DP.

Onde:

C_t → Capacitância Equivalente da Amostra;

C_k → Capacitância de Acoplamento.

4.2 Metodologia

As medições de DP foram organizadas da seguinte forma:

1. Escolha dos Eletrodos: Primeiramente foram escolhidos os tipos de eletrodos a serem utilizados na medição,
2. Distância entre Eletrodo e Terra (Gap): Escolheu-se as distâncias 5,0cm, 5,5cm e 6,0cm para todos os casos. É importante salientar que certos tipos de eletrodos, como por exemplo, o de Ponta Arredondada e Plana, não é aconselhável diminuir essa distância, pois fica inviável de detectar descargas do tipo corona.
3. Aplicação de Tensão: Fixando o tipo de eletrodo e o gap, variou-se a tensão desde a tensão de início da descarga corona até a tensão máxima suportável (iminência de ruptura do ar).
4. Análise da DP: Analisou-se o comportamento da DP através de uma aplicação de tensão de duração de 5 minutos, para todos os eletrodos. Durante esse tempo, foram feitos pequenos vídeos de duração de 15 segundos cada, com uma câmera digital acoplada no Daycor.
 - 1º Vídeo: 0 até 15 segundos;
 - 2º Vídeo: 1 minuto até 1min e 15 s;
 - 3º Vídeo: 4min e 45s até 5 minutos.

A partir dos vídeos, observaram-se os valores de *Cout Rate*¹ em cada segundo para plotar no MATLAB[®].

5. Análise das Medições

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento das descargas parciais do tipo corona, em eletrodos de diferentes geometrias (ponta fina, ponta arredondada e ponta plana), através de ensaio em laboratório, utilizado o Daycor e o LDIC.

As medições obtidas a partir do Daycor são dadas em termos de números de pontos de descarga e as medições obtidas a partir do LDIC são dadas em pC (pico Coulomb).

A seguir observam-se as medições feitas utilizando o Daycor e o LDIC para todos os eletrodos e suas respectivas distâncias.

¹ Cout Rate: (Palavra Inglesa) s.m. Taxa de Contagem.

➤ **Eletrodo Tipo 1 – Ponta Fina.**

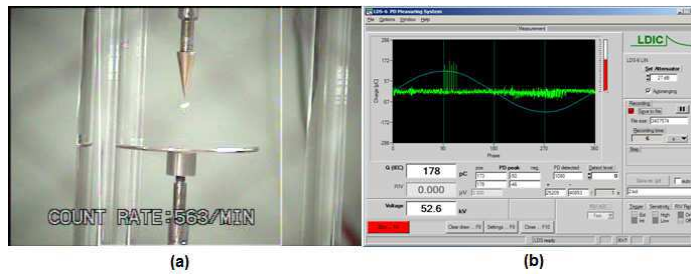


Figura 16 – Eletrodo Ponta Fina – 8 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

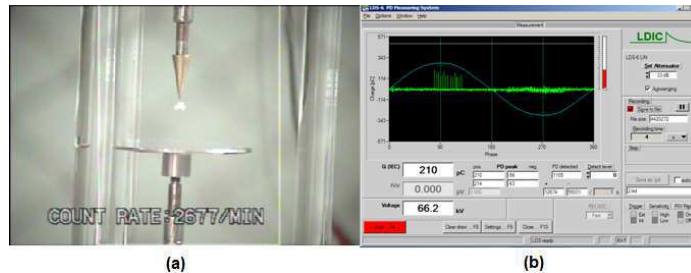


Figura 17 – Eletrodo Ponta Fina – 10 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 18 – Eletrodo Ponta Fina – 12 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

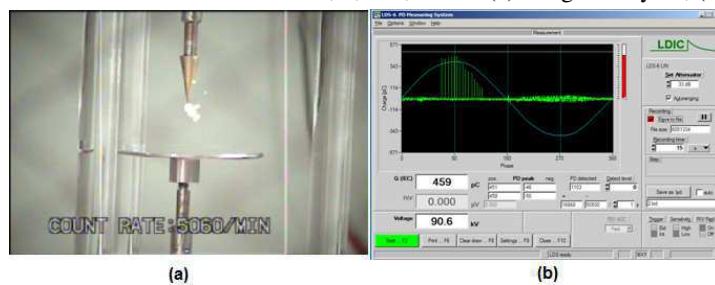


Figura 19 – Eletrodo Ponta Fina – 14 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 20 – Eletrodo Ponta Fina – 16 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 21 – Eletrodo Ponta Fina – 17 kV; 5,0cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 22 – Eletrodo Ponta Fina – 8 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

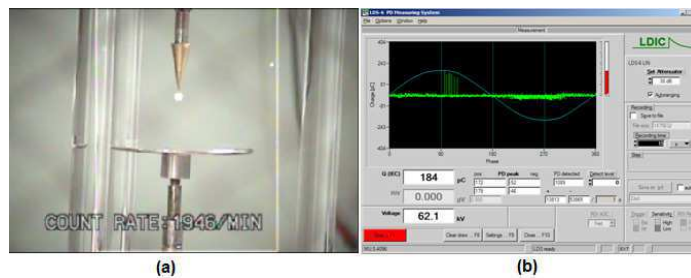


Figura 23 – Eletrodo Ponta Fina – 10 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 24 – Eletrodo Ponta Fina – 12 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

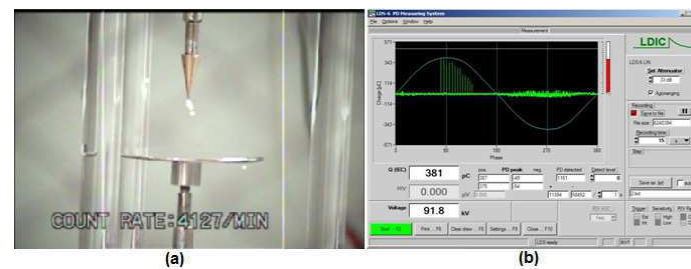


Figura 25 – Eletrodo Ponta Fina – 14 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 26 – Eletrodo Ponta Fina – 16 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 27 – Eletrodo Ponta Fina – 18 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

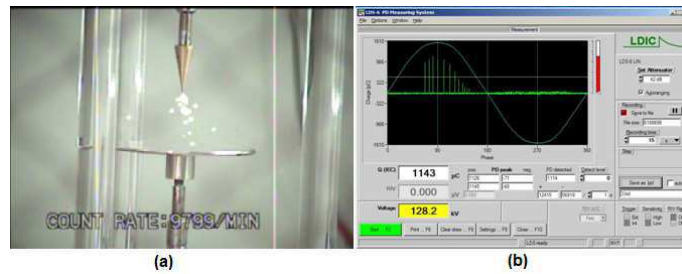


Figura 28 – Eletrodo Ponta Fina – 19 kV; 5,5cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

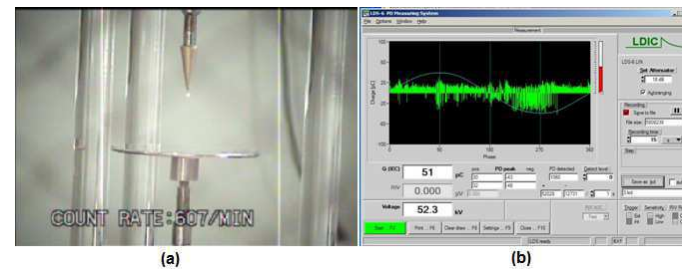


Figura 29 – Eletrodo Ponta Fina – 8 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

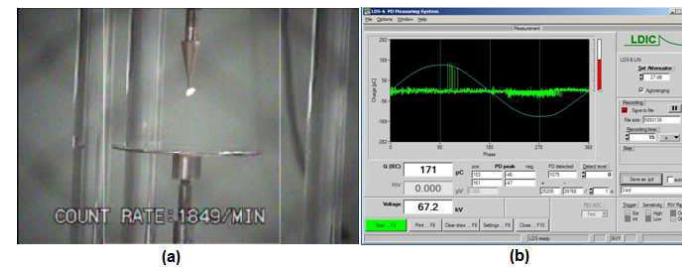


Figura 30 – Eletrodo Ponta Fina – 10 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

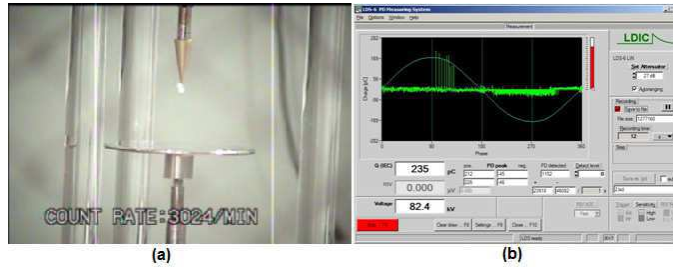


Figura 31 – Eletrodo Ponta Fina – 12 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 32 – Eletrodo Ponta Fina – 14 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

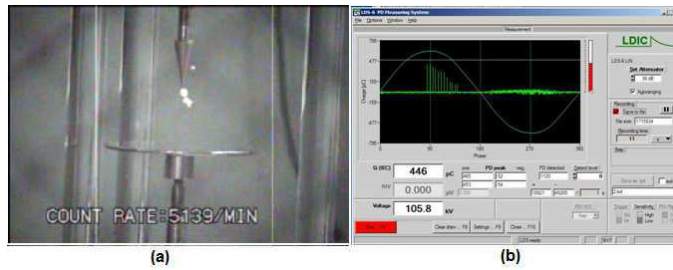


Figura 33 – Eletrodo Ponta Fina – 16 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 34 – Eletrodo Ponta Fina – 18 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 35 – Eletrodo Ponta Fina – 20 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 36 – Eletrodo Ponta Fina – 22 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

➤ **Eletrodo Tipo 2 – Ponta Arredondada**

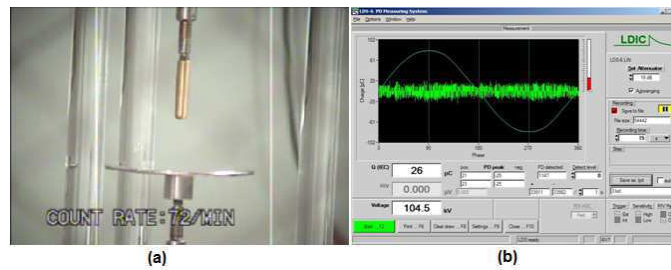


Figura 37 – Eletrodo Ponta Arredondada – 22 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

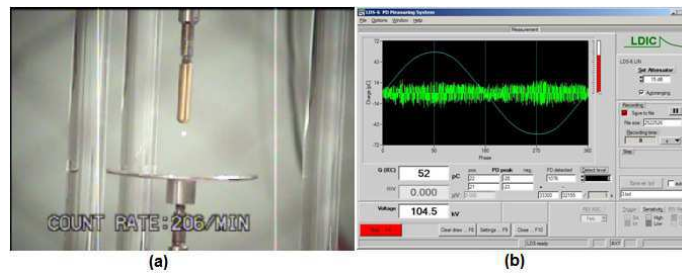


Figura 38 – Eletrodo Ponta Arredondada – 24 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 39 – Eletrodo Ponta Arredondada – 25 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

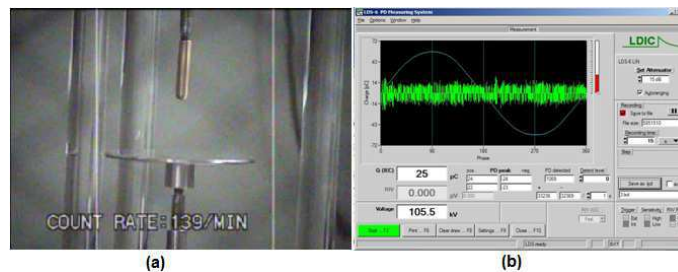


Figura 40 – Eletrodo Ponta Arredondada – 24 kV; 5,5 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 41 – Eletrodo Ponta Arredondada – 26 kV; 5,5 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

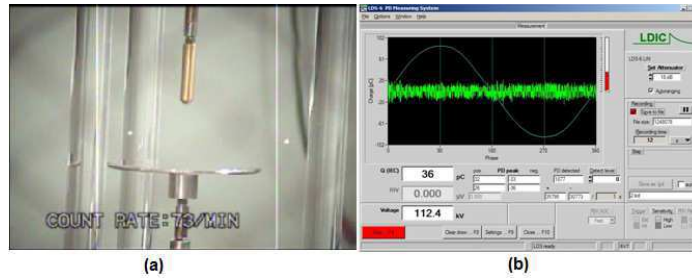


Figura 42 – Eletrodo Ponta Arredondada – 26 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 43 – Eletrodo Ponta Arredondada – 27 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

➤ **Eletrodo Tipo 3 – Ponta Plana.**

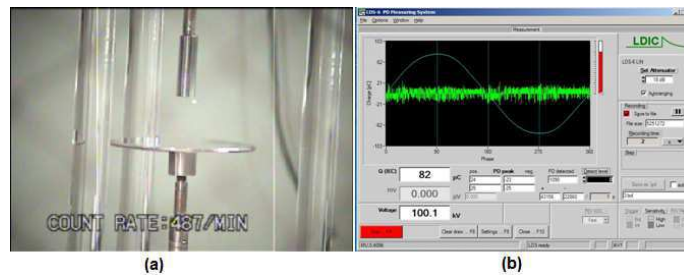


Figura 44 – Eletrodo Ponta Plana – 23 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 45 – Eletrodo Ponta Plana – 24 kV; 5,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 46 – Eletrodo Ponta Plana – 24 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

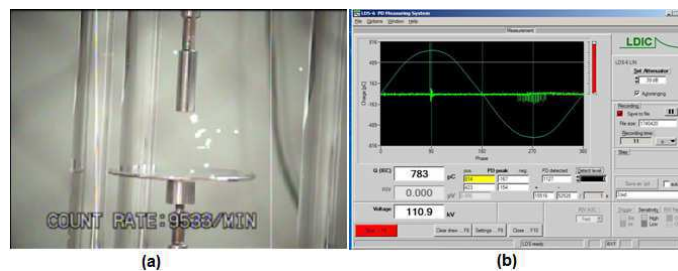


Figura 47 – Eletrodo Ponta Plana – 26 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.



Figura 48 – Eletrodo Ponta Plana – 27 kV; 6,0 cm; 5 min. (a) Imagem Daycor, (b) LDIC.

A Figura 49 até a Figura 51 ilustram o perfil obtido com os pontos do Daycor, de cada eletrodo juntamente com os níveis de tensões aplicados sobre eles.

A Figura 52 até a Figura 54 ilustram o perfil obtido com os pontos do LDIC, de cada eletrodo juntamente com os níveis de tensões aplicados sobre eles.

Os gráficos mostram o desempenho de cada eletrodo e seus respectivos níveis de tensões a que foram submetidos durante o tempo de medição.

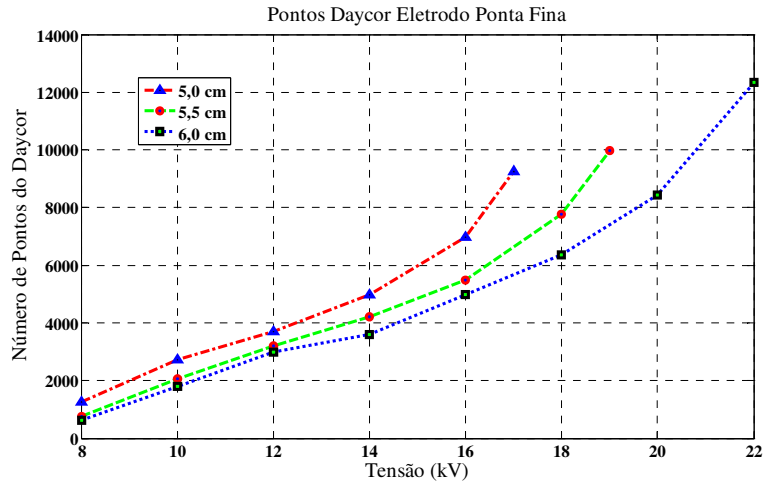


Figura 49 – Número de pontos do Daycor para o Eletrodo Ponta Fina.

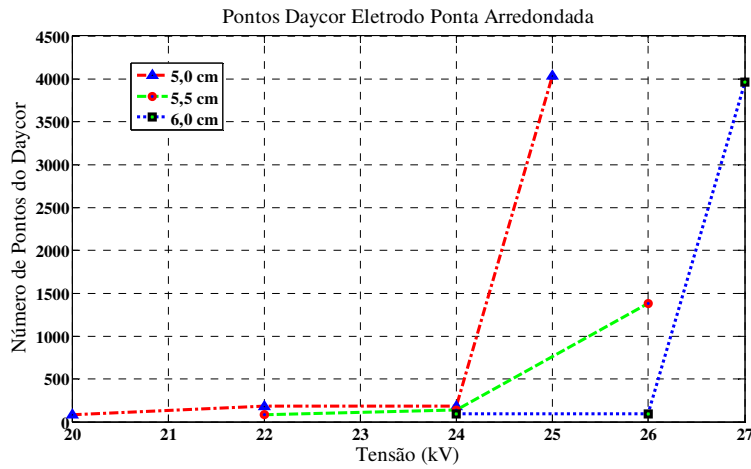


Figura 50 – Número de pontos do Daycor para o Eletrodo Ponta Arredondada.

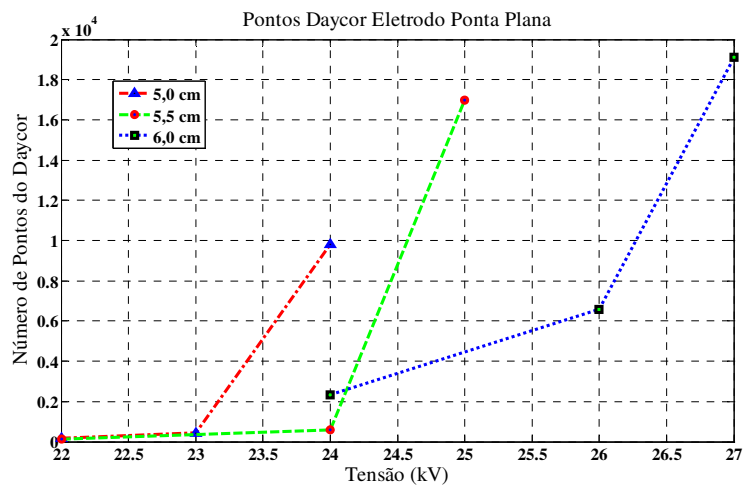


Figura 51 – Número de pontos do Daycor para o Eletrodo Ponta Plana.

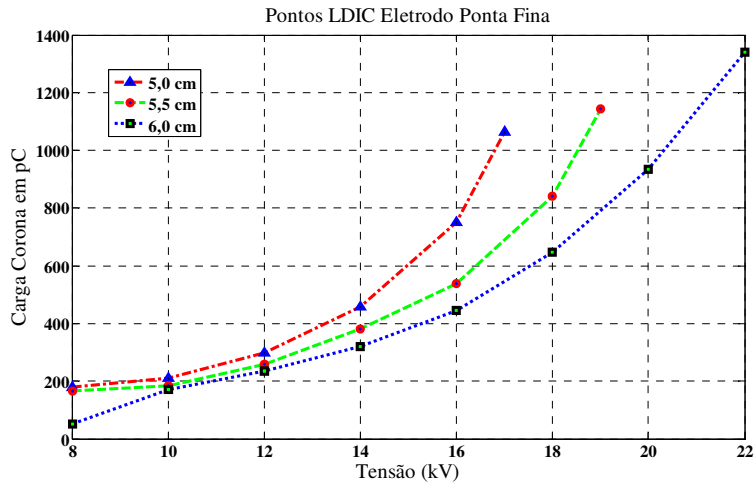


Figura 52 – Número de pontos do LDIC para o Eletrodo Ponta Fina.

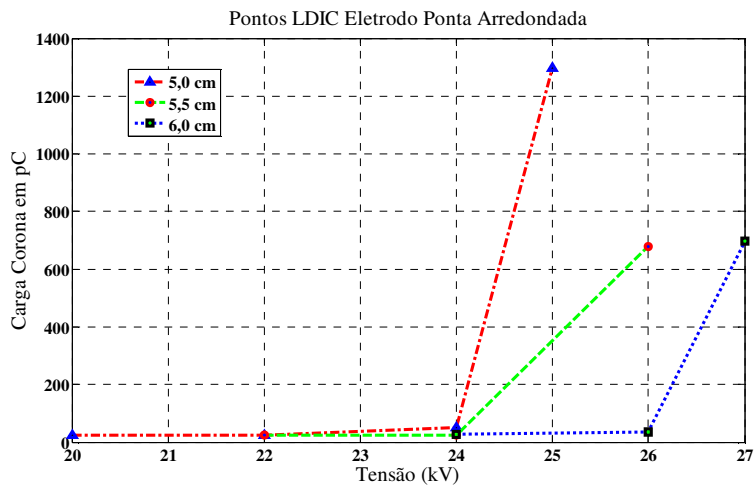


Figura 53 – Número de pontos do LDIC para o Eletrodo Ponta Arredondada.

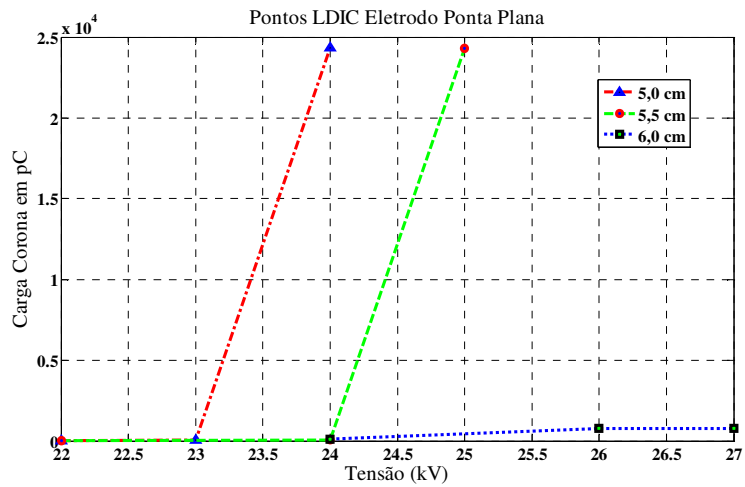


Figura 54 – Número de pontos do LDIC para o Eletrodo Ponta Plana.

6. Conclusão

A medida de descargas parciais é o método mais comum e usual para detecção de vazios presentes na isolação elétrica.

Durante o processo de medição de DP alguns resultados deram defasagem de 180° (como no caso do eletrodo ponta fina), ou seja, as descargas deveriam ocorrer no pico negativo da tensão aplicada. Fato que não ocorreu e que pode ser visivelmente observado das Figuras 16 (b) até a Figura 36 (b). Como os resultados foram praticamente unânimes conclui-se que pode ter um erro de defasagem do software LDIC.

Outro fato que deve ser considerado é que apesar de todas as medições terem sido feitas para um tempo de 5 minutos, foi feita uma medição em todos os eletrodos de duração de 1 hora e observou-se que após 1 hora de experimento os níveis de corona (ou pontos do Daycor) variarão muito pouco com relação aos mesmos níveis observados nos cinco primeiros minutos de análise. Então, foi considerado irrelevante realizar todas as medições em um período de 1 hora de duração, pois poderia danificar algum dos equipamentos utilizados, a diferença dos resultados seria simplória e, além disso, um desperdício de tempo considerável.

Do ponto de vista do desempenho a maioria dos eletrodos permaneceu com o número de pontos de Daycor com variação bastante pequena com exceção do eletrodo ponta arredondada para o nível de tensão de 24 kV que se chegou próximo a eminência de ruptura, entretanto seu comportamento estabilizou-se antes que ocorresse a ruptura do meio. Daí a importância da verificação da temperatura, pressão e umidade do ambiente onde foram realizadas as medições, pois uma variação de algum desses parâmetros pode promover a formação de uma DP e alterar os valores críticos de tensões máximas dos eletrodos.

No entanto, o eletrodo Ponta Fina foi mais eficiente na detecção de descarga corona, pois apresentou a maior variação entre tensão de início de corona e tensão de ruptura do ar, que foram respectivamente de 8 kV a 17 kV para a distância de 5,0cm; 8 kV a 19 kV para distância de 5,5 cm e 8 kV a 22 kV para distância de 6,0 cm. Diferente dos Eletrodos Ponta Arredondada e Ponta Plana que apresentaram uma pequena variação entre tensão de início de corona e tensão de ruptura do ar, cerca de 2 kV, que dificultou na detecção de descarga corona. Este fato pode ser observado nos gráficos da Figura 49 até a Figura 54.

Portanto, é salutar, do ponto de vista avaliativo, que os níveis de ocorrência de DP do tipo corona sejam periodicamente avaliados em todos os equipamentos de potência, pois descargas corona no ar geram ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica.

7. Referências Bibliográficas

[1] KREUGER, F. H. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. 1.ed. London: Butterworths, 1989.

[2] KREUGER, F.H., GULSKI, E., KRIVDA, A. *Classification of Partial Discharge*. IEEE TEL, v. 28, n. 6, p. 917-931, Dec. 1993.

[3] MASON, H. M. *Enhancing the Significance of PD Measurements*. IEEE TDEI, v. 2, n. 5, p.876-888, Oct. 1995.

[4] NBR 6940. Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Medição de descargas parciais. Nov. 1981.

[5] D. A. NATTRASS, *Partial Discharge Measurement and Interpretation*. IEEE, v. 4, n. 3, May 1988. Technical Consultant.