



**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

# **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos**

Proponente: Warner Peixoto Pinheiro Barros

Campina Grande, Junho de 2011



**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

## **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Proponente: Warner Peixoto Pinheiro Barros

Orientador: Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Junho de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B277a Barros, Warner Peixoto Pinheiro.  
Análise do efeito corona para diagnóstico de isoladores poliméricos /  
Warner Peixoto Pinheiro Barros. — Campina Grande, 2011.  
81 f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal  
de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. D.Sc. Edson Guedes da Costa.

Referências.

1. Sistemas Elétricos. 2. Efeito Corona. 3. Isoladores Poliméricos.  
I. Título.

CDU 621.311(043)

UFCG-BIBLIOTECA-CAMPUS I	
3705	18-08-01

**ANÁLISE DO EFEITO CORONA PARA DIAGNÓSTICO DE ISOLADORES  
POLIMÉRICOS**

**WARNER PEIXOTO PINHEIRO BARROS**

Dissertação Aprovada em 10.06.2011



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
**Orientador**



**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG**  
**Componente da Banca**



**DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG**  
**Componente da Banca**



**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG**  
**Componente da Banca**

CAMPINA GRANDE - PB  
JUNHO - 2011

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo incentivo nas horas difíceis. Principalmente aos meus pais pela educação e amor durante todos os dias da minha vida.

À minha noiva, Kaíza Rafaelle, companheira e amiga, sempre ao meu lado suportando as dificuldades encontradas e, tornando-se indispensável em tudo que eu faço.

Ao Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, orientador desta dissertação, por todo seu empenho, sabedoria, compreensão e por me instruir intelectualmente durante todo o decorrer do mestrado.

Aos amigos e colegas da UFCG, especialmente: Thiago Carvalho, Stênio Cantalice, Cícero Henrique, Cláudio Diego, Daniel Victor, Vitor Vale e Euler Macêdo.

Aos professores, funcionários e alunos que fazem parte do LAT, em especial: Tarso, Gilvan, Diego Buriti, Gustavo Guedes e Eduardo.

À Capes pela concessão da bolsa de mestrado.

## RESUMO

Os isolamentos elétricos são submetidos a campos elétricos e estresses cada vez maiores, devido à diminuição de distâncias elétricas e redução da quantidade de materiais empregados nos equipamentos. Campos elétricos intensos geram corona nas superfícies das partes metálicas provocando a degradação de superfícies isolantes, principalmente, daquelas constituídas de material orgânicos, como os isoladores poliméricos. Ainda não existe um consenso sobre quais níveis de descargas corona são aceitáveis na superfície dos isolamentos. Por outro lado, a intensidade do corona também é afetada pela degradação dos isolamentos orgânicos. Assim, a parametrização das medições das intensidades do corona pode ser usada para se determinar a retirada de isoladores poliméricos de operação, em estado avançado de degradação. Para tanto, técnicas de inspeção utilizando medições de descargas parciais (DP), em laboratório, e de radiação ultravioleta (UV), emitidas pela descarga corona foram avaliadas. As imagens UV foram processadas, visando obter apenas a região de ocorrência do corona em termos de concentração de píxeis. Uma correlação entre níveis de DP e dados obtidos a partir da câmera UV (pontos de descarga/minuto) e, do processamento de imagens (concentração de píxeis do corona) foi realizado. Dessa forma, a técnica de quantificação do corona utilizando processamento de imagens foi implementada, na qual níveis de corona aumentam de acordo com o grau de poluição e degradação dos isoladores para pequenas variações de umidade relativa do ar.

## ABSTRACT

The electrical insulation are submitted to electric fields and stress increasing, this occurs due to decreased electrical distances and reducing the amount of materials used in equipments. Corona generates intense electric fields on the surfaces of metal parts causing the degradation of insulating surfaces, especially those made of organic material such as insulators. There is still no consensus on what levels are acceptable corona discharges on the insulating surfaces. Moreover, the intensity of the corona is also affected by degradation of organic insulators. So, the parameterization of the measurements of the intensities of the corona can be used to determine the removal of polymeric insulators operating in an advanced state of degradation. For this, inspection techniques using measurements of partial discharge (PD) in the laboratory, and ultraviolet (UV) light emitted by the corona discharge were evaluated. The UV images were processed to obtain only the region of occurrence of the corona in terms of concentration of pixels. A correlation between levels of PD and data obtained from the UV camera (discharge points / minute), and image processing (concentration of pixels in the corona) was performed. Thus, the quantization of the corona technique using image processing was implemented, in which corona levels increase with the degree of pollution and degradation of insulators for small variations in relative humidity.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1. O EFEITO CORONA .....	4
2.1.1. <i>Processo de formação do efeito corona</i> .....	4
2.1.2. <i>Consequências do efeito corona</i> .....	7
2.1.3. <i>Detector de Radiação Ultravioleta</i> .....	8
2.2. DESCARGAS PARCIAIS .....	11
2.2.1. <i>Modelo</i> .....	11
2.3. ISOLADORES POLIMÉRICOS .....	13
2.4. PROCESSAMENTO DE IMAGENS .....	15
2.4.1. <i>Etapas do Processamento</i> .....	16
2.5. Estado da Arte .....	18
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. MATERIAIS .....	21
3.1.1. <i>Eletrodos</i> .....	21
3.1.2. <i>Isoladores Poliméricos – Classe 72,5 kV</i> .....	21
3.2. MÉTODOS .....	22
3.2.1. <i>Ensaio com eletrodos</i> .....	23
3.2.2. <i>Ensaio com Isoladores Poliméricos – Transformador em Cascata 600 kV</i> .....	25
3.2.3. <i>Ensaio com Isoladores Poliméricos – Diferentes Níveis de Poluição conforme EPRI</i> ...	26
3.2.4. <i>Processamento de Imagens – Vídeos UV</i> .....	26
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>28</b>
4.1. ELETRODOS – ARRANJO PONTA-PLANO .....	28
4.1.1. <i>Eletrodo Tipo I</i> .....	28
4.1.1.1. <i>Medição de Corona com Câmera UV</i> .....	29



4.1.1.2.	Medição de Descargas Parciais .....	30
4.1.1.3.	Processamento de Imagens e Correlação dos Resultados .....	32
4.1.2.	<i>Eletrodo Tipo II</i> .....	36
4.1.2.1.	Medição de Corona com Câmera UV .....	36
4.1.2.2.	Medição de Descargas Parciais .....	37
4.1.2.3.	Processamento de Imagens e Correlação dos Resultados .....	38
4.1.3.	<i>Eletrodo Tipo III – Ponto de Observação fixo e Espaçamento Variável</i> .....	42
4.1.3.1.	Medição de Corona com Câmera UV .....	42
4.1.3.2.	Medição de Descargas Parciais .....	45
4.1.3.3.	Processamento de Imagens e Correlação dos Resultados .....	48
4.1.4.	<i>Eletrodo Tipo III – Ponto de Observação Variável e Espaçamento Fixo</i> .....	50
4.2.	ISOLADORES POLIMÉRICOS .....	53
4.2.1.	<i>Ensaio com Variação do Ganho UV</i> .....	53
4.2.2.	<i>Ensaio com Isoladores Poliméricos para Diferentes Níveis de Poluição</i> .....	54
4.2.2.1.	Atmosfera Limpa – Condutividade de Suspensão de 10 mS/cm .....	54
4.2.2.2.	Contaminação Leve – Condutividade de Suspensão de 20 mS/cm.....	58
4.2.2.3.	Contaminação Pesada – Condutividade de Suspensão 40 mS/cm .....	61
4.2.2.4.	Análise dos Efeitos dos Níveis de Poluição para os Isoladores Poliméricos Escolhidos .....	65
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tensão versus corrente no processo de ionização de um gás (GOLDMAN et al., 1992).....	5
Figura 2.2. Processo de ionização por colisão (ARORA et al., 1995). .....	6
Figura 2.3. Espectro Eletromagnético. ....	8
Figura 2.4. Comprimento de onda e radiação solar versus transmissão do filtro do detector (LINDNER, 2004).....	9
Figura 2.5. Princípio de funcionamento do detector UV (LINDNER, 2004). ....	10
Figura 2.6. Processo de descargas parciais em um dielétrico (COSTA et al., 1996). ....	12
Figura 2.7. Processo de descargas parciais em um dielétrico (COSTA et al., 1996). ....	13
Figura 2.8. Isolador polimérico (FERREIRA, 2007). ....	14
Figura 2.9. Etapas do processamento de imagens. ....	16
Figura 3.1. (a) Eletrodo com ponta plana – Tipo I; (b) Eletrodo com ponta arredondada – Tipo II; (c) Eletrodo com ponta fina – Tipo III. ....	21
Figura 3.2. (a) Isolador polimérico sem defeitos; (b) Isolador polimérico envelhecido; (c) Isolador polimérico com defeito; (d) Isolador polimérico com 25 aletas, classe 72,5 kV. ....	22
Figura 3.3. Circuito de medição de descargas parciais e de corona. ....	23
Figura 3.4. Câmera ultravioleta DayCor II®. ....	25
Figura 4.1. Eletrodo Tipo I com espaçamento de 50 mm para tensão de 24 kV. a) Imagem da câmera UV. b) Imagem binária após processamento. c) Soma das 10 imagens binárias. d) Imagem ponderada. ....	32
Figura 4.2. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona. Eletrodo Tipo I. ....	33
Figura 4.3. Concentração de píxeis em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo I.....	33
Figura 4.4. Descargas parciais em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo I. ....	34
Figura 4.5. Correlação entre sinais de DP e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo I. ....	35
Figura 4.6. Correlação entre concentração de píxeis e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo I. ....	35
Figura 4.7. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona. Eletrodo Tipo II. ....	39
Figura 4.8. Concentração de píxeis em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo II. ....	39
Figura 4.9. Descargas parciais em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo II.....	40
Figura 4.10. Correlação entre sinais de DP e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo II. ....	41
Figura 4.11. Correlação entre concentração de píxeis e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo II....	41
Figura 4.12. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona. Eletrodo Tipo III.....	48
Figura 4.13. Concentração de píxeis em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo III. ....	49
Figura 4.14. Descargas parciais em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo III. ....	49
Figura 4.15. Correlação entre concentração de píxeis e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo III. .	50
Figura 4.16. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona com a distância variável. ....	52
Figura 4.17. Concentração de píxeis versus tensão aplicada com distância variável.....	52
Figura 4.18. Contagem de pontos UV por minuto gerada versus variação do Ganho UV da câmera. .	53
Figura 4.19. Imagem detectada pela câmera UV para isolador sem defeitos e poluição nível 1. ....	55
Figura 4.20. Resultados dos ensaios de DP para isolador sem defeitos e poluição nível 1.....	55
Figura 4.21. Imagem detectada pela câmera UV para isolador envelhecido e poluição nível 1. ....	56
Figura 4.22. Resultados dos ensaios de DP para isolador envelhecido e poluição nível 1. ....	56
Figura 4.23. Imagens detectadas pela câmera UV para isolador com defeito e poluição nível 1. ....	57
Figura 4.24. Resultados dos ensaios de DP para isolador com defeito e poluição nível 1.....	57
Figura 4.25. Imagem detectada pela câmera UV para isolador sem defeito e poluição nível 2.....	58
Figura 4.26. Resultados dos ensaios de DP para isolador sem defeito e poluição nível 2. ....	59

Figura 4.27. Imagem detectada pela câmera UV para isolador envelhecido e poluição nível 2. ....	59
Figura 4.28. Resultados dos ensaios de DP para isolador envelhecido e poluição nível 2. ....	60
Figura 4.29. Imagens detectadas pela câmera UV para isolador com defeito e poluição nível 2. ....	60
Figura 4.30. Resultados dos ensaios de DP para isolador com defeito e poluição nível 2. ....	61
Figura 4.31. Imagens detectadas pela câmera UV para isolador sem defeito e poluição nível 3. ....	62
Figura 4.32. Resultados dos ensaios de DP para isolador sem defeito e poluição nível 3. ....	62
Figura 4.33. Imagem detectada pela câmera UV para isolador envelhecido e poluição nível 3. ....	63
Figura 4.34. Resultados dos ensaios de DP para isolador envelhecido e poluição nível 3. ....	63
Figura 4.35. Imagem detectada pela câmera UV para isolador com defeito e poluição nível 3. ....	64
Figura 4.36. Resultados dos ensaios de DP para isolador com defeito e poluição nível 3. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Técnicas de monitoramento de isolamentos baseadas em UV, DP e Processamento de Imagens. ....	20
Tabela 3.1. Caracterização dos níveis de poluição segundo EPRI (1975). ....	26
Tabela 3.2. Valores escolhidos para elaboração das soluções (EPRI, 1975). ....	26
Tabela 4.1. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo I e espaçamento de 50 mm. ....	29
Tabela 4.2. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo I e espaçamento de 60 mm. ....	29
Tabela 4.3. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo I e espaçamento de 50 mm. ....	30
Tabela 4.4. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo I e espaçamento de 60 mm. ....	31
Tabela 4.5. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo II e espaçamento de 50 mm. ....	36
Tabela 4.6. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo II e espaçamento de 60 mm. ....	37
Tabela 4.7. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo II e espaçamento de 50 mm. ....	37
Tabela 4.8. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo II e espaçamento de 60 mm. ....	38
Tabela 4.9. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III e espaçamento de 40 mm. ....	42
Tabela 4.10. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III e espaçamento de 50 mm. ....	43
Tabela 4.11. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III e espaçamento de 60 mm. ....	44
Tabela 4.12. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo III e espaçamento de 40 mm. ....	45
Tabela 4.13. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo III e espaçamento de 50 mm. ....	46
Tabela 4.14. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo III e espaçamento de 60 mm. ....	47
Tabela 4.15. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III, espaçamento de 40 mm e variando a distância da câmera ao eletrodo. ....	51
Tabela 4.16. Agrupamento dos resultados analisados. ....	66

## LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

C	Coulomb.
$C_1$	Capacitância da cavidade.
$C_2$	Capacitância do material que está em série com a cavidade.
$C_3$	Representa a associação das capacitâncias do resto do material.
$C_k$	Capacitor de acoplamento.
$C_t$	Capacitância da amostra ensaiada.
DP	Descargas Parciais.
EPRI	Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica.
ESDD	Densidade Equivalente de Sal Depositado.
F	Faraday.
g	Gramas.
IEC	Comitê Eletrotécnico Internacional.
k	Quilo ( $1 \times 10^3$ ).
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
m	Metro.
min	Minuto.
mm	Milímetro.
mmHg	Milímetro de Mercúrio.
n	Nano ( $1 \times 10^{-9}$ ).
NBR	Denominação de Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.
NTSC	Comitê Nacional dos Sistemas de Televisão.
p	Pico ( $1 \times 10^{-12}$ ).
PI	Processamento de Imagens.
PAL	Alteração de Fase por Linha.
RGB	Red Green Blue (Vermelho Verde Azul)
s	Segundo.
UV	Ultravioleta.
V	Diferença de potencial.
VA	Volt-ampère.
$V^+$ e $V^-$	Tensões residuais existentes nas cavidades.
$U^+$ , $U^-$	Tensões disruptivas.
$U_t(t)$	Tensão alternada aplicada.
$Z_m$	Impedância de medição.

# 1. INTRODUÇÃO

As interrupções no fornecimento de energia acarretam grandes prejuízos para consumidores e concessionárias. Para assegurar a continuidade do suprimento de energia elétrica é importante monitorar os equipamentos do sistema elétrico para se antecipar as possíveis falhas. Para o caso específico de linhas de transmissão, por exemplo, conforme afirma NIGRI (1999), o desempenho das instalações está diretamente relacionado com o desempenho dos seus isoladores. A introdução de tecnologias confiáveis que possibilitem alertar as equipes de manutenção quanto ao processo degenerativo de isolamentos representa, portanto, uma ação estratégica importante para a operação normal do sistema elétrico.

Existem diversas técnicas de diagnóstico em isolamentos. Algumas aplicadas em laboratório e outras em campo. Em laboratório, as técnicas mais eficientes são a inspeção visual, a aplicação de raios X, a medição de descargas parciais, a medição da corrente de fuga, medição de corona (UV), medições termográficas, entre outras. A maioria das técnicas utilizadas em laboratório não se aplica ao campo. Algumas apresentam custo alto, outras são invasivas e outras são tecnicamente inviáveis.

A técnica de medição do corona utilizando uma câmera ultravioleta (UV) apresenta simplicidade, rapidez na detecção do efeito corona, propriedade não invasiva e aplicação no campo. Entretanto, a inspeção com a câmara UV fornece apenas informações acerca do local onde estão concentradas as descargas corona e uma estimativa da quantidade de fótons emitidos pelo efeito corona (pontos/min).

Informações a respeito da intensidade do campo elétrico que causa o corona são importantes para se poder avaliar a possibilidade de ruptura do isolamento. Assim, quantificar o corona e determinar os seus níveis na eminência de ruptura do isolamento de uma linha de transmissão é essencial, mas não é suficiente para diagnosticar a condição de operacionalidade dos isoladores. Correlacionar uma técnica de diagnóstico consolidada em laboratório, como a medição de descargas parciais (DP), com uma técnica aplicável em campo e não invasiva traria muitos benefícios à manutenção do sistema elétrico.

A medição de descarga parcial em equipamentos elétricos é um método comprovadamente eficiente no diagnóstico do estado de degradação dos isolamentos elétricos. Ela tem sido utilizada de forma eficiente em laboratório. A realização de medições de DP em

campo tem sido buscadas, contudo, o seu emprego no diagnóstico das condições operativas de isoladores poliméricos não tem apresentado o sucesso desejado.

Assim, neste trabalho, foram utilizadas imagens detectadas através de uma câmera UV e ensaios de descargas parciais para caracterização e quantificação de padrões de descargas corona em eletrodos de diferentes geometrias. Após a parametrização inicial do sistema de radiação em campos elétricos bem definidos (eletrodos), realizaram-se ensaios com isoladores poliméricos, classe 72,5 kV.

Isoladores sem defeito, envelhecido, com defeitos conhecidos e com diferentes níveis de poluição foram analisados através da câmera UV e de um detector digital de DP. O intuito é diagnosticar isoladores defeituosos ou na iminência de falhas, correlacionando níveis de descargas corona (contagem de pontos/min e concentração de píxeis das imagens UV) com sinais de descargas parciais.

## **1.1. Objetivo Geral**

Correlacionar níveis de descargas parciais com níveis de corona apresentados por eletrodos e isoladores poliméricos. A correlação será utilizada na quantificação do corona para diagnóstico das condições de operacionalidade dos isoladores poliméricos.

## **1.2. Objetivos Específicos**

Criar um mecanismo de detecção de defeitos ou situações de riscos por ruptura externa em isoladores.

Quantificar os níveis de corona apresentados por isoladores:

- ✓ com defeitos conhecidos;
- ✓ com diferentes níveis de poluição.

Aplicar técnicas de processamento de imagens com o intuito da minimização de níveis de ruídos nas imagens captadas pela câmara de ultravioleta.

O resultado prático será quantificar o efeito corona e a sua correlação com o grau de deterioração dos isoladores poliméricos. Assim, pretende-se desenvolver uma técnica não invasiva de diagnóstico de isoladores no campo.

A seguir serão apresentadas as etapas de organização do trabalho.

### 1.3. Organização do Trabalho

Com o intuito de obter os objetivos propostos, o trabalho está organizado conforme a seguinte estrutura:

- ✓ No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica, abordando alguns conceitos básicos sobre o efeito corona, seu processo de formação e suas consequências, além da detecção da radiação UV emitida pelo corona. Conceitos de descargas parciais serão apresentados incluindo a topologia do modelo estudado. Ainda nesse capítulo, um breve histórico sobre isoladores poliméricos, suas vantagens e desvantagens, serão apresentados. Em seguida, técnicas de processamento de imagens e suas etapas serão abordadas. Finalmente, o estado da arte será apresentado com resumos de artigos, dissertações e o uso da câmera ultravioleta como instrumento de análise e diagnóstico de isoladores poliméricos;
- ✓ No Capítulo 3 serão apresentados os materiais e métodos utilizados nos experimentos com câmera UV e na detecção de descargas parciais, além da descrição do processamento de imagens UV proposto;
- ✓ No Capítulo 4 serão apresentados, em detalhes, os resultados e análises dos experimentos realizados em laboratório. Experimentos com eletrodos de diferentes geometrias e isoladores poliméricos com diferentes níveis de poluição serão apresentados, abordando a quantificação do corona e a detecção de isoladores poliméricos defeituosos ou na iminência de falhar;
- ✓ No Capítulo 5, conclusões e trabalhos futuros extraídos desta dissertação serão apresentados.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo será dedicado ao estudo do fenômeno chamado efeito corona e suas consequências aos isolamentos elétricos. Em seguida, serão apresentados os conceitos básicos de descargas parciais, isoladores poliméricos, processamento de imagens e, por fim o estado da arte.

### 2.1. O Efeito Corona

As descargas corona ocorrem, no ar, quando a energia do campo elétrico ultrapassa a energia de ionização de um gás isolante. O corona gera ondas de ultra-som, radiação ultravioleta, ozônio, erosão mecânica da superfície dos materiais, ondas eletromagnéticas na faixa de rádio recepção, entre outros fenômenos (BARTNIKAS et al., 1979). Ele provoca a degradação de estruturas metálicas e principalmente de isolamentos orgânicos, tais como os isoladores poliméricos. Presente nos sistemas elétricos, o corona pode ser visto como um indicativo da vida útil dos equipamentos (degradação dos equipamentos) e da confiabilidade dos sistemas elétricos (descargas superficiais se iniciam com o corona de grande intensidade).

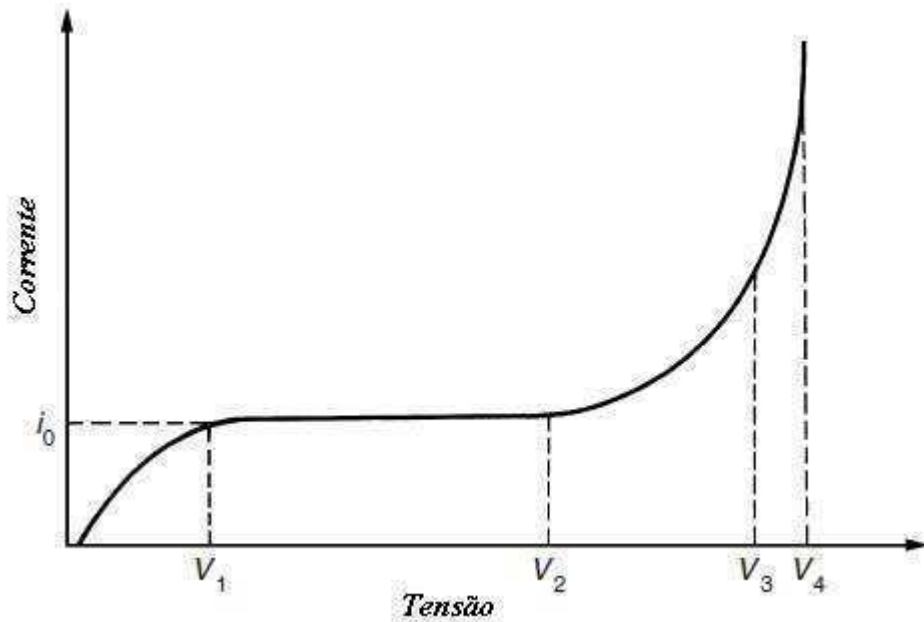
Os gases em condições normais de temperatura e pressão (CNTP) são materiais isolantes e a ocorrência do efeito corona se dá pelo processo de ionização dos átomos e moléculas constituintes, nas adjacências de um eletrodo de alta tensão formando pontos luminosos, ruídos audíveis e a formação de novos gases, em geral corrosivos, que agredem a estrutura física dos equipamentos elétricos.

#### 2.1.1. Processo de formação do efeito corona

A formação do efeito corona é explicada pelos mecanismos de descargas em gases, em especial, pelo processo de avalanche eletrônica descrito por Townsend (GOLDMAN et al., 1992). O mecanismo pode ser explicado pela descrição do comportamento da curva corrente *versus* tensão durante o processo de ionização do gás confinado entre dois eletrodos energizados, conforme pode ser visto na Figura 2.1.

Na região entre a origem do eixo cartesiano e a tensão  $V_I$ , a corrente aumenta na mesma proporção da tensão aplicada nos eletrodos até atingir um patamar de estabilidade no em torno do valor  $i_0$ . Neste momento do processo, na ausência de tensão, ocorre a liberação de elétrons por fotoemissão ou por fotoionização através de radiações incidentes nos catodos e no gás, respectivamente. O equilíbrio entre as quantidades de elétrons livres e de íons

positivos é dado pela recombinação dessas partículas carregadas formando as partículas neutras. Quando submetidos a uma elevação gradual de tensão elétrica, essas partículas, e outras que são geradas devido à tensão aplicada, são aceleradas, elétrons em direção ao anodo e íons positivos em direção ao catodo, diminuindo as recombinações e se estabelecendo uma corrente elétrica crescente diretamente proporcional à tensão aplicada até o nível  $i_0$ .



**Figura 2.1. Tensão versus corrente no processo de ionização de um gás (GOLDMAN et al., 1992).**

Na etapa seguinte do processo, observa-se uma invariância da corrente com a tensão, como pode ser visto na região compreendida entre as tensões  $V_1$  e  $V_2$ . Neste momento, o número de recombinações é mínimo e praticamente todos os elétrons produzidos no anodo chegam ao catodo, sendo assim, mesmo com o aumento da tensão aplicada a corrente mantém-se constante e igual a  $i_0$ .

A partir da tensão  $V_2$ , a corrente no gás começa a variar com a variação da tensão. Esta região é conhecida pela denominação de Descarga de Townsend e caracterizada pela ocorrência de colisões entre as partículas dentro do espaço gasoso. Com o aumento da tensão elétrica aplicada, as partículas são aceleradas ainda mais e sua energia cinética passa a ser suficiente para, quando do momento de uma colisão com uma partícula neutra, promover a liberação de elétrons e conseqüentemente, a formação de um íon positivo ou o aumento da sua carga positiva.

O resultado disso é um considerável aumento na corrente elétrica até a ruptura do meio dielétrico, isto é, a ocorrência de uma descarga elétrica. Este processo é chamado de ionização por colisão e é ilustrado na Figura 2.2 abaixo.

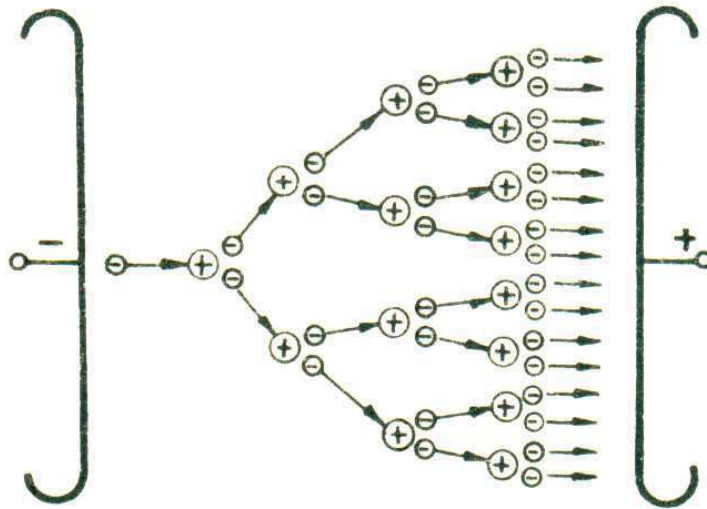


Figura 2.2. Processo de ionização por colisão (ARORA et al., 1995).

O número de colisões ionizantes produzido por um elétron se movendo na direção do campo elétrico por unidade de comprimento é quantizado por Townsend por meio de um coeficiente. O chamado coeficiente de ionização ou primeiro coeficiente de Townsend,  $\alpha$  varia com o tipo de gás, com sua pressão, com a umidade e com a intensidade do campo elétrico aplicado. A partir deste coeficiente é possível determinar a corrente de ionização por meio da Equação 2.1 (KUFFEL et al., 2000), onde  $I_0$  é a corrente inicial que deixa o catodo,  $\alpha$  é o coeficiente de ionização e  $d$  é a distância entre o catodo e o anodo.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.1)$$

Após o processo de liberação dos elétrons, as partículas podem capturar elétrons e se tornarem carregadas negativamente. As partículas negativas também são consideradas na corrente de ionização e o número de captura ocorridas no caminho de um elétron do catodo ao anodo por unidade de comprimento é definido pelo coeficiente de ligação  $\eta$ . Desta maneira é definido o coeficiente de ionização efetivo, dado pela diferença entre o primeiro coeficiente de Townsend,  $\alpha$  e o coeficiente de ligação  $\eta$ .

$$\alpha' = \alpha - \eta \quad (2.2)$$

Na região compreendida entre as tensões  $V_3$  e  $V_4$  percebe-se um crescimento acentuado da corrente em função de uma pequena variação da tensão (Figura 2.1). Para que isto ocorra é necessário que haja uma maior quantidade de elétrons circulando no meio gasoso. O equacionamento inicial de Townsend não explica este fenômeno. Assim, Townsend necessitou formular um novo mecanismo para explicar o fenômeno, que foi denominado de emissão secundária de Townsend. O segundo mecanismo de emissão se dá pelo bombardeamento do catodo por íons positivos, partículas neutras (metaestáveis), ou por fótons. A relação entre o número de elétrons gerados no catodo devido a efeitos secundários e o número de partículas incidentes no catodo define o segundo coeficiente de ionização de Townsend,  $\gamma$ . Sendo assim, a corrente de ionização passa a ser expressa pela Equação 2.3.

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.3)$$

Fazendo o denominador da Equação 2.3 tender a zero obtém-se a condição de ruptura.

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.4)$$

Segundo a Equação 2.4, a descarga é auto-sustentada quando igual a 1, cresce rapidamente quando maior que 1 e a mesma não é auto-sustentada quando menor que 1.

### 2.1.2. Consequências do efeito corona

Várias são as consequências negativas para os equipamentos do sistema elétrico devido à presença do corona. Dentre elas destacam-se:

- ✓ Perdas de energia por propagação do calor devido às descargas;
- ✓ Erosão mecânica devido ao bombardeamento das partículas durante processo de ionização do ar;
- ✓ Interferências em sistemas de medição, controle e comunicação;
- ✓ Radiação ultravioleta;
- ✓ Ruído em áudio e ultrassônico;
- ✓ Presença de possíveis falhas no material de que foi construído o equipamento;
- ✓ Formação de ácido nítrico na presença da umidade e de outros gases nocivos à saúde humana e, prejudiciais aos equipamentos elétricos pelo seu caráter corrosivo como, por exemplo, o ozônio;

Dentre os efeitos nocivos aos isolamentos elétricos, a radiação ultravioleta é alvo de diversos estudos. Existem câmeras no mercado capazes de detectar o corona proveniente da radiação UV.

### 2.1.3. Detector de Radiação Ultravioleta

O espectro eletromagnético é o intervalo completo da radiação eletromagnética. As radiações eletromagnéticas cobrem uma ampla faixa de frequência e de comprimento de ondas, os quais servem de parâmetros para a divisão do espectro em diferentes categorias. Existem as ondas longas, de comprimentos de onda da ordem de 1 cm a  $10^3$  cm, as microondas que possuem comprimentos de ondas menores, em torno de  $10^2$  cm, ambas utilizadas em comunicações. As ondas da região visível apresentam-se em estreita faixa do espectro e possuem comprimentos de onda na ordem de  $10^6$  cm. A Figura 2.3 ilustra o espectro eletromagnético.

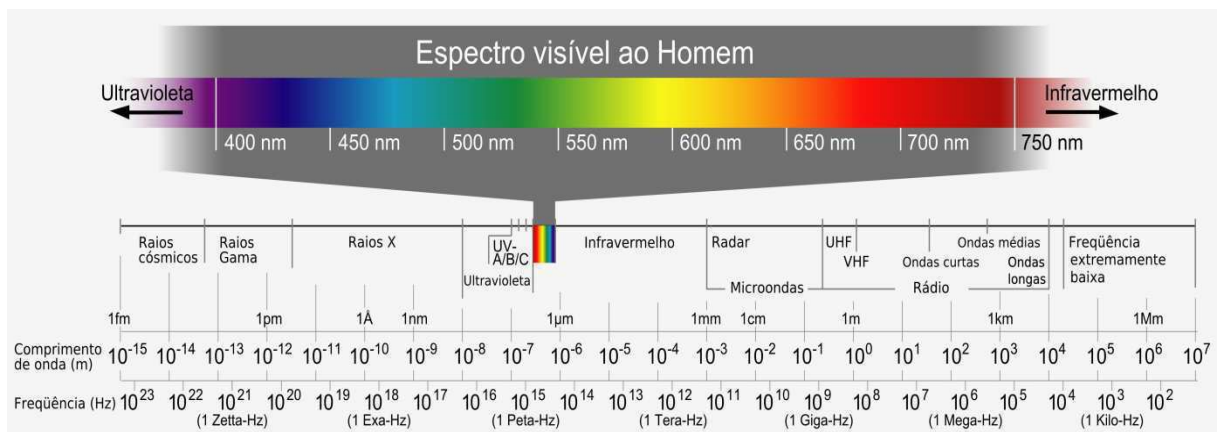


Figura 2.3. Espectro Eletromagnético.

Já o efeito corona emite luz, principalmente na faixa de comprimentos de onda correspondente à radiação ultravioleta, que varia entre 200 nm e 400 nm. Sendo assim, a caracterização por imageamento espectral objetiva a exploração de ondas com comprimentos na faixa do ultravioleta, entre 200 nm e 280 nm, bem como na faixa da radiação visível que corresponde a comprimentos entre 400 nm até 700 nm (TIPLER, 1995).

Todavia, a radiação solar possui comprimentos de onda a partir de 280 nm o que a faz sobrepor-se a radiação característica do corona dificultando a identificação do efeito. Devido a esta condição, o equipamento utilizado na detecção do efeito corona deve possuir filtros que rejeitem ondas com comprimentos de onda acima de 280 nm (curva preta no gráfico da

Figura 2.4), permitindo assim, que sejam tratados apenas sinais referentes ao corona (curva azul no gráfico da Figura 2.4).

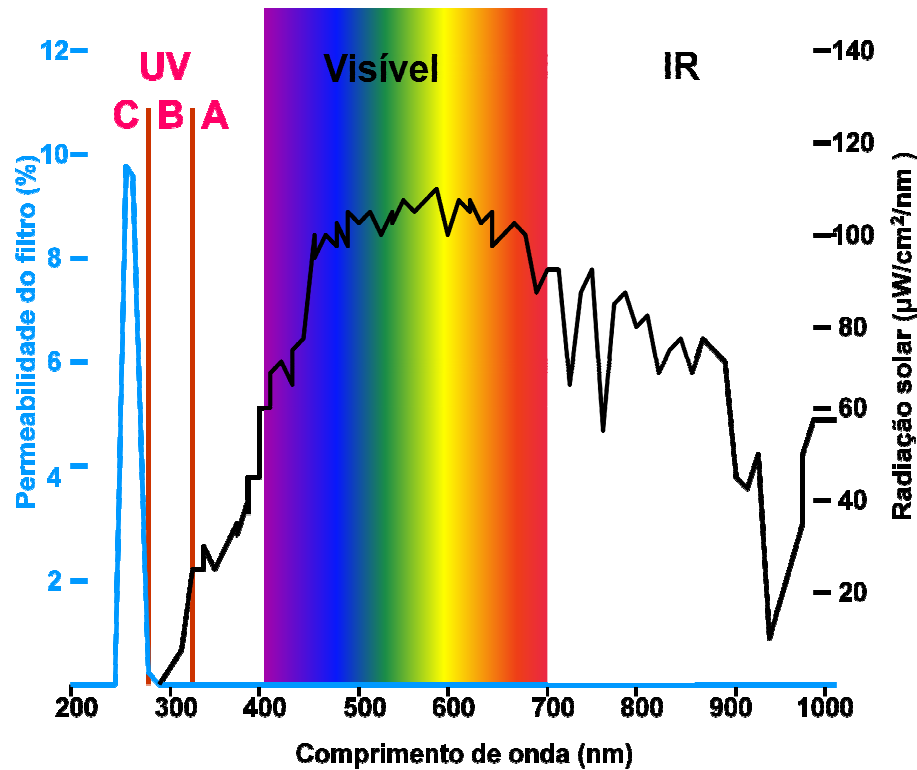
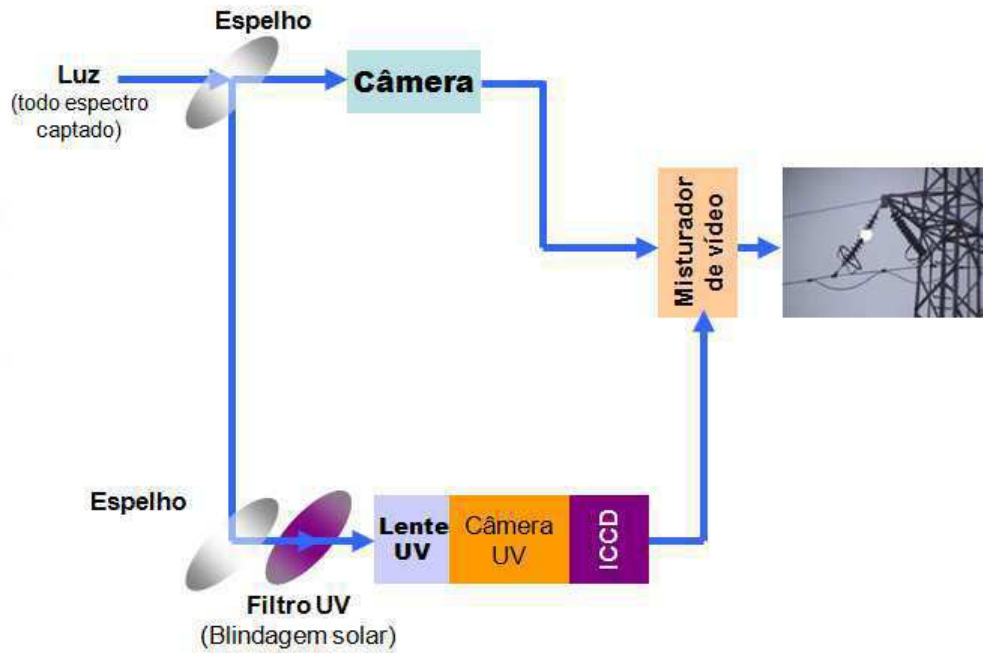


Figura 2.4. Comprimento de onda e radiação solar versus transmissão do filtro do detector (LINDNER, 2004).

O detector de corona capta radiação de 240 até 280 nm, apesar de ser uma faixa em que a intensidade da emissão é relativamente menor que na faixa de 280 a 400 nm. Na faixa de 240 a 280 nm a radiação solar não consegue atingir a superfície da terra, devido à camada de ozônio. Assim, o detector pode captar descargas corona durante o dia (LINDNER et al, 1999).

Na Figura 2.5 é possível observar o esquema de funcionamento do detector de radiação ultravioleta.



**Figura 2.5. Princípio de funcionamento do detector UV (LINDNER, 2004).**

As câmeras são alinhadas para que registrem a mesma imagem e gerem dois sinais de vídeo (PAL ou NTSC). Os sinais podem ser exibidos separadamente ou de forma composta, permitindo a perfeita localização do ponto onde ocorre o corona (LINDNER et al., 1999).

A câmera UV ou detector de corona possui uma detecção mínima de descarga de 1,5 a 2 pC para uma distância de 8 metros. O equipamento pode ser utilizado para medir descargas de corona a uma distância de 3 a 100 m, com boa relação sinal-ruído (LINDNER et al., 1999).

O detector de corona dispõe de um sistema de contagem de ocorrências de descargas (fótons emitidos devido à radiação UV), podendo quantificar a intensidade de descargas corona em uma determinada região em números de pontos de descarga por minuto. Ele possibilita a variação do ganho UV de 0 a 250 em passos de 10. O aumento do ganho melhora a detecção da radiação ultravioleta, porém amplifica os ruídos ambientes. A variação do ganho UV e a distância ao ponto de observação altera, consideravelmente, os resultados obtidos. Deste modo, torna-se necessária a fixação destes dois parâmetros para realização de análises comparativas para um mesmo lote de amostras ensaiadas.

No próximo item serão abordados os conceitos de descargas parciais visando correlacioná-los com os dados provenientes do detector de radiação ultravioleta.

## **2.2. Descargas parciais**

Descargas parciais são descargas elétricas, na ordem de nano segundo, que curto circuitam parcialmente a isolação (COSTA et al., 1996). Estas descargas podem aparecer em cavidades gasosas, em meio isolante sólido ou líquido, ou ao longo de uma superfície ao redor de pontas. As descargas parciais em gases, em torno de um condutor, são conhecidas como descarga corona.

As descargas parciais são decorrentes da ionização de uma determinada região do dielétrico. A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende do formato do eletrodo, das características do dielétrico e da tensão aplicada.

Existem basicamente dois tipos de análise para identificar a natureza da descarga parcial. O primeiro tipo de análise leva em consideração a fase da descarga, que é a localização da descarga em relação à senóide da alimentação. O segundo tipo de análise leva em consideração parâmetros temporais dos sinais de descarga parcial tais como: tempo de frente da onda e duração da descarga.

A fase da descarga, juntamente com informações adicionais como a tensão de iniciação e extinção da descarga podem fornecer subsídios para a caracterização do sinal como descarga parcial ou ruído. No caso do corona (descargas parciais em gases), os sinais de descargas concentram-se no pico de tensão positivo (corona no lado do terra) ou no pico de tensão negativo (corona no lado de alta tensão) da senóide (NATTRASS, 1988) e (BARTNIKAS et al., 1979).

### **2.2.1. Modelo**

A topologia estudada (TETEX, 1984) pode ser observada através do circuito elétrico equivalente da Figura 2.6.



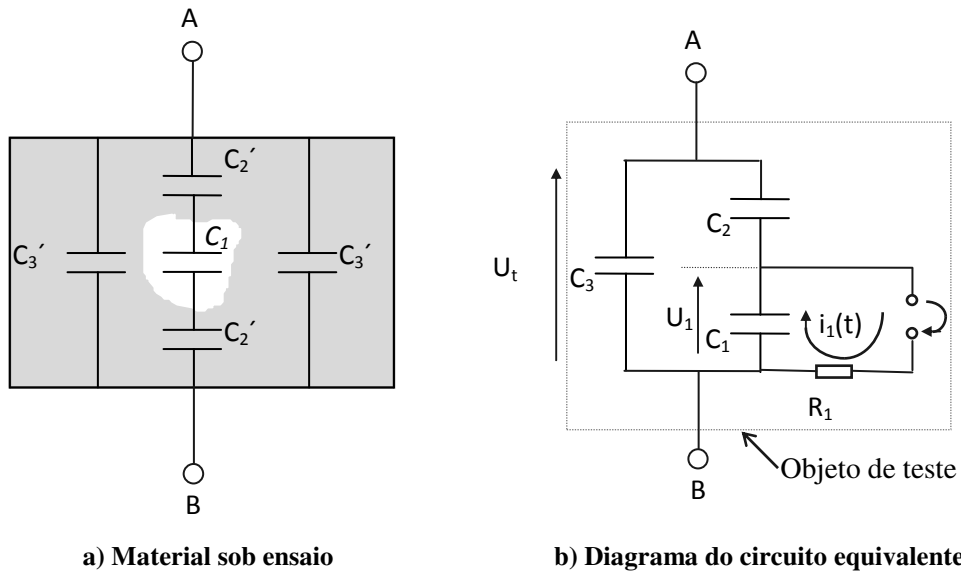


Figura 2.6. Processo de descargas parciais em um dielétrico (COSTA et al., 1996).

No circuito equivalente,  $C_1$  representa a capacitância da cavidade do dielétrico,  $C_2 = C_2'/2$  representa a capacitância do material que está em série com a cavidade e,  $C_3 = 2C_3'$  representa a associação das capacitâncias do resto do material.  $R_1$  é a resistência do arco elétrico (descarga).

A Figura 2.7 ilustra as formas de onda aplicadas à amostra. A tensão da fonte de alimentação é representada por  $U_i(t)$ .  $U(t)$  é a forma de onda da tensão aparente na cavidade (isto, se ela não existisse) e  $U^+$  ( $U$ ) a tensão disruptiva da cavidade.  $V^+$  ( $V^-$ ) é a tensão residual na cavidade após a descarga.

Quando a tensão  $U(t)$  atinge o valor de  $U^+$ , ocorre uma descarga na cavidade reduzindo a tensão para  $V^+$ . O fenômeno pode se repetir várias vezes durante cada ciclo. A duração da descarga é da ordem de  $10^{-7}$  s, sendo um tempo curto comparado com o período da onda de 60 Hz.

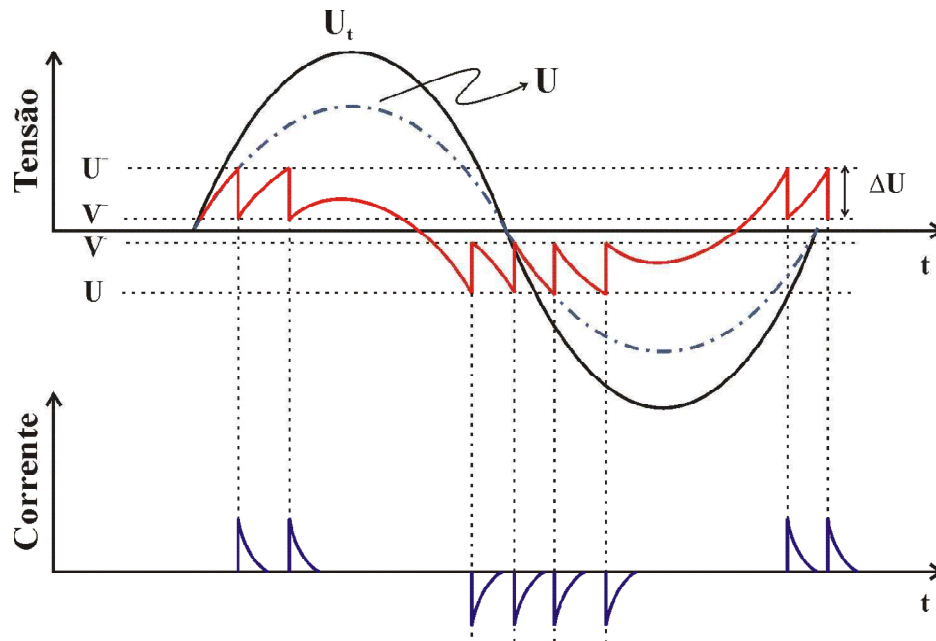


Figura 2.7. Processo de descargas parciais em um dielétrico (COSTA et al., 1996).

No próximo item serão abordados conceitos de isoladores poliméricos, suas vantagens e desvantagens, além dos seus aspectos físicos.

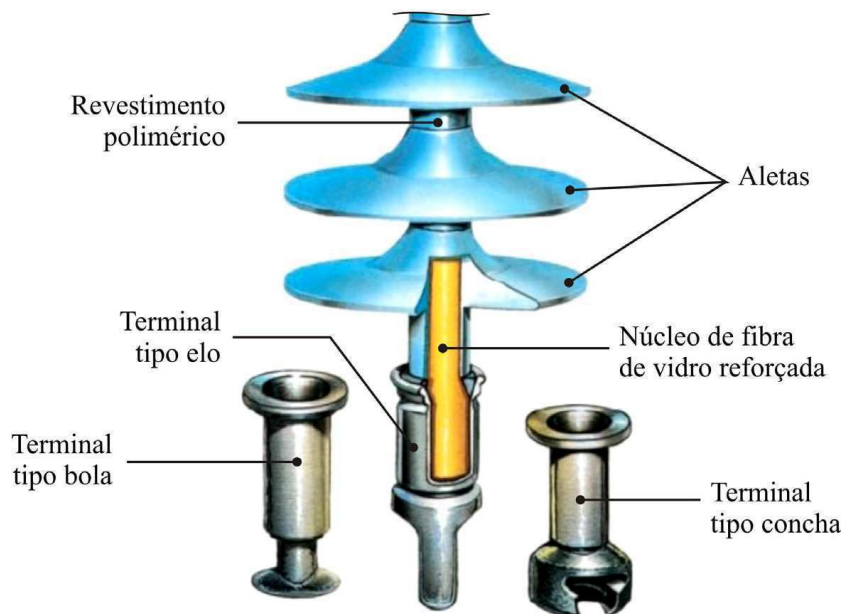
### 2.3. Isoladores Poliméricos

Os isolantes poliméricos começaram a ser utilizados na década de 1980, quando surgiu a primeira versão comercial de isoladores poliméricos para linha de transmissão (HALL, 1993). Desde então, o uso de isoladores poliméricos vem aumentando devido as suas diversas vantagens sobre os isoladores de porcelana ou vidro. As três principais vantagens, apontadas pelas empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica, em uma pesquisa realizada por (KIKUCHI et al., 1999), são a sua fácil instalação, seu peso reduzido e sua inibição aos atos de vandalismo.

Entretanto, os isoladores poliméricos também possuem desvantagens em relação aos isoladores de porcelana ou vidro. Eles, muitas vezes, não apresentam, aparentemente, indícios de que houve uma falha interna (HACKAM, 1999), dificultando a identificação por uma inspeção feita do solo. Seu desempenho em longo prazo não é conhecido, tornando-se difícil avaliar a expectativa de vida do isolador. Além disso, eles estão sujeitos a alterações químicas em seu revestimento, devido às condições ambientais ou a formação de arcs voltaicos em sua superfície.

Atualmente, as inspeções realizadas em isoladores poliméricos, muitas vezes, não conseguem identificar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. Pesquisadores em diversas partes do mundo buscam desenvolver técnicas mais eficazes para detectar isoladores poliméricos defeituosos ou na iminência de falha.

Os isoladores poliméricos são constituídos por três elementos principais: núcleo de fibra de vidro, revestimento de borracha e ferragens terminais. Na Figura 2.8 é possível observar o desenho de um isolador polimérico com alguns tipos mais comuns de terminais.



**Figura 2.8. Isolador polimérico (FERREIRA, 2007).**

Um composto especial de borracha é aplicado sobre o núcleo do isolador, com o intuito de protegê-lo contra agentes externos (umidade, contaminadores químicos, radiação ultravioleta, etc). Também fazem parte do revestimento as aletas, encarregadas de suprir as distâncias elétricas de escoamento necessárias para um bom desempenho nas condições normais de operação.

As ferragens terminais são os componentes metálicos do isolador, cuja função é transmitir ao núcleo os esforços mecânicos do condutor, fazendo as interligações condutor/isolador e isolador/estrutura. O formato da ferragem também é importante para equalizar o campo elétrico em torno do mesmo, evitando possíveis descargas corona ou estresse elétrico no material. Porém, quando umidade relativa é maior que 75 %, existe uma grande chance da poluição depositada na superfície do isolador formar uma superfície condutora e, conseqüentemente resultar em correntes de fuga (VOSLOO et al., 2006). Estas

vão gerar estresses no material polimérico, acelerando sua degradação e o aparecimento do efeito corona.

O efeito corona captado através de câmera UV (imagens UV) deve ser utilizado no processamento de imagens para extração de informações acerca da concentração de píxeis relativo ao corona.

## **2.4. Processamento de Imagens**

O processamento de imagens é uma subárea de grande relevância do Processamento de Sinais. As imagens, tal como os sinais, consistem em suportes físicos para uma determinada informação que pode ser uma medida, para o caso de sinais que representam fenômenos físicos. Neste caso, as imagens contêm atributos ou informações relacionadas à localização e concentração do efeito corona em eletrodos e isoladores poliméricos.

De maneira geral, o processamento de imagens está associado com a análise das informações nela contida, na busca de informações quantitativas que representem o fenômeno estudado. Existem duas técnicas de exploração desta informação (ALBUQUERQUE, 2010):

- ✓ Análise: Utilização de medidas quantitativas para descrição da informação dentro de uma imagem. Esta parte também é chamada de parametrização.
- ✓ Image Enhancement: Esta técnica está associada à melhoria na qualidade da imagem para um posterior julgamento por parte de um observador. Trabalha-se aqui com níveis de cinza para aumentar ou diminuir o contraste ou para evidenciar determinadas regiões de interesse.

Alguns conceitos relevantes ao processamento de imagens são descritos a seguir:

- ✓ ***Pixel***

O pixel é o elemento básico de uma imagem digital possuindo, comumente, a forma retangular ou quadrada e de dimensões finitas. A organização de uma imagem sob a forma de uma matriz quadrada de pixel se deve a facilidade da implementação eletrônica tanto de seu sistema de aquisição como de seu sistema de visualização.

- ✓ ***Região de Interesse***

Região definida a partir de parâmetros obtidos na própria imagem ou pelo usuário onde o processamento estará totalmente concentrado. Da mesma forma como em qualquer

caso de processamento de imagem, ao se delimitar uma região de interesse, têm-se problemas no tratamento das bordas da imagem cuja solução é completamente dependente do problema associado ao processamento da imagem.

### 2.4.1. Etapas do Processamento

O sistema de processamento de imagens é subdividido em várias etapas, tais como: formação e aquisição, digitalização, pré-processamento, segmentação, pós-processamento, extração de atributos e, classificação e reconhecimento (ALBUQUERQUE, 2010). A Figura 2.9 apresenta um diagrama esquemático das etapas do processamento de imagem.

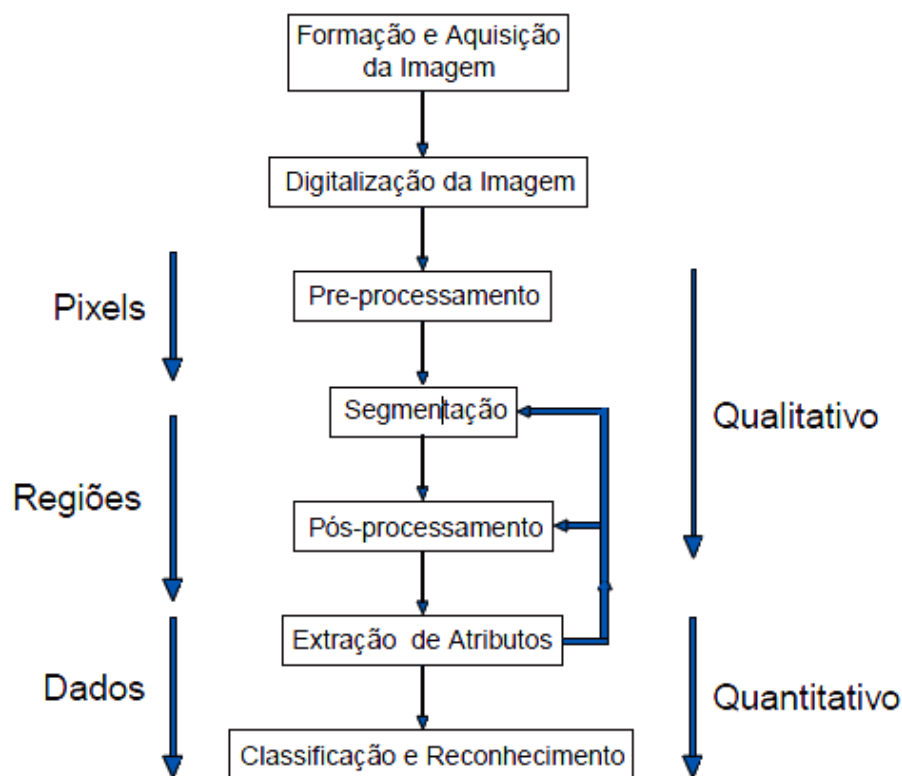


Figura 2.9. Etapas do processamento de imagens.

#### ✓ *Aquisição de Imagens Digitais*

Para a formação e digitalização de imagens são necessários dois elementos. O primeiro é um captador de imagem, um dispositivo físico sensível ao espectro de energia eletromagnético, como por exemplo, ao espectro de raios-X, luz ultravioleta, visível ou infravermelha. A saída do dispositivo deve produzir um sinal elétrico proporcional ao nível de energia percebido. O segundo dispositivo é um digitalizador que converte o sinal elétrico analógico da saída do captador em um sinal digital.

### ✓ *Técnicas de Pré-Processamento*

As técnicas de pré-processamento têm como principal função melhorar a qualidade da imagem. Para tanto, existem duas grandes categorias de métodos, uma que opera no domínio espacial com filtros que agem sobre o plano da imagem e outra que opera no domínio da frequência com filtros que agem sobre o espectro da imagem.

### ✓ *Segmentação*

A segmentação é um processo adaptativo, sendo necessário sempre se adequar às características particulares de cada tipo de imagem a ser processada e por isso, não se tem um modelo formal de segmentação de uma imagem. As técnicas de segmentação utilizam duas abordagens principais. A primeira é a similaridade entre os píxeis onde a mais importante é a binarização, que se utiliza das amplitudes dos níveis de cinza para caracterizar os objetos presentes na imagem. A segunda abordagem é baseada na descontinuidade entre os píxeis, onde são procuradas as variações abruptas do nível de luminância entre os píxeis vizinhos. A técnica de segmentação baseada na descontinuidade entre os píxeis mais utilizada é chamada de detecção por bordas.

### ✓ *Pós-processamento*

Nesta etapa os principais defeitos ou imperfeições da etapa anterior são corrigidos. As correções são feitas através de técnicas de Morfologia Matemática com aplicação de filtros morfológicos que analisam quantitativamente os píxeis da imagem. A Morfologia Matemática é uma das grandes áreas do processamento digital de imagens. Fundamentalmente, têm-se duas linhas de descrição de seus métodos, os operadores booleanos de conjuntos (união, interseção, complemento, etc.) e a noção de forma básica chamada de elemento estruturante.

### ✓ *Extração de Atributos*

Nesta etapa é realizada a extração de informações úteis da imagem processada. Uma etapa intermediária na extração de atributos chamada de Labelização ou Rotulação merece destaque. Após a segmentação a imagem está separada em regiões de objetos e de fundo. As regiões de interesse estão contiguamente agrupadas por píxeis que se tocam.

A ação seguinte é rotular ou dar o Label para cada um dos grupos de píxeis, a fim de facilitar posteriormente a parametrização dos objetos segmentados através do cálculo de área, perímetro, entre outros.

### ✓ *Classificação e Reconhecimento*

O objetivo da classificação e reconhecimento é automatizar a identificação dos objetos segmentados na imagem. Têm-se duas subdivisões no processo de classificação de formas: o aprendizado e o reconhecimento propriamente dito.

Assim, seguindo as etapas citadas anteriormente, as imagens UV devem ser processadas para identificação e extração de atributos das regiões de concentração do efeito corona.

## **2.5. Estado da Arte**

O desenvolvimento de técnicas eficazes na detecção de falhas em isoladores poliméricos não é simples. Não existe ainda um consenso sobre quais níveis de corona são aceitáveis ou não, visando retirar ou manter um isolador em operação no sistema elétrico. Dessa forma, diversos centros de pesquisa buscam estudar o efeito corona e desenvolver um método não invasivo de inspeção de isoladores poliméricos.

Neste contexto, alguns trabalhos serão abordados para situar o leitor sobre técnicas de inspeção de isoladores poliméricos.

Em 2002, PINNANGUDI *et al.* propuseram a quantificação da energia associada com descargas corona na superfície de isoladores sob uma variedade de condições atmosféricas. Técnicas de processamento de imagens são utilizadas para medir o brilho das descargas em termos de níveis de iluminação de píxeis (PINNANGUDI *et al.*, 2002).

Em 2005, NERI avaliou técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. As técnicas avaliadas fazem uso da medição de descargas parciais, em laboratório, da radiação ultravioleta emitida pelas descargas corona, e da radiação infravermelha, emitida pelos corpos aquecidos. A inspeção de isoladores poliméricos associando os detectores de corona e infravermelho é uma técnica promissora para detecção de isoladores defeituosos, entretanto é necessário confirmar a eficácia da técnica em situações reais (NERI, 2004).

Em 2007, FERREIRA estudou o mecanismo de trilhamento de núcleo e os seus fatores predominantes, incluindo a geração de calor e o campo elétrico nas regiões de interesse do isolador. Foram utilizados uma câmera de radiação ultravioleta e um termovisor para inspecionar os níveis de descargas corona nas proximidades do isolador e as temperaturas

superficiais no mesmo. Foi observado que os anéis equalizadores influenciam os padrões térmicos e de descarga corona. Um anel equalizador otimizado para aplicação em isoladores poliméricos classe 230 kV foi projetado, visando prolongar a vida útil dos isoladores (FERREIRA, 2007).

Em 2008, GIANELLI avaliou o emprego da tecnologia de câmera ultravioleta no processo e caracterização de falhas em isoladores poliméricos, em regime de linha viva com tensões não superiores a 69 kV. Segundo o autor, para um melhor funcionamento do equipamento, fez necessário operá-lo sobre baixas temperaturas ambientes, inferiores a 29°C, e alta umidade relativa do ar, acima de 75% (GIANELLI, 2008).

Em 2009, SOUZA estudou modelos de predição de corona presentes na literatura. Testes foram realizados em arranjos do tipo ponta-plano e em isoladores poliméricos, onde se investigou a tensão de início de corona e o campo crítico associado a esta. Para os isoladores foram observadas presença de “defeitos” na superfície e, a distribuição de campo elétrico foi verificada através de simulações computacionais. Em seguida foi proposto um modelo de predição da tensão de início de corona, baseado no Fator de Eficiência de Campo e no modelo de Peek (SOUZA, 2009).

Em 2009, WENJUN *et al.* realizaram uma plataforma de medição e análise de descarga corona combinando uma câmera de corona (CoroCAM IV+) com um ambiente de programação (LabView 8.0). A porcentagem da área da imagem UV captada, relativa à zona de descarga, é caracterizada como parâmetro para quantificação do efeito corona. Experimentos foram realizados com uma haste-plano. As investigações experimentais consistiram em duas partes: imagens de descargas UV com diferentes espaçamentos (gaps) para um mesmo ponto de observação; e mesmo espaçamento para diferentes distâncias de observação (WENJUN *et al.*, 2009).

Na Tabela 2.1, um resumo dos trabalhos descritos anteriormente é apresentado:



Tabela 2.1. Técnicas de monitoramento de isolamentos baseadas em UV, DP e Processamento de Imagens.

Ano	Pesquisadores	Contribuição	DP <sup>a</sup>	UV <sup>β</sup>	PI <sup>γ</sup>	IP <sup>μ</sup>
2002	Pinnangudi <i>et al.</i>	Quantificaram a energia corona associada à superfície de isoladores sob diversas condições atmosféricas.		●	●	●
2004	Neri	Avaliou técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar.	●	●		●
2007	Ferreira	Estudou o mecanismo de trilhamento de núcleo e os seus fatores predominantes, incluindo a geração de calor e o campo elétrico nas regiões de interesse do isolador.	●	●		●
2008	Gianelli	Avaliou o emprego da tecnologia de câmeras ultravioleta no processo e caracterização de falhas em isoladores poliméricos.		●		●
2009	Souza	Estudou modelos de predição de corona e realizou ensaios em arranjos ponta-plano e isoladores.				●
2009	Wenjun <i>et al.</i>	Realizaram uma plataforma de medição e análise de descarga corona combinando uma câmera de corona (CoroCAM IV+) com um ambiente de programação.		●	●	●
2011	Barros	Realizou medições com câmera UV e processamento de imagens, correlacionando-os com ensaios de DP na quantificação do corona em eletrodos e diagnóstico de isoladores poliméricos.	●	●	●	●

<sup>a</sup> Realizaram ensaios de descargas parciais.

<sup>β</sup> Empregaram câmera ultravioleta.

<sup>γ</sup> Empregaram processamento de imagens.

<sup>μ</sup> Utilizaram isoladores poliméricos.

O próximo capítulo será dedicado aos materiais e métodos utilizados para medições de corona e descargas parciais em eletrodos e isoladores poliméricos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de quantificar o efeito corona, ensaios serão realizados utilizando eletrodos de diversas geometrias e isoladores poliméricos. Os ensaios serão monitorados com a câmera UV (captação de vídeos para análises posteriores) e com um detector digital de descargas parciais. Os materiais utilizados nos ensaios e a metodologia empregada serão descritos a seguir.

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Eletrodos

Os eletrodos utilizados nos ensaios são descritos abaixo:

- ✓ Eletrodo com ponta plana, de alumínio e comprimento 50 mm – Tipo I.
- ✓ Eletrodo com ponta arredondada, de bronze e comprimento 50 mm – Tipo II;
- ✓ Eletrodo com ponta fina, de bronze e comprimento 40 mm – Tipo III;

Na Figura 3.1, ilustrada abaixo, são apresentadas fotos de cada um dos eletrodos utilizados.

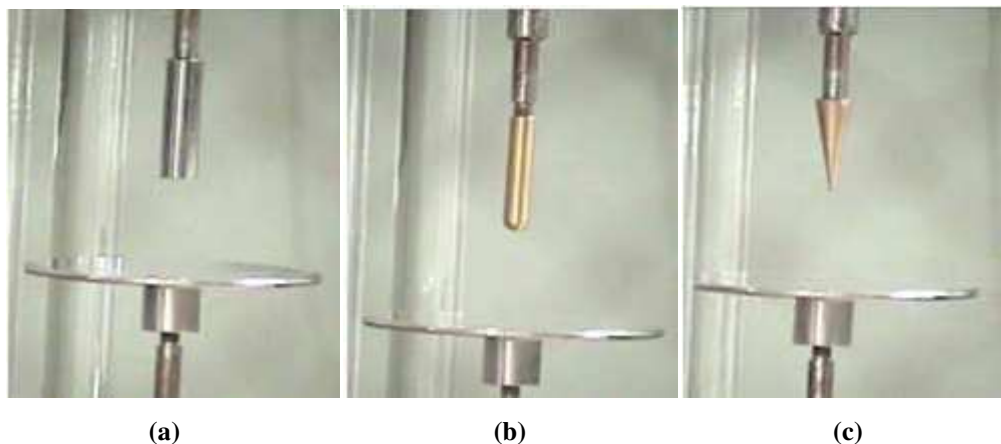


Figura 3.1. (a) Eletrodo com ponta plana – Tipo I; (b) Eletrodo com ponta arredondada – Tipo II; (c) Eletrodo com ponta fina – Tipo III.

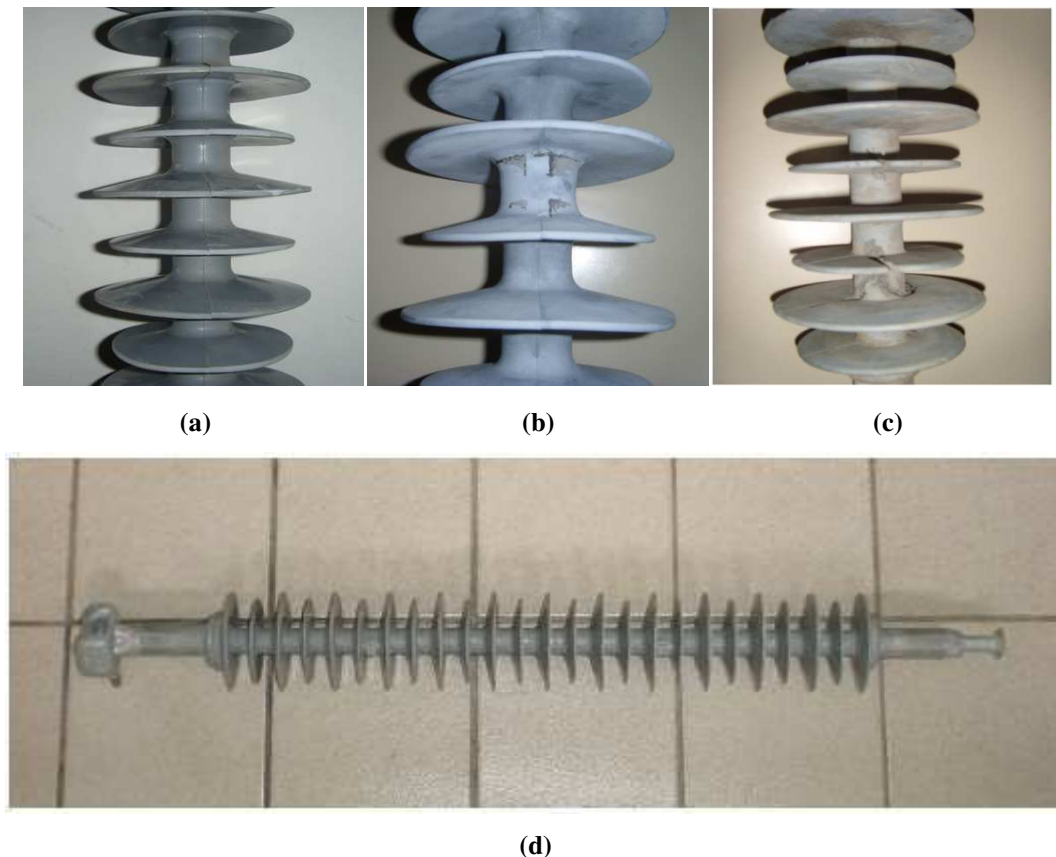
##### 3.1.2. Isoladores Poliméricos – Classe 72,5 kV

Os isoladores poliméricos utilizados nos experimentos são projetados para linhas de transmissão de 69 kV. Os isoladores medem aproximadamente 4 kg e 970 mm de comprimento. Os diâmetros da saia maior, saia menor, núcleo revestido de borracha e núcleo

de fibra de vidro são 100; 90; 27,5 e 16,5 mm, respectivamente. Os terminais dos isoladores são do tipo concha/bola e possuem 25 aletas, como ilustrado na Figura 3.2.

Três unidades foram avaliadas sendo que uma apresenta integridade total (isolador novo e sem defeitos), a qual foi tomada como referência. Os demais isoladores foram retirados do campo e apresentam os seguintes defeitos, respectivamente:

- ✓ Ferrugem e envelhecimento do revestimento;
- ✓ Núcleo e aletas comprometidas devido a descargas.



**Figura 3.2.** (a) Isolador polimérico sem defeitos; (b) Isolador polimérico envelhecido; (c) Isolador polimérico com defeito; (d) Isolador polimérico com 25 aletas, classe 72,5 kV.

### 3.2. Métodos

A detecção do efeito corona (câmera UV) e a medição de descargas parciais para os materiais descritos, anteriormente, serão realizadas simultaneamente.

### 3.2.1. Ensaios com eletrodos

A montagem do circuito de medições de descargas parciais, conforme normas NBR 6940 e IEC 60270, e de detecção do corona é mostrada esquematicamente na Figura 3.3.

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes instrumentos:

- ✓ Mesa de controle;
- ✓ Transformador (10 kVA e tensão até 100 kV);
- ✓ Duas resistências de 282 k $\Omega$  cada;
- ✓ Detector Digital de Descargas Parciais (MDP);
- ✓ Computador portátil contendo o software para amostragem dos sinais de descarga parcial;
- ✓ Capacitor de acoplamento  $C_k$  (1000 pF);
- ✓ Impedância de Medição  $Z_m$ ;
- ✓ Câmera ultravioleta;
- ✓ Câmera digital acoplada à câmera ultravioleta para gravar os vídeos dos ensaios.

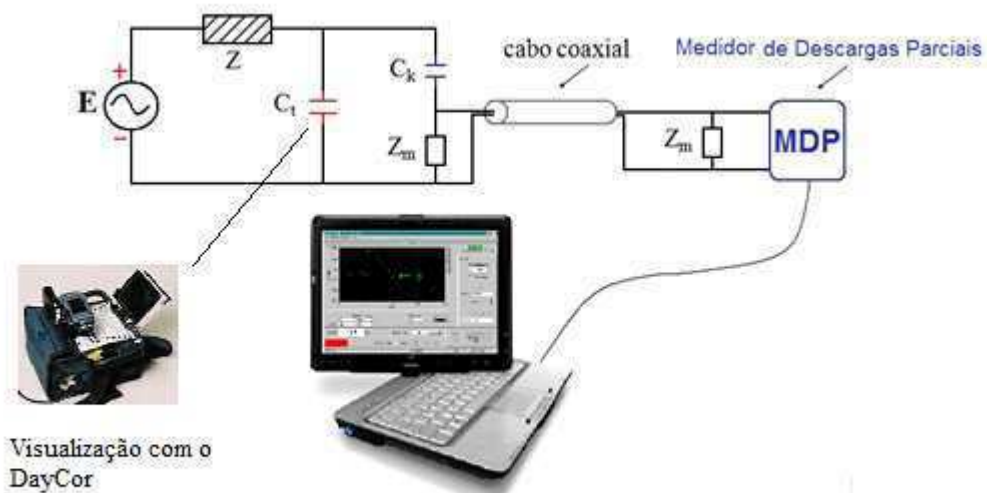


Figura 3.3. Circuito de medição de descargas parciais e de corona.

Para o estudo do efeito corona, serão ensaiados os três tipos de eletrodos com diferentes espaçamentos (gaps), para o arranjo ponta-plano. Os eletrodos estão simbolizados na Figura 3.3 pelo capacitor  $C_i$ . O capacitor de acoplamento  $C_k$ , a impedância de medição  $Z_m$ ,

o cabo coaxial, o medidor de descargas parciais e o computador portátil contendo o software de análise das DP são utilizados apenas para a coleta de dados das descargas parciais.

Os ensaios com eletrodos devem apresentar dois tipos de configurações:

- ✓ Para cada tipo de eletrodo e valor do espaçamento definidos (40, 50 e 60 mm), será aplicada tensão desde a tensão de início da descarga corona até a tensão máxima suportável (eminência de ruptura do ar) com passos de 2 kV. A câmera ultravioleta será mantida a uma distância fixa de 3 m do objeto de teste.
- ✓ Para o eletrodo ponta fina, bronze, será mantido o espaçamento de 40 mm e variar-se-á a distância da câmera ultravioleta para 6 m e, posteriormente, para 9 m do objeto de teste.

As tensões de início de corona e de ruptura do meio dielétrico, para espaçamentos menores que 40 mm, são muito próximas para os eletrodos com pontas planas e arredondadas. Isto dificulta a visualização e crescimento do corona, conforme o aumento da tensão aplicada. Dessa forma, serão escolhidos espaçamentos entre 40 mm e 60 mm.

As distâncias entre a câmera UV e os objetos de teste serão escolhidas, tomando como base as dimensões disponíveis no laboratório de alta tensão, ou seja, no máximo uma distância de 9 m da câmera UV aos eletrodos ensaiados.

O tempo de aplicação da tensão, para cada passo de 2 kV será de 5 minutos. Tempo necessário para estabilização do corona quando visualizado com a câmera UV. Durante o tempo de aplicação da tensão, será feita análise com a câmera ultravioleta (Figura 3.4), para aquisição de vídeos com duração de 15 segundos, divididos da seguinte maneira:

- ✓ 1º Vídeo: primeiros 15 s;
- ✓ 2º Vídeo: 1 min até 1 min e 15 s;
- ✓ 3º Vídeo: 4 min e 45 s até 5 min.

Os vídeos serão divididos em três partes de 15 s cada para facilitar o processamento e estudo do corona em cada caso. Pois, muitas medições serão realizadas para cada tipo de eletrodo, espaçamento do arranjo ponta-plano e distância da câmera ao objeto de teste escolhidos.



**Figura 3.4. Câmera ultravioleta DayCor II®.**

A câmera UV capta vídeos dos ensaios e com o auxílio de uma câmera digital comercial os vídeos serão gravados para posteriormente serem submetidos ao processamento de imagens.

As medições de descargas parciais com o detector digital e descargas corona com a câmera UV serão realizadas simultaneamente. O ganho de 120 para câmera UV deverá ser mantido em todos os ensaios realizados.

### **3.2.2. Ensaio com Isoladores Poliméricos – Transformador em Cascata 600 kV**

Para a realização dos ensaios com isoladores serão utilizados os seguintes instrumentos:

- ✓ Transformador de alta tensão 600 kV;
- ✓ Câmera Ultravioleta;
- ✓ Câmera Digital.

Os isoladores poliméricos, classe 72,5 kV da Figura 3.2, serão submetidos a uma tensão de 40 kV (tensão nominal do isolador), durante 1h. Os ensaios serão realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG.

As amostras serão monitoradas com a câmera UV e vídeos gravados para posteriormente serem analisados. Os isoladores serão colocados a uma distância de 11 metros

do ponto de observação e a uma altura de 8 metros do piso (condições disponíveis em laboratório). Estas distâncias serão utilizadas buscando simular ao máximo o monitoramento real em linhas de transmissão.

### 3.2.3. Ensaios com Isoladores Poliméricos – Diferentes Níveis de Poluição conforme EPRI

As amostras serão preparadas em conformidade com os critérios estabelecidos por EPRI (1975), como mostrado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1. Caracterização dos níveis de poluição segundo EPRI (1975).**

Níveis	Classificação	Faixa de ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )
1	Atmosfera limpa.	0,00 – 0,032
2	Contaminação leve.	0,038 – 0,056
3	Contaminação pesada.	0,056 – 0,123

Onde: ESDD é a Densidade Equivalente de Sal Depositado, em mg/cm<sup>2</sup>.

De acordo com a Tabela 3.1, serão aplicados níveis de poluição específicos conforme os procedimentos da IEC 60507. Optou-se pela composição de caulim para formação da solução aplicada sobre a superfície do isolador, feita da seguinte maneira: 40 g de caulim, 1000 g de água destilada e quantidade de NaCl de pureza comercial para produzir a condutividade apresentada na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2. Valores escolhidos para elaboração das soluções (EPRI, 1975).**

Níveis	ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )	Condutividade de Suspensão (mS/cm)
1	0,025	10
2	0,050	20
3	0,100	40

Depois de produzidas as soluções, os três isoladores poliméricos, descritos no item 3.1.2, serão pulverizados superficialmente e uniformemente.

### 3.2.4. Processamento de Imagens – Vídeos UV

As imagens UV provenientes da câmera são constituídas por uma matriz com 240 linhas e 352 colunas, totalizando 84.480 píxeis.

Inicialmente cada vídeo será dividido em 200 (duzentas) imagens e após uma inspeção visual são escolhidas as 10 (dez) imagens com maior nível de corona. No Matlab®, as imagens serão processadas de modo a diminuir o efeito dos reflexos da luz nos objetos presentes no laboratório e realçar apenas o efeito corona.

As 10 (dez) imagens processadas passarão do formato RGB (abreviatura do sistema de cores formado por vermelho, verde e azul para reprodução de cores em dispositivos eletrônicos) para escala de cinza. Este processo de conversão (RGB para escala de cinza) vai realçar o efeito corona. Em seguida, elas serão transformadas de imagens na escala de cinza para imagens binárias, ou seja, representadas por matrizes binárias, onde o valor 1 (um) será atribuído à região mais clara da imagem (corona), e o valor 0 a toda parte mais escura. As 10 (dez) matrizes binárias serão somadas, gerando uma única matriz reunindo registros de todas as incidências de corona das imagens consideradas. Nesta matriz, cada pixel branco pode ter valores de 0 a 10. Assim, é feito o processo de “ponderação”, no qual valores com frequência maior ou igual a 3 (três) serão considerados corona. Píxeis com valores menores que 3 (três) serão considerados ruídos, tendo em vista que o efeito corona é um fenômeno caracterizado pela incidência na mesma região. Por último, será feito o levantamento da concentração de píxeis na área luminosa que representa o corona.

A utilização de dez imagens para o processamento e ponderação para valores de píxeis com frequência maior ou igual a três, foram escolhidos de acordo com simulações no Matlab. Pois, a utilização de mais imagens ou valores maiores para o processo de ponderação não altera os resultados. É um método de processamento de imagens proposto, tendo em vista que não existem trabalhos que possam ser tomados como base para o processamento das imagens UV.

Espera-se com a utilização da metodologia proposta uma quantificação do efeito corona para o diagnóstico de isoladores defeituosos e com diferentes níveis de poluição. No próximo capítulo serão feitas as análises dos resultados obtidos com a câmera UV, o processamento das imagens e os ensaios de DP.



## **4. RESULTADOS E ANÁLISES**

Os experimentos de medição de descargas parciais e de detecção do corona foram realizados, simultaneamente. Arranjos ponta-plano com três diferentes geometrias de eletrodos e isoladores poliméricos classe 72,5 kV foram ensaiados. A análise dos resultados é realizada utilizando a contagem de pontos de descargas por minuto da câmera UV, o processamento das imagens UV e o processamento dos sinais de DP obtidos através do detector digital de DP. Uma correlação entre os sinais de UV e DP foi implementada buscando quantificar o corona para diagnósticos de isoladores poliméricos.

### **4.1. Eletrodos – Arranjo Ponta-Plano**

Inicialmente, eletrodos foram utilizados para estudar a sensibilidade dos arranjos e parametrizar o efeito corona em campos elétricos bem definidos. Três tipos de eletrodos com diferentes geometrias foram utilizados para o arranjo ponta-plano.

Os resultados dos ensaios detalham os efeitos da concentração de descargas nas pontas dos eletrodos. Logo, a presença de uma grande concentração de pontos de descarga corona por minuto com a câmera UV é evidenciada. Descargas parciais, medidas através do detector digital de DP, são observadas no pico positivo da tensão (indicando descarga corona no lado de terra) e no pico negativo da tensão (indicando descarga corona no lado de alta).

#### **4.1.1. Eletrodo Tipo I**



O eletrodo Tipo I, com a ponta plana e material alumínio, foi ensaiado inicialmente. Ensaios foram realizados para arranjos ponta-plano com espaçamentos de 50 e 60 mm e, distância fixa de 3 m da câmera ao ponto de observação. O espaçamento de 40 mm não foi utilizado para este tipo de eletrodo, devido a ruptura do meio dielétrico antes da visualização do corona. Variou-se a tensão desde a tensão de início do corona até a tensão de iminência de ruptura do meio dielétrico (ar). As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 26,5°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 62%.


#### 4.1.1.1. Medição de Corona com Câmera UV



Nas Tabelas 4.1 e 4.2, pode-se observar as imagens obtidas com a câmera UV e as suas respectivas análises para diferentes espaçamentos do arranjo.

**Tabela 4.1. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo I e espaçamento de 50 mm.**

Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
23 kV		Nesta tensão ocorreu o início da formação do corona na região próxima à superfície plana do eletrodo. A amplitude média de descargas foi de 450 pontos/min.
24 kV		Ocorreram muitas descargas de grande intensidade. Tensão na iminência de ocorrer a ruptura do meio entre o eletrodo e o plano de terra. A amplitude média de descargas foi de 7.350 pontos/min.

**Tabela 4.2. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo I e espaçamento de 60 mm.**

Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
24 kV		Nesta tensão ocorreu o início da formação do corona na região próxima à superfície plana do eletrodo. A amplitude média de descargas foi de 2.340 pontos/min.

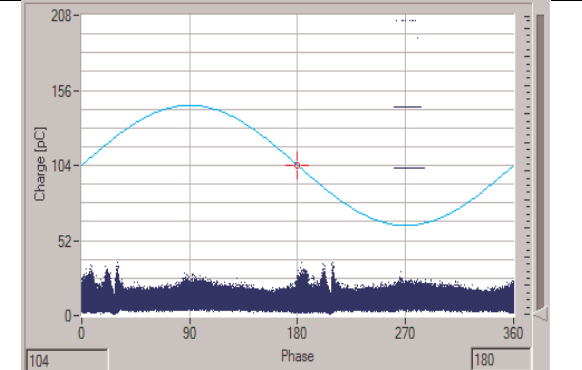
26 kV		As descargas corona aumentaram tendendo a formação de um arco para ruptura do meio dielétrico. A média de descargas foi de 7.300 pontos/min.
27 kV		Ocorreram muitas descargas de grande intensidade. Tensão na iminência de ocorrer a ruptura do meio entre o eletrodo e o plano de terra. A média de descargas foi de 19.000 pontos/min.

A medição de radiação UV para o eletrodo Tipo I, enaltece a dificuldade de utilização de eletrodos de geometria plana para quantificação do corona. Neste caso, a tensão de início do corona e a tensão de iminência de ruptura do meio são muito próximas, diferença de 1 a 2 kV entre ambas. Assim, as descargas tendem rapidamente a ruptura total entre o eletrodo e o plano terra, como ilustrado nas tabelas acima.

#### 4.1.1.2. Medição de Descargas Parciais

O ensaio de descargas parciais para a mesma configuração anterior é ilustrado e analisado nas Tabelas 4.3 e 4.4.

**Tabela 4.3. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo I e espaçamento de 50 mm.**

Tensão Aplicada	Ensaio de DP	Análise
23 kV		Descargas parciais no pico de tensão negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 82 pC.

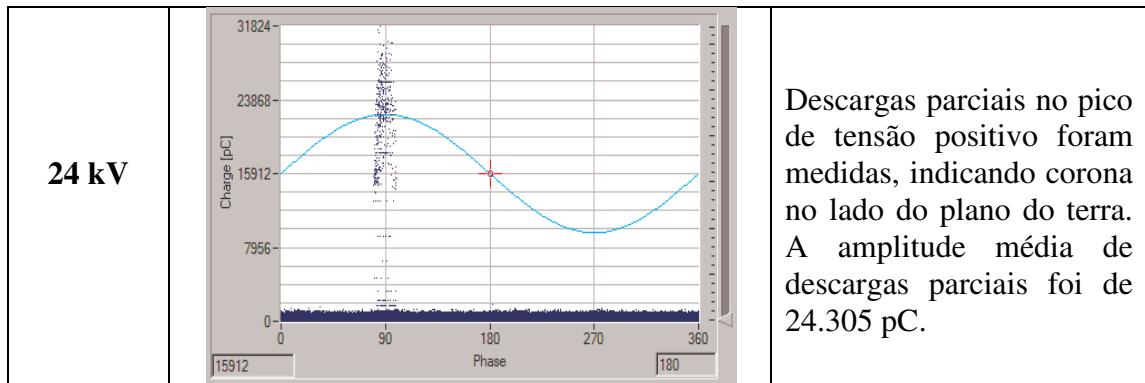
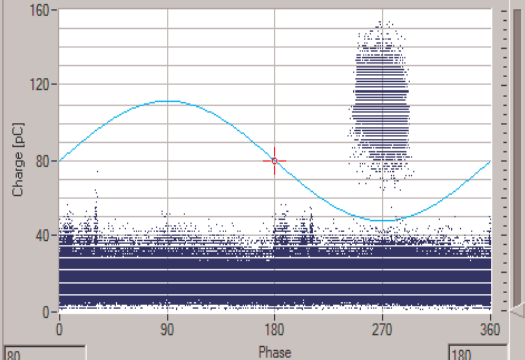
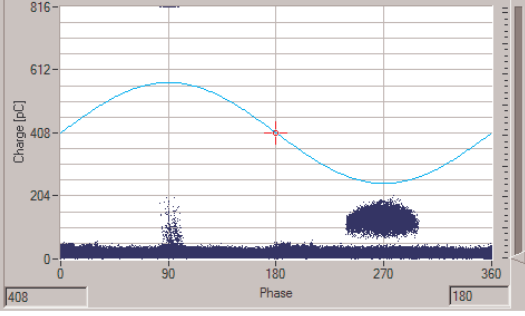
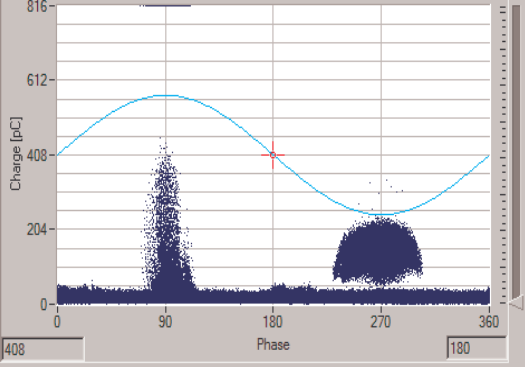


Tabela 4.4. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo I e espaçamento de 60 mm.

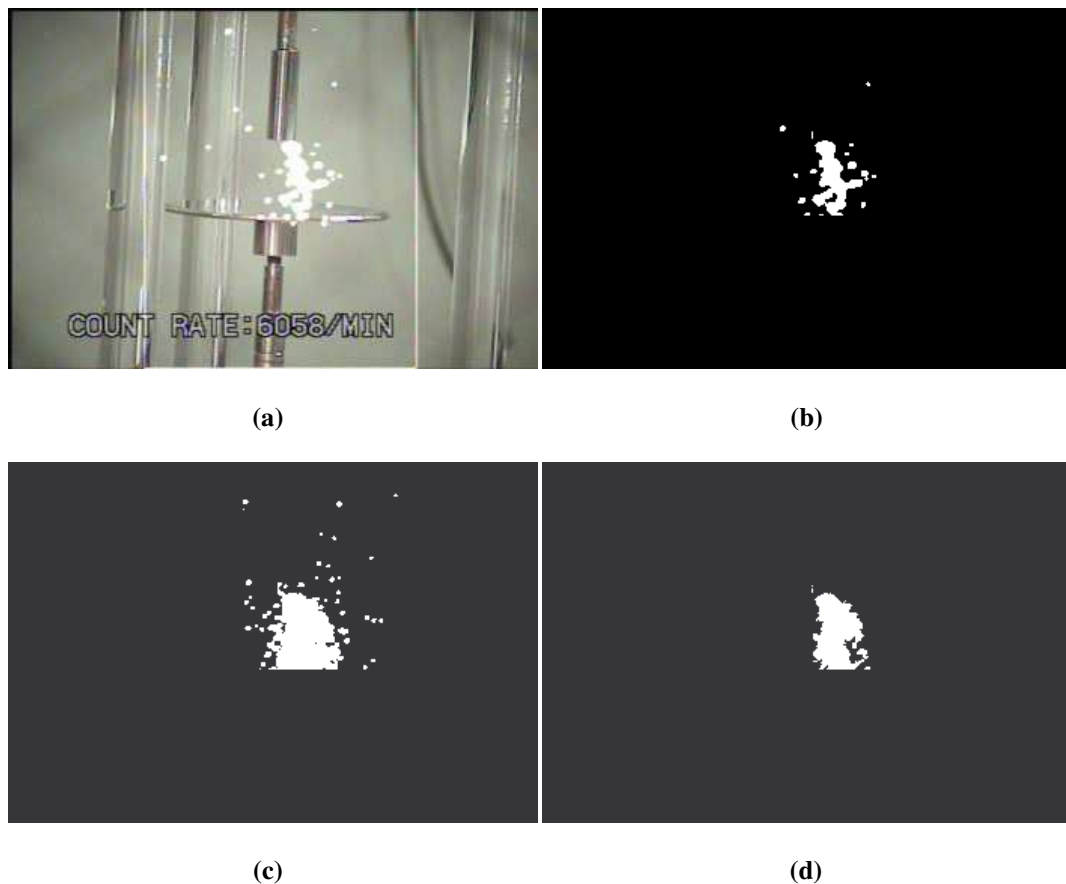
Tensão Aplicada	Ensaio de DP	Análise
<p><b>24 kV</b></p>		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 129 pC.</p>
<p><b>26 kV</b></p>		<p>Descargas parciais no pico de tensão positivo e negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo) e no lado do terra. A amplitude média de descargas parciais foi de 783 pC.</p>
<p><b>27 kV</b></p>		<p>Descargas parciais no pico de tensão positivo e negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo) e no lado do terra. A amplitude média de descargas parciais foi de 772 pC, porém com maior intensidade que na tensão anterior.</p>

Os resultados dos ensaios de descargas parciais realizados foram satisfatórios. Nas tensões de início de corona, observou-se presença de descargas parciais apenas no pico de

tensão negativo. Assim, evidencia-se que o corona obtido ocorreu no lado de aplicação da alta tensão (eletrodo), em consonância com imagens da câmera UV do item anterior. Já para tensões na iminência de ruptura, pode-se observar que as descargas disruptivas são detectadas tanto no pico positivo quanto no pico negativo da tensão, pois as descargas parciais começam a romper o meio dielétrico, como visto nas imagens UV das Tabelas 4.1 e 4.2, indo da ponta do eletrodo energizado ao plano de terra.

#### 4.1.1.3. Processamento de Imagens e Correlação dos Resultados

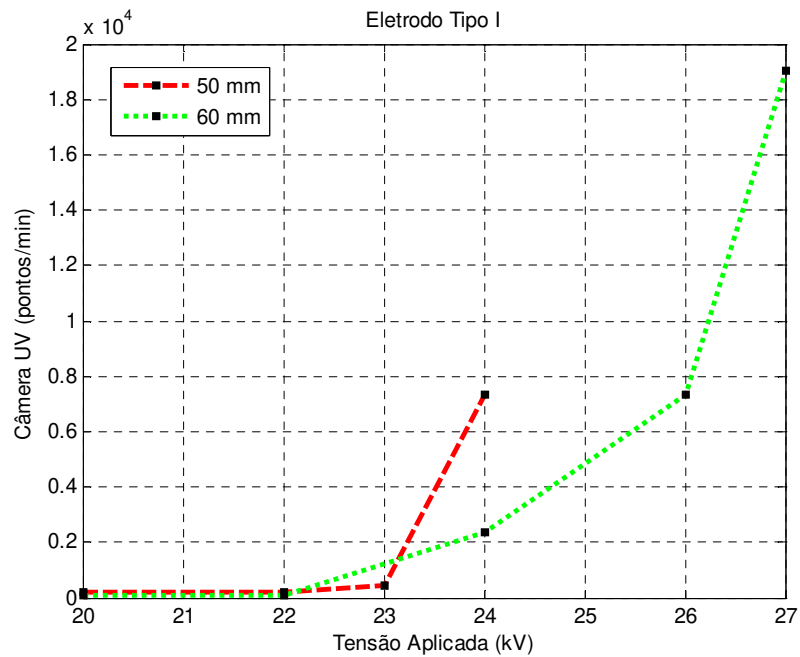
Na Figura 4.1 é possível observar as imagens obtidas com a câmera UV e as imagens após o processamento proposto, para espaçamento de 50 mm e tensão de 24 kV.



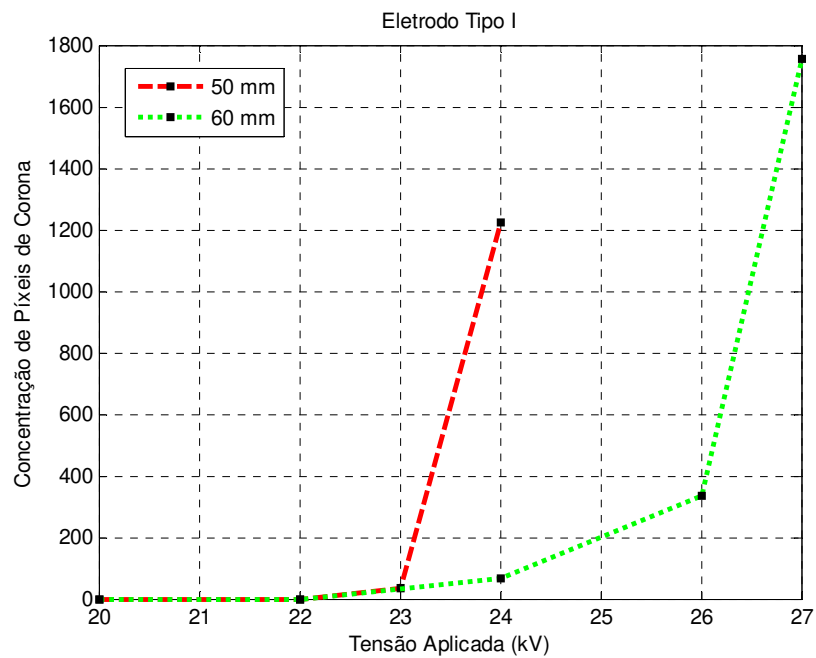
**Figura 4.1.** Eletrodo Tipo I com espaçamento de 50 mm para tensão de 24 kV. a) Imagem da câmera UV. b) Imagem binária após processamento. c) Soma das 10 imagens binárias. d) Imagem ponderada.

O mesmo procedimento de processamento de imagens foi feito para todos os eletrodos, para cada passo de tensão aplicada e espaçamento utilizado. Os gráficos da contagem de pontos/min da câmera UV, da concentração de píxeis de corona e dos níveis de DP versus a tensão aplicada, para espaçamentos de 50 mm e 60 mm, são ilustrados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente. A vantagem da concentração de píxeis em relação à

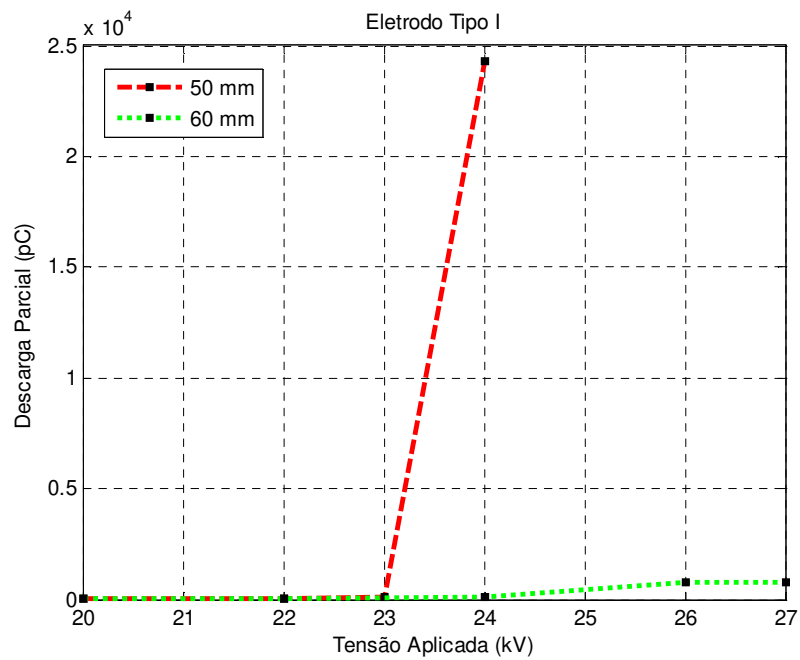
contagem de pontos/min da câmera é a eliminação do ruído ambiente através do processamento de imagens.



**Figura 4.2. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona. Eletrodo Tipo I.**



**Figura 4.3. Concentração de pixels em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo I.**



**Figura 4.4. Descargas parciais em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo I.**

As curvas das Figuras 4.2 e 4.3 apresentam semelhanças validando o processamento de imagens proposto. Os resultados de descargas parciais versus tensão aplicada apresentam divergências, no qual os níveis de descargas parciais foram bem mais elevados para o espaçamento de 50 mm. Este caso ocorreu devido à aleatoriedade das descargas medidas, quando as mesmas estão na iminência de ruptura do meio dielétrico.

A correlação entre os sinais UV e de DP é ilustrada nas Figuras 4.5 e 4.6.

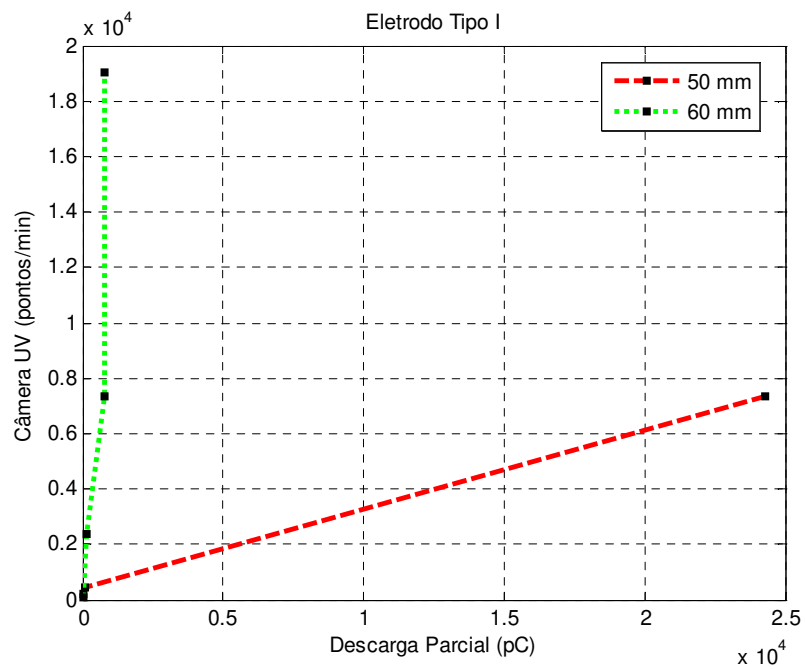


Figura 4.5. Correlação entre sinais de DP e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo I.

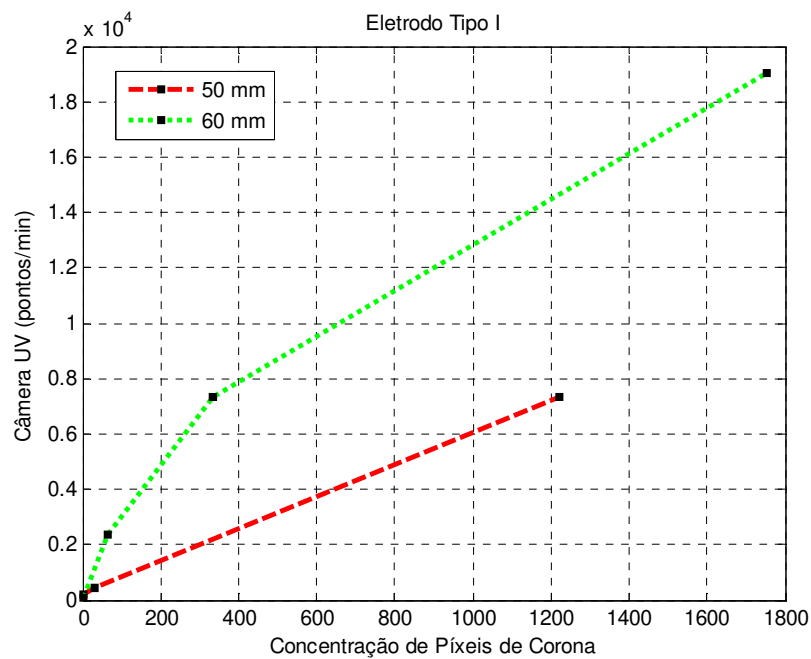


Figura 4.6. Correlação entre concentração de pixels e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo I.

Para o mesmo número de descargas detectadas através da câmera UV, foram obtidos níveis de DP e de concentração pixels de corona bem divergentes, quando variado o espaçamento do arranjo ponta-plano. Assim, com as Figuras 4.5 e 4.6, a correlação entre sinais de DP e de corona não foi satisfatória.



### 4.1.2. Eletrodo Tipo II


O eletrodo Tipo II, com a ponta arredondada e material bronze, foi ensaiado. Ensaios foram realizados para arranjos ponta-plano com espaçamentos de 50 e 60 mm e, distância fixa de 3 m da câmera ao objeto de observação. Variou-se a tensão desde a tensão de início do corona até a tensão de iminência de ruptura do meio dielétrico (ar). As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 27,1°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 65%.


#### 4.1.2.1. Medição de Corona com Câmera UV

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 pode-se observar as imagens obtidas com a câmera UV e as suas respectivas análises.

**Tabela 4.5. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo II e espaçamento de 50 mm.**

Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
25 kV		Ocorreram muitas descargas de grande intensidade. Tensão na iminência de ocorrer a ruptura do meio entre o eletrodo e o plano de terra. A média de descargas foi de 4.000 pontos/min.

**Tabela 4.6. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo II e espaçamento de 60 mm.**

Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
27 kV		Ocorreram muitas descargas de grande intensidade. Tensão na iminência de ocorrer a ruptura do meio entre o eletrodo e o plano de terra. A média de descargas foi de 3.800 pontos/min.

A ocorrência de descargas disruptivas foram evidenciadas. A tensão de início das descargas e a tensão de iminência de ruptura foram as mesmas. Descargas disruptivas surgiam e desapareciam a cada segundo nos vídeos UV, dificultando a contagem correta de pontos/min através da câmera UV.

#### 4.1.2.2. Medição de Descargas Parciais

O ensaio de descargas parciais para a mesma configuração anterior é ilustrado nas Tabelas 4.7 e 4.8.

**Tabela 4.7. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo II e espaçamento de 50 mm.**

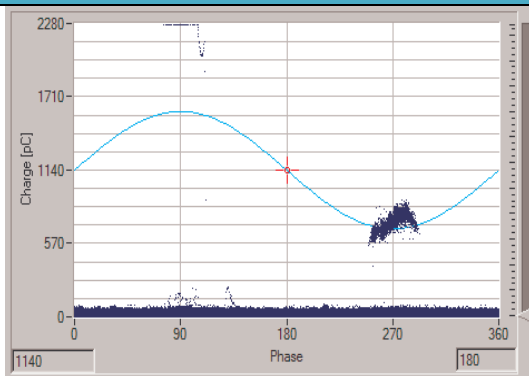
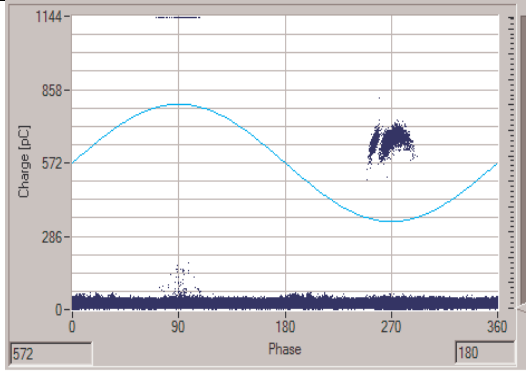
Tensão Aplicada	Ensaio de DP	Análise
25 kV		Descargas parciais no pico de tensão positivo e negativo foram visualizadas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo) e no lado do terra. A amplitude média de descargas parciais foi de 1.299 pC.

Tabela 4.8. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo II e espaçamento de 60 mm.

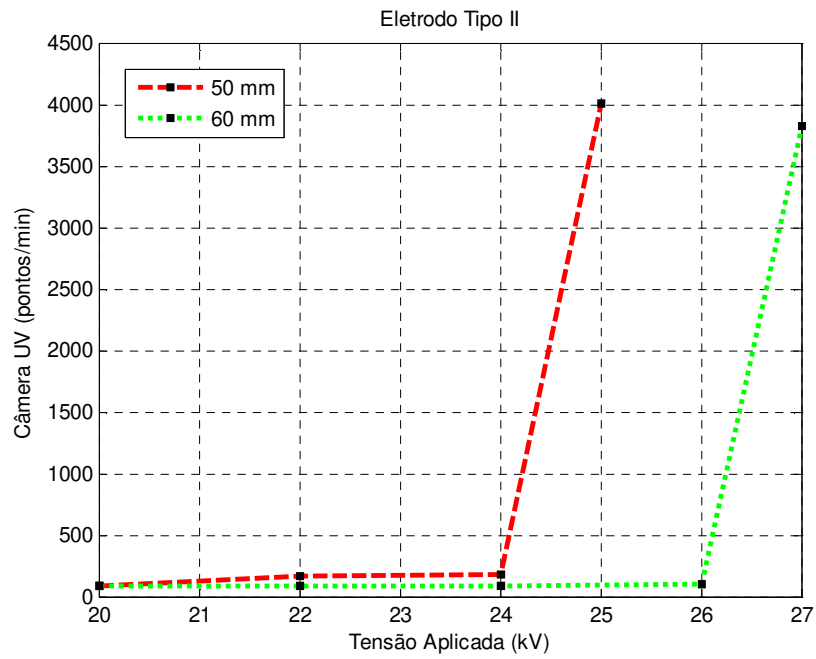
Tensão Aplicada	Ensaio de DP	Análise
27 kV		<p>Descargas parciais no pico de tensão positivo e negativo foram visualizadas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo) e no lado do terra. A amplitude média de descargas parciais foi de 697 pC.</p>

A maior concentração de descargas ocorreu no pico de tensão negativo, devido ao corona presente no lado de alta tensão. Porém, algumas descargas de menor concentração e níveis mais elevados aparecem no pico de tensão positivo. A explicação deve-se ao fato das descargas atingirem o plano de terra do arranjo, mais uma vez comprovando uma boa correlação com as imagens UV visualizadas no item anterior. Mesmo aumentando a tensão para o espaçamento de 60 mm, os níveis de DP diminuíram. Isto acontece devido à aleatoriedade das descargas na iminência de ruptura do meio dielétrico.

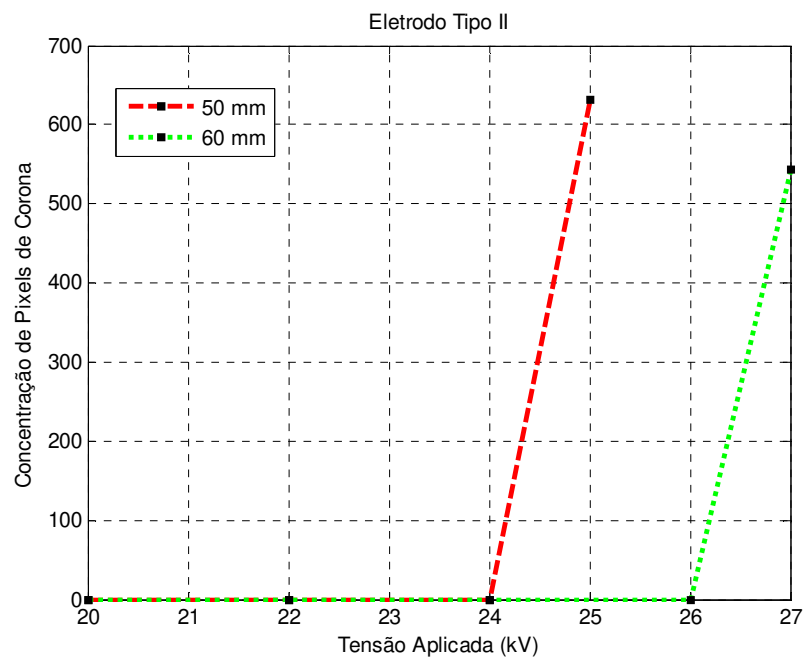
#### 4.1.2.3. Processamento de Imagens e Correlação dos Resultados

O processamento de imagens utilizado para retirar atributos das imagens UV (concentração de corona) é o mesmo ilustrado na Figura 4.1, modificando apenas o eletrodo para Tipo II.

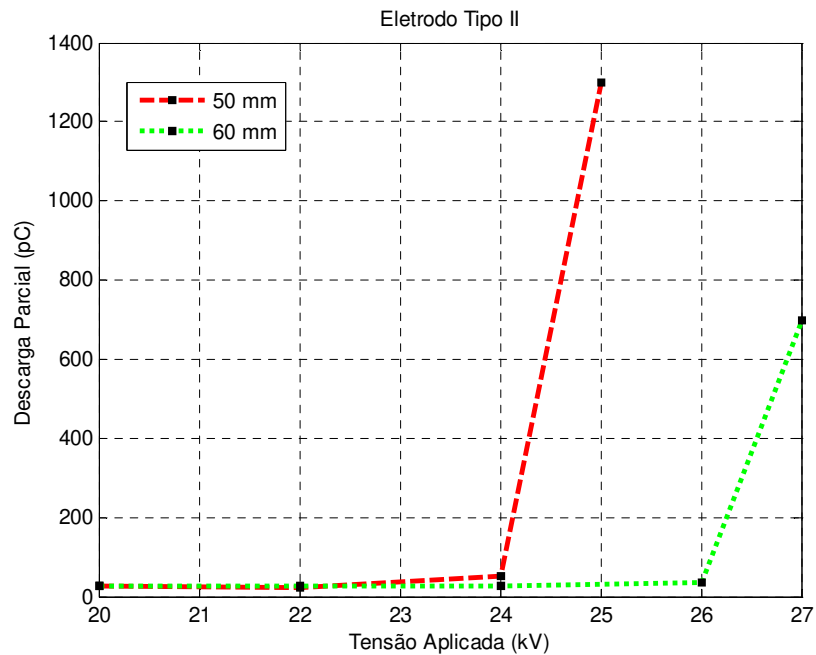
Os gráficos da contagem de pontos/min da câmera UV, da concentração de píxeis de corona, e dos níveis de DP *versus* a tensão aplicada, para espaçamentos de 50 mm e 60 mm, são ilustrados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, respectivamente.



**Figura 4.7.** Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona. Eletrodo Tipo II.



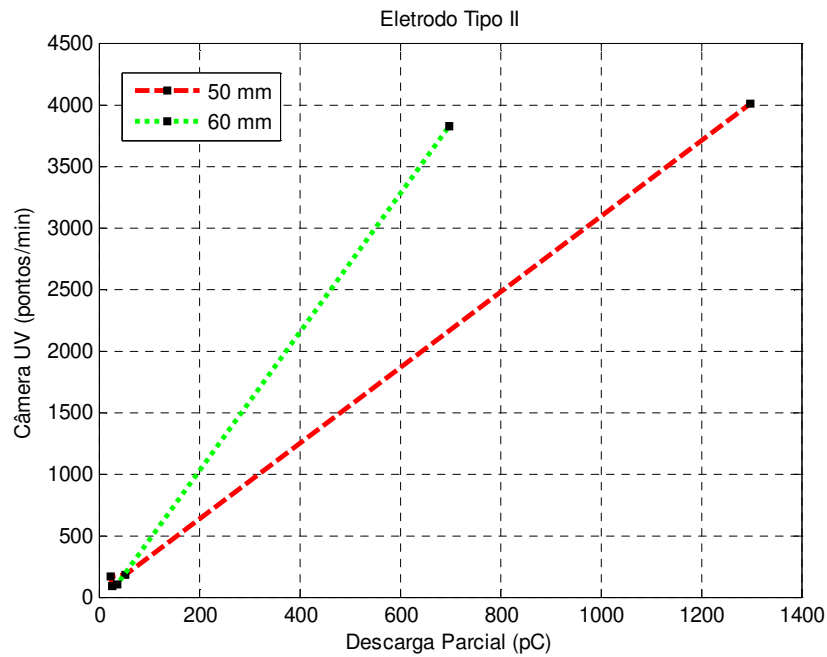
**Figura 4.8.** Concentração de pixels em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo II.



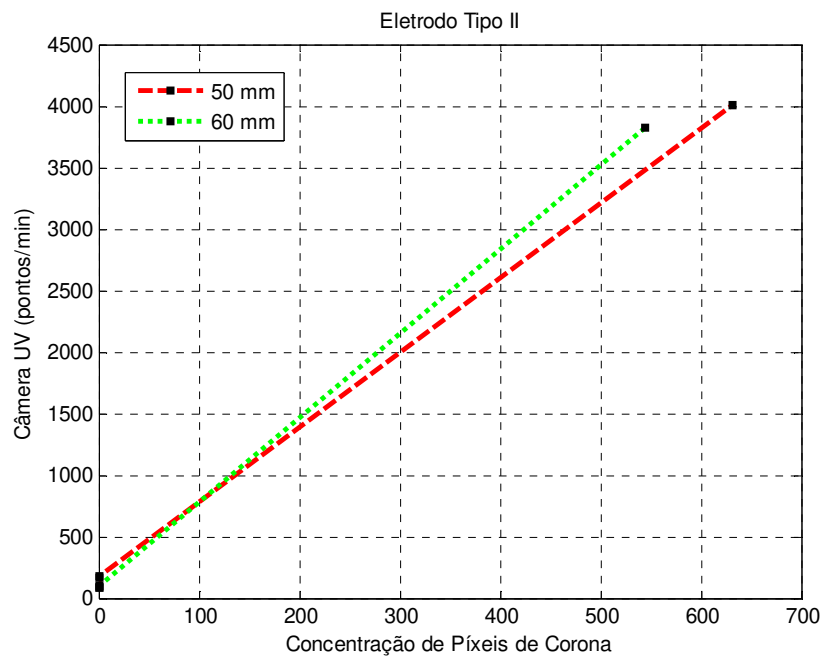
**Figura 4.9. Descargas parciais em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo II.**

As curvas das Figuras acima exibem o mesmo comportamento, uma subida abrupta dos níveis de pontos/min, píxeis e DP. Neste tipo de eletrodo a tensão de início do corona e de iminência de ruptura são iguais. Os resultados foram coerentes, sabendo que quanto maior o espaçamento, maior a tensão de iminência de ruptura do meio dielétrico do arranjo. Porém, a quantificação do corona com este tipo de eletrodo torna-se difícil, devido a aleatoriedade das descargas medidas com a câmera UV e o detector de DP.

A correlação entre os sinais UV e de DP é ilustrada nas Figuras 4.10 e 4.11.



**Figura 4.10. Correlação entre sinais de DP e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo II.**



**Figura 4.11. Correlação entre concentração de pixels e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo II.**

A correlação entre sinais de DP e a contagem da câmera UV ainda não foi satisfatória, porém, mais promissora, em comparação com os resultados para o Eletrodo Tipo I. Os sinais de DP medidos continuam apresentando aleatoriedade para descargas próximas a iminência de ruptura.

Já o processamento de imagens proposto evidencia uma concentração de píxeis de corona equivalente aos resultados fornecidos pela câmera UV, mesmo quando se varia o espaçamento do arranjo ponta-plano.

### 4.1.3. Eletrodo Tipo III – Ponto de Observação fixo e Espaçamento Variável

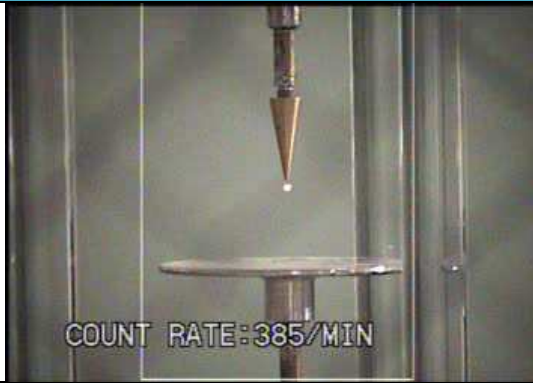
O eletrodo Tipo III, com a ponta fina e material bronze, foi ensaiado. Ensaios foram realizados para arranjos ponta-plano com espaçamentos de 40, 50 e 60 mm e, distância fixa de 3 m da câmera ao objeto de observação. Variou-se a tensão desde a tensão de início do corona até a tensão de iminência de ruptura do meio dielétrico (ar). As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 28,3°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 55%.

#### 4.1.3.1. Medição de Corona com Câmera UV

Nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 pode-se observar algumas imagens obtidas com a câmera UV e as suas respectivas análises.

**Tabela 4.9. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III e espaçamento de 40 mm.**

Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
10 kV		Nesta tensão ocorreu o início da formação do corona na região próxima à ponta do eletrodo. A média de descargas foi de 350 pontos/min.





22 kV		As descargas corona foram aumentando gradativamente a cada passo de tensão. A média de descargas foi de 9.200 pontos/min.
34 kV		Tensão próxima a iminência de ruptura do meio. A média de descargas foi de 24.000 pontos/min.




Tabela 4.10. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III e espaçamento de 50 mm.

Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
12 kV		Nesta tensão ocorreu o início da formação do corona na região próxima à ponta do eletrodo. A média de descargas foi de 850 pontos/min.
24 kV		As descargas corona foram aumentando gradativamente a cada passo de tensão. A média de descargas foi de 7.950 pontos/min.



38 kV		Tensão próxima a iminência de ruptura do meio. A média de descargas foi de 18.000 pontos/min.
-------	---	---

Tabela 4.11. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III e espaçamento de 60 mm.

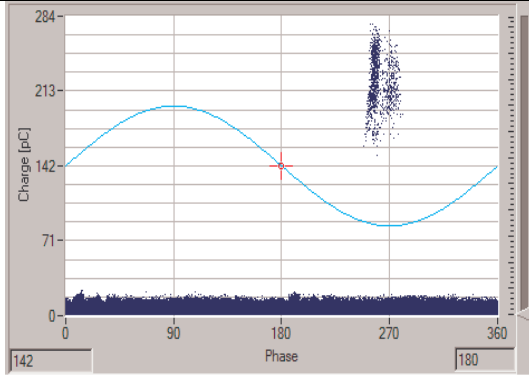
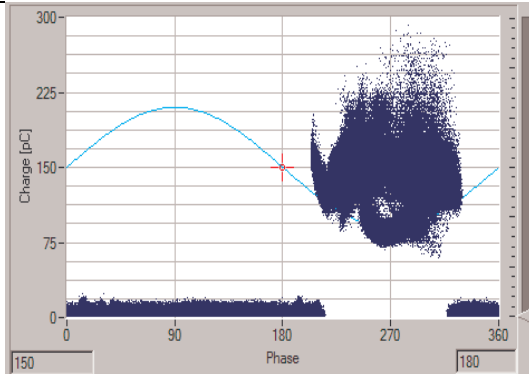
Tensão Aplicada	Imagem da câmera UV	Análise
12 kV		Nesta tensão ocorreu o início da formação do corona na região próxima à ponta do eletrodo. A média de descargas foi de 750 pontos/min.
24 kV		As descargas corona foram aumentando gradativamente a cada passo de tensão. A média de descargas foi de 7.000 pontos/min.
40 kV		Tensão próxima a iminência de ruptura do meio. A média de descargas foi de 19.200 pontos/min.

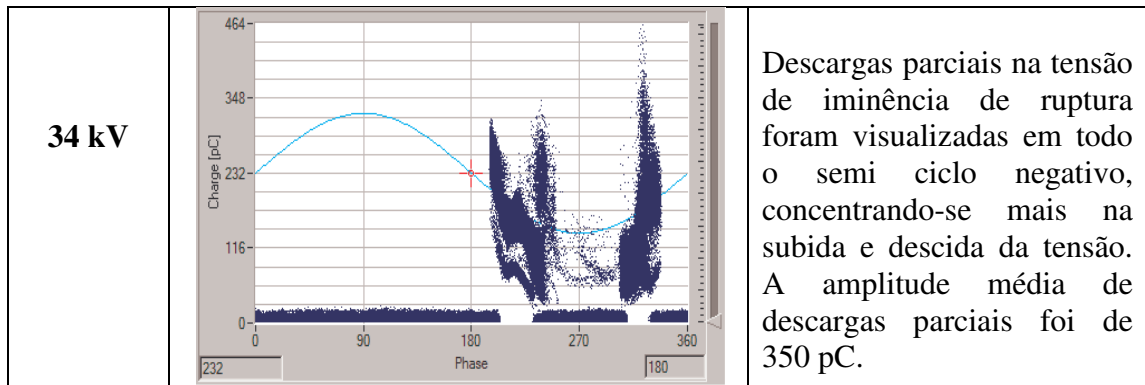
A contagem de pontos/min da câmera UV foi aumentando, gradativamente, a cada passo de tensão. Quanto menor o espaçamento, menor foi a tensão de iminência de ruptura do meio dielétrico. Neste caso, observa-se que quanto menor o comprimento do espaçamento, maior o campo elétrico em torno do eletrodo energizado. Considerando uma mesma tensão aplicada, quanto maior o espaçamento, menor foram os níveis de descarga corona detectados com a câmera UV. Logo, os resultados foram condizentes com o esperado, tendo em vista que o campo elétrico torna-se mais intenso para espaçamentos menores, gerando descargas mais elevadas para um mesmo nível de tensão.

#### 4.1.3.2. Medição de Descargas Parciais

O ensaio de descargas parciais para a mesma configuração anterior é ilustrado na Tabela 4.12, 4.13 e 4.14.

**Tabela 4.12. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo III e espaçamento de 40 mm.**

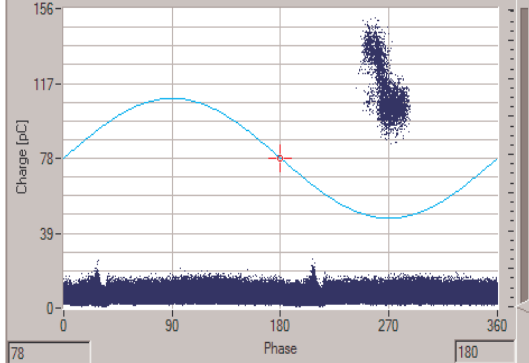
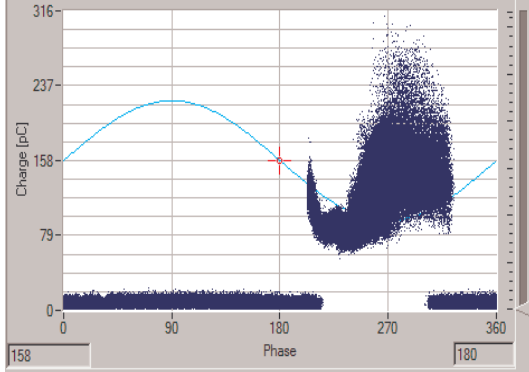
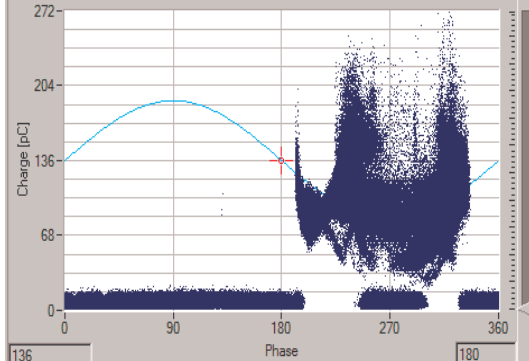
Tensão Aplicada	DP	Análise
10 kV		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 239 pC.</p>
22 kV		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo e espalhando-se na subida e descida do semi ciclo negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 244 pC.</p>



**Tabela 4.13. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo III e espaçamento de 50 mm.**

Tensão Aplicada	DP	Análise
<p><b>12 kV</b></p>		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 193 pC.</p>
<p><b>24 kV</b></p>		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo e espalhando-se na subida e descida do semi ciclo negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 234 pC.</p>
<p><b>38 kV</b></p>		<p>Descargas parciais na tensão de iminência de ruptura foram visualizadas em todo o semi ciclo negativo, concentrando-se mais na subida e descida da tensão. A amplitude média de descargas parciais foi de 241 pC.</p>

Tabela 4.14. Resultados da medição de DP para eletrodo Tipo III e espaçamento de 60 mm.

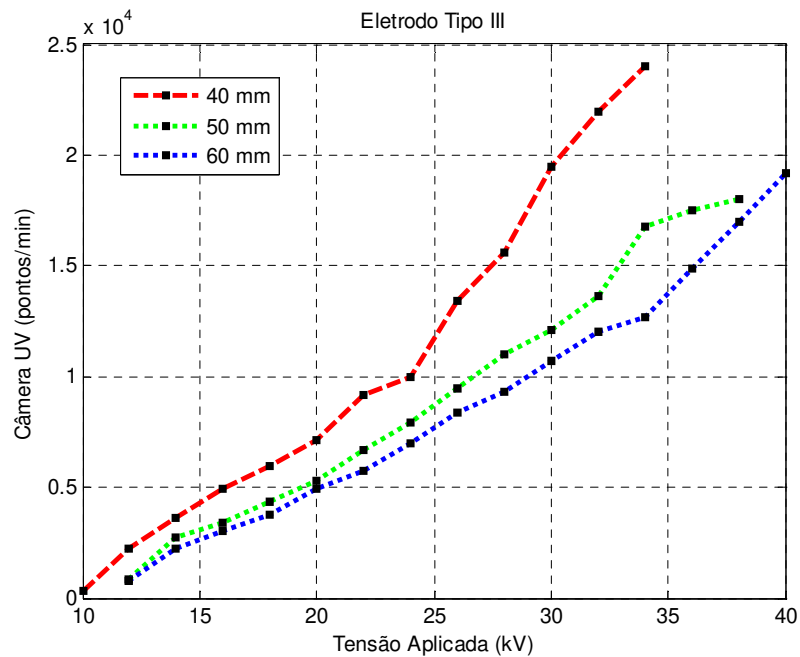
Tensão Aplicada	DP	Análise
<b>12 kV</b>		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 137 pC.</p>
<b>24 kV</b>		<p>Descargas parciais no pico de tensão negativo e espalhando-se na subida e descida do semi ciclo negativo foram medidas, indicando corona no lado de alta tensão (eletrodo). A amplitude média de descargas parciais foi de 247 pC.</p>
<b>40 kV</b>		<p>Descargas parciais na tensão de iminência de ruptura foram visualizadas em todo o semi ciclo negativo, concentrando-se mais na subida e descida da tensão. A amplitude média de descargas parciais foi de 221 pC.</p>

Os resultados de descargas parciais apresentaram consonância com os resultados da câmera UV. As descargas ocorreram sempre no semi ciclo negativo demonstrando o efeito corona presente no lado de alta tensão, mais precisamente ao redor da ponta do eletrodo energizado. Para tensões de início do efeito corona, as descargas concentravam-se no pico de tensão negativo. Com o aumento da tensão aplicada, as descargas também passaram a aparecer na subida e descida do semi ciclo negativo. Isto ocorre devido à proximidade das descargas corona ao plano de terra do arranjo. A cada passo de tensão aplicado, quantidade de pontos de descargas parciais medidos pelo detector de DP aumentava, porém, a amplitude média das descargas variava.

#### 4.1.3.3. Processamento de Imagens e Correlação dos Resultados

O processamento de imagens utilizado para retirar atributos das imagens UV (concentração de coroa) é o mesmo ilustrado na Figura 4.1, modificando apenas o eletrodo para Tipo III.

Os gráficos da contagem de pontos/min da câmera UV, da concentração de píxeis de coroa e dos níveis de DP versus a tensão aplicada, para espaçamentos de 40, 50 e 60 mm, são ilustrados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, respectivamente.



**Figura 4.12. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo coroa. Eletrodo Tipo III.**

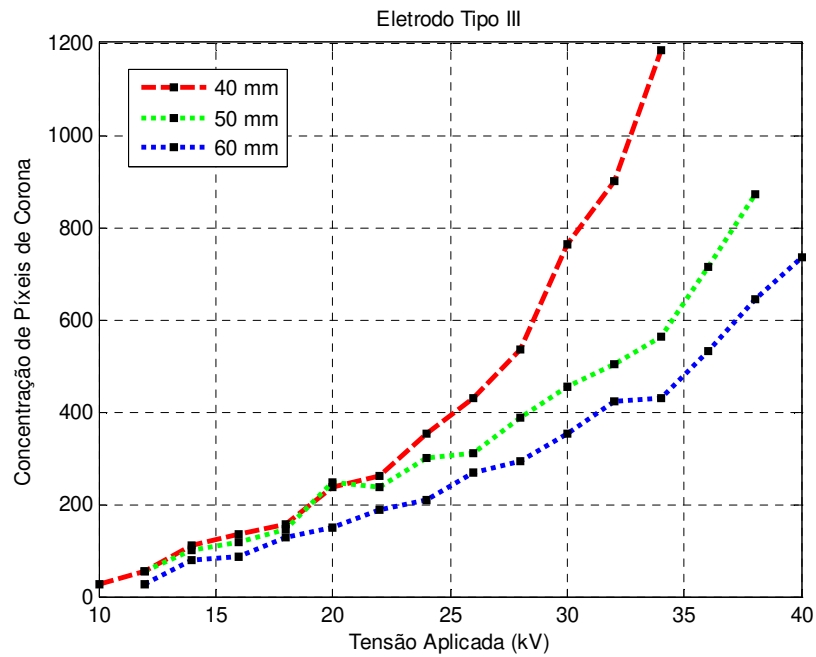


Figura 4.13. Concentração de pixels em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo III.

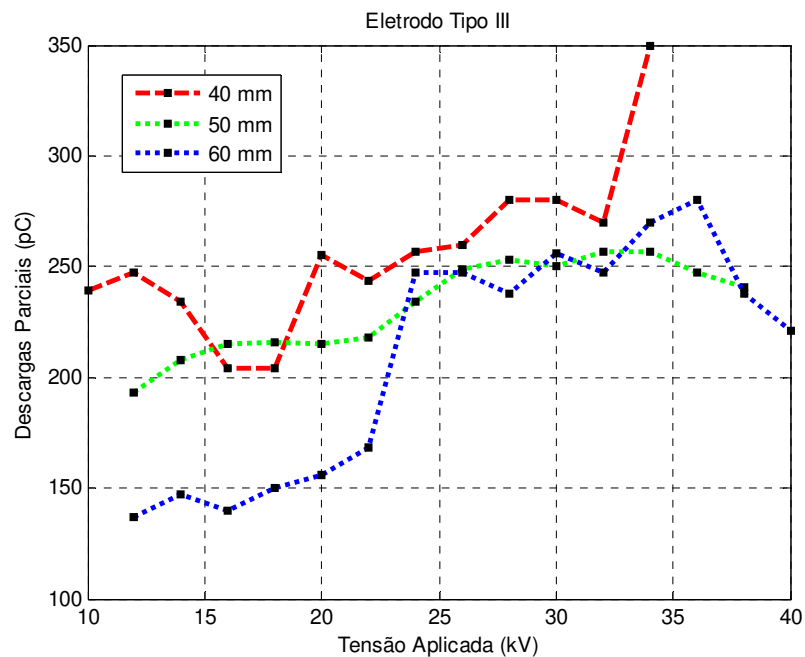
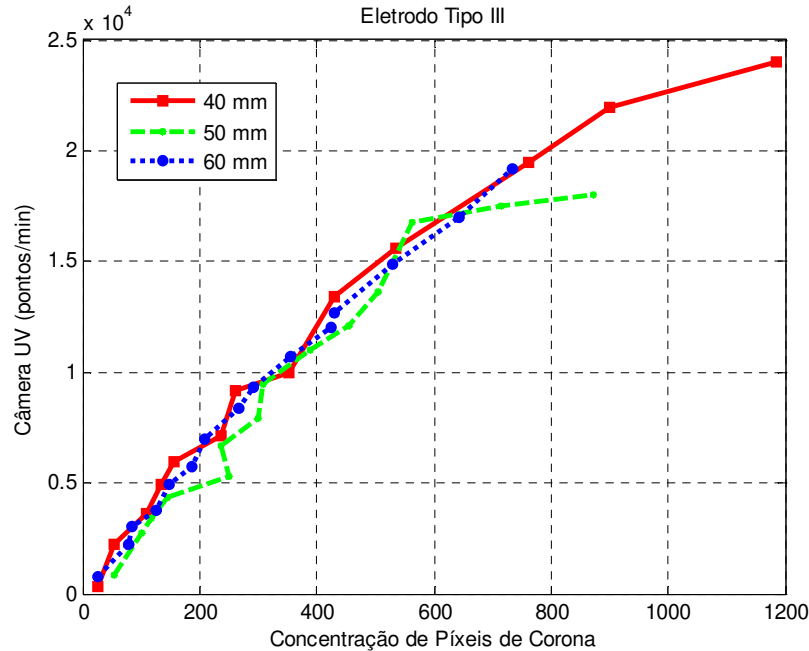


Figura 4.14. Descargas parciais em função da tensão aplicada. Eletrodo Tipo III.

A intensidade das descargas parciais aumentava a cada passo de tensão aplicado, como mostrado nas tabelas do item 4.1.3.2, apesar da amplitude média das DP (pC) variar e não apresentar o mesmo comportamento crescente dos resultados com a câmera UV e o processamento de imagens.

A correlação entre os sinais UV e o processamento de imagens é ilustrada na Figura 4.15.



**Figura 4.15. Correlação entre concentração de píxeis e contagem de pontos/min. Eletrodo Tipo III.**




A correlação da concentração de píxeis, proveniente do processamento de imagens, com a contagem de pontos/min, detectados através da câmera UV, é promissora. As curvas da Figura 4.11 mantêm um perfil semelhante independente do tamanho do espaçamento utilizado. Isto indica que, mesmo variando o espaçamento cada concentração de píxeis equivale a uma contagem de pontos/min da câmera UV.

#### **4.1.4. Eletrodo Tipo III – Ponto de Observação Variável e Espaçamento Fixo**

Neste caso, optou-se pela manutenção do espaçamento de 40 mm e variou-se a distância da câmera ultravioleta ao eletrodo. As distâncias escolhidas foram 3, 6 e 9 m, tendo em vista as dimensões do laboratório (LAT).

Os ensaios de descargas parciais já haviam sido realizados item 4.1.3.2, pois a variação da distância da câmera ao eletrodo não influencia nos resultados provenientes do detector de DP. Não importa a posição da câmera, os níveis de DP serão os mesmos.

**Tabela 4.15. Resultados da medição de corona com câmera UV para eletrodo Tipo III, espaçamento de 40 mm e variando a distância da câmera ao eletrodo.**

Tensão Aplicada / Distância	Imagem da câmera UV	Análise
26 kV / 3 m		A média de descargas corona obtidas através da câmera UV foi de 13.500 pontos/min
26 kV / 6 m		A média de descargas corona obtidas através da câmera UV foi de 6.400 pontos/min.
26 kV / 9 m		A média de descargas corona obtidas através da câmera UV foi de 4.100 pontos/min.

A média de descargas corona diminuiu à medida que a câmera distanciou-se do eletrodo energizado. A diferença de descargas detectadas chegou a diminuir pela metade, em torno de 7.000 pontos/min para uma mesma tensão aplicada e variação de distância de apenas 3 m, como ilustrado na Tabela 4.15. As Figuras 4.16 e 4.17 ilustram os gráficos das medições de corona para as três distâncias escolhidas.



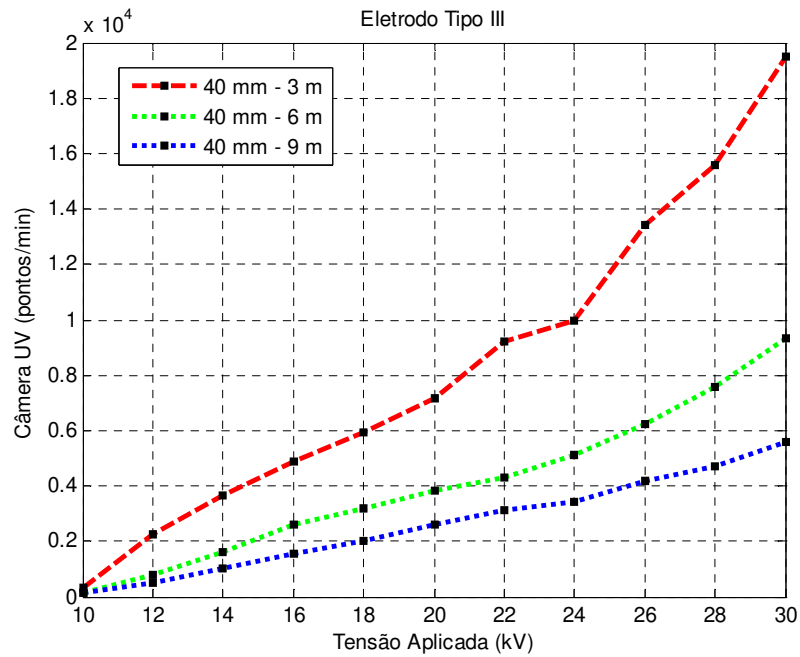


Figura 4.16. Contagem de pontos UV por minuto gerada pelo corona com a distância variável.

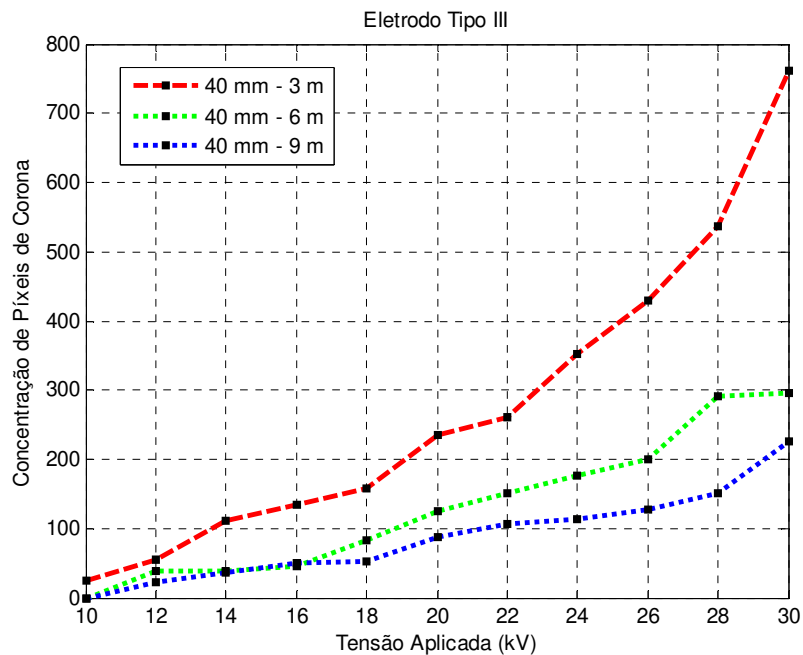


Figura 4.17. Concentração de píxeis versus tensão aplicada com distância variável.

A variação da distância de 3 m para 6 m, da câmera ao eletrodo tipo III, gerou uma diferença média na quantidade de descargas corona (pontos/min) de aproximadamente 213,1%, chegando a uma diferença máxima de 281,2%. Já a variação da distância de 3 m para 9 m, da câmera ao objeto, gerou uma diferença média na quantidade de descargas corona (pontos/min) de aproximadamente 320,1%, chegando a uma diferença máxima de 450%.

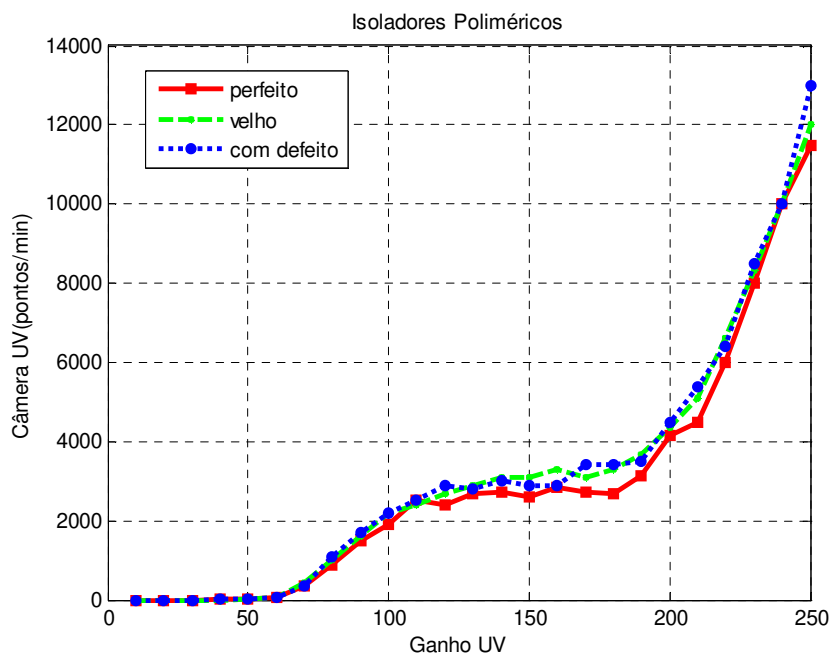
Dessa forma, fica evidenciada a necessidade da definição de uma distância da câmera UV ao isolamento, mesmo que em poucos metros.

## 4.2. Isoladores Poliméricos

### 4.2.1. Ensaios com Variação do Ganho UV

Os ensaios de descarga corona em isoladores poliméricos, utilizando a câmera UV, foram realizados de acordo com o item 3.2.2. Os resultados são mostrados na Figura 4.18. As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 25°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 61%.



**Figura 4.18.** Contagem de pontos UV por minuto gerada versus variação do Ganho UV da câmera.

Este ensaio teve o intuito de verificar a sensibilidade da câmera UV quando se varia o ganho UV. O comportamento similar das curvas deve-se ao fato de não existir atividade do efeito corona em nenhuma amostra, mesmo as amostras envelhecidas e com defeitos. A contagem de pontos apresentada nas curvas são em geral ruídos UV detectados pela câmera provenientes do laboratório. Os ruídos são amplificados quando se aumenta o ganho UV, chegando perto de 14.000 pontos/min para um ganho de 250. A região linear do ganho UV

localiza-se entre 120 e 160, como mostrado na figura acima. Neste trecho, a contagem de pontos/min tem a maior independência com a variação do ganho.

Com o intuito de se verificar a variação da concentração das descargas com o aumento da poluição e com as condições dos isoladores poliméricos, em termos de integridade do núcleo, envelhecimento do polímero, ferrugens nas conexões, entre outras, novos ensaios serão realizados, variando-se níveis de poluição de acordo com EPRI (1975). Um ganho UV de 120 será fixado para todos os ensaios.

#### **4.2.2. Ensaios com Isoladores Poliméricos para Diferentes Níveis de Poluição**

Os ensaios para medições de descargas corona e de descargas parciais em isoladores poliméricos foram realizados para diferentes níveis de poluição, conforme item 3.2.3. Espera-se que as descargas apareçam nas primeiras aletas do lado de alta tensão (de baixo para cima nas imagens) e nas primeiras aletas do lado do terra (de cima para baixo nas imagens). Isto ocorre devido ao estresse causado por campos elétricos de maior intensidade nestas duas regiões do isolador polimérico. Os resultados são apresentados nos itens a seguir.

##### **4.2.2.1. Atmosfera Limpa – Condutividade de Suspensão de 10 mS/cm**

Os primeiros ensaios foram realizados para o menor nível de poluição, atmosfera limpa. Neste caso, cada um dos três isoladores foi pulverizado superficialmente com as soluções adequadas. As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 26,6°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 76%.

#### **I. Isolador sem Defeitos**

Na Figura 4.19, observa-se uma grande concentração de descargas corona nas três últimas aletas do isolador (lado do terra). As descargas corona chegam a 6.000 pontos/min.



Figura 4.19. Imagem detectada pela câmera UV para isolador sem defeitos e poluição nível 1.

Na Figura 4.20, descargas parciais foram medidas, tanto no pico de tensão positivo (descargas lado do terra) quanto no pico de tensão negativo (descargas no lado de alta). Os níveis de descargas parciais foram elevados tendo em vista o baixo nível de poluição empregado. A média de descargas parciais medidas durante 1 min de ensaio foi de 240 pC.

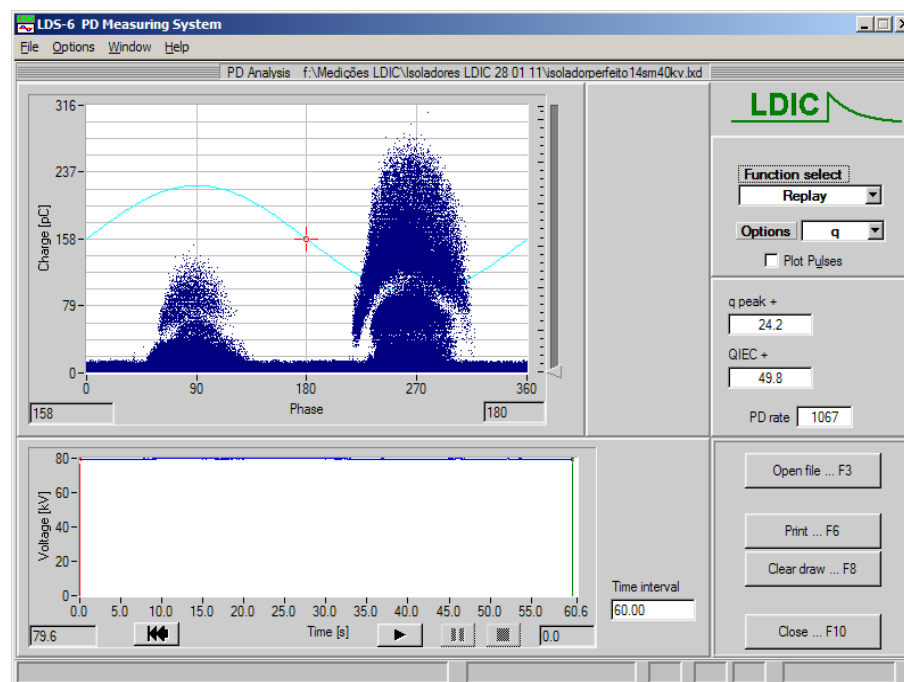


Figura 4.20. Resultados dos ensaios de DP para isolador sem defeitos e poluição nível 1.

## II. Isolador envelhecido

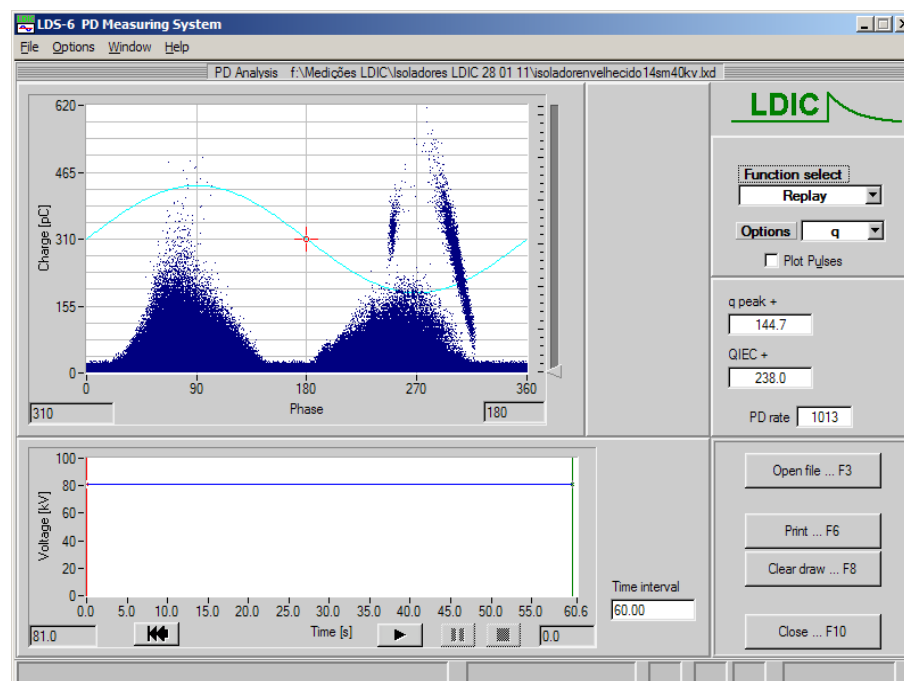
Uma grande concentração de descargas corona nas três últimas aletas do isolador (lado do terra) foram detectadas com a câmera UV. As descargas corona tiveram uma média de

13.600 pontos/min, aproximadamente, duas vezes maior comparando com a medição do isolador sem defeitos.



**Figura 4.21.** Imagem detectada pela câmera UV para isolador envelhecido e poluição nível 1.

Descargas parciais foram medidas, tanto no pico de tensão positivo (descargas lado do terra) quanto no pico de tensão negativo (descargas no lado de alta), como ilustrado na Figura 4.22. Os sinais de DP foram mais intensos e de maior amplitude no semi ciclo negativo. A média de descargas parciais medidas durante 1 min de ensaio foi de 350 pC.



**Figura 4.22.** Resultados dos ensaios de DP para isolador envelhecido e poluição nível 1.

### III. Isolador com Defeito

Descargas corona na primeira aleta (lado de alta tensão) e na última aleta (lado do terra) do isolador foram detectadas com a câmera UV. As descargas corona tiveram uma média de 9.200 pontos/min e 9.500 pontos/min, respectivamente. As imagens UV são ilustradas na Figura 4.23.



Figura 4.23. Imagens detectadas pela câmera UV para isolador com defeito e poluição nível 1.

Atividades de descargas foram medidas em todo o ciclo da tensão aplicada, chegando a níveis de 9.323 pC no lado do terra (semi ciclo positivo) e de aproximadamente 2.300 pC no lado de alta tensão (semi ciclo negativo).

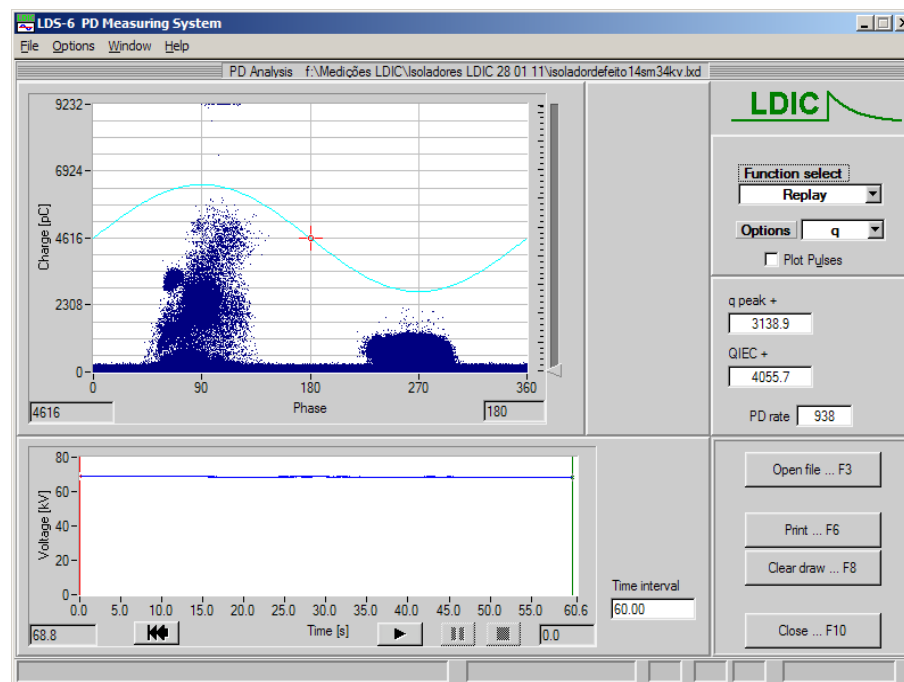


Figura 4.24. Resultados dos ensaios de DP para isolador com defeito e poluição nível 1.

O isolador com defeito apresentou os resultados esperados. Neste caso ocorreram os maiores níveis de radiação UV, proveniente do corona, e os níveis de DP mais elevados.

#### 4.2.2.2. Contaminação Leve – Condutividade de Suspensão de 20 mS/cm

Neste caso, uma contaminação leve foi utilizada em cada um dos três isoladores, os pulverizado superficialmente com as soluções produzidas adequadamente. Em seguida, medições com câmera UV e detector de DP foram realizadas simultaneamente. As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 25,6°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 71%.

##### I. Isolador sem Defeito

Apenas descargas corona nas três primeiras aletas do lado de alta tensão foram detectadas. A média de descargas corona foi de 14.000 pontos/min, níveis elevados de descargas levando em consideração a utilização de um isolador polimérico sem defeitos aparentes.



**Figura 4.25.** Imagem detectada pela câmera UV para isolador sem defeito e poluição nível 2.

Atividades de descargas foram detectadas em todo o ciclo da tensão aplicada, chegando a níveis de até 3.232 pC no lado de alta tensão (semi ciclo negativo).

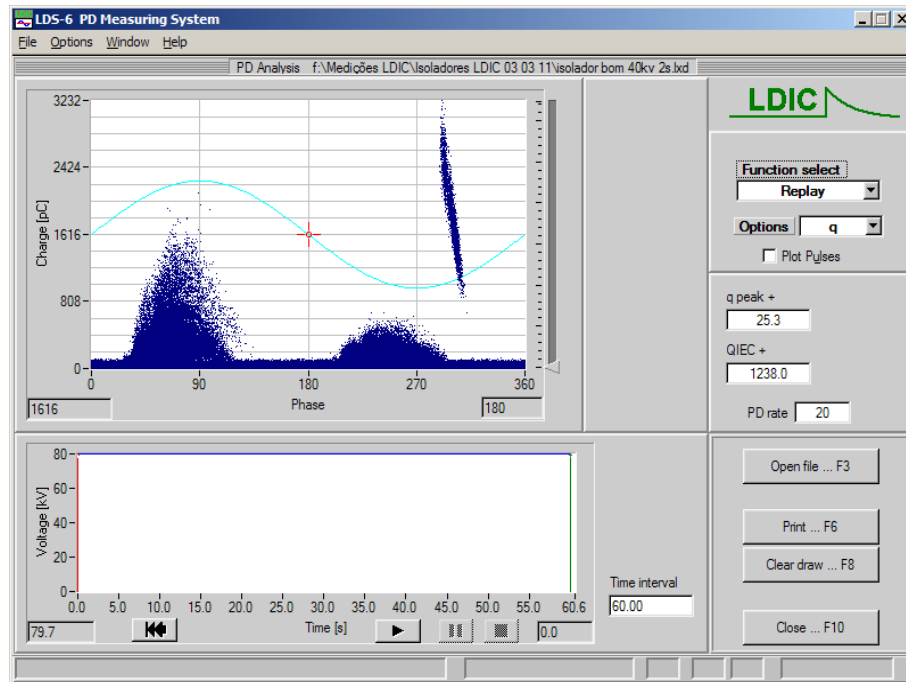


Figura 4.26. Resultados dos ensaios de DP para isolador sem defeito e poluição nível 2.

## II. Isolador Envelhecido

Neste caso, as descargas corona foram detectadas nas quarta e quinta aletas do lado de alta tensão. A média de descargas corona foi de 15.000 pontos/min. A ocorrência de descargas nesta região deve-se ao acúmulo de poluição e de gotículas de água que ficaram nas superfícies das aletas.



Figura 4.27. Imagem detectada pela câmera UV para isolador envelhecido e poluição nível 2.

As descargas parciais chegaram a amplitudes de até 1.152 pC, aparecendo em todo semi ciclo do sinal de tensão aplicado, como mostrado na Figura 4.28.



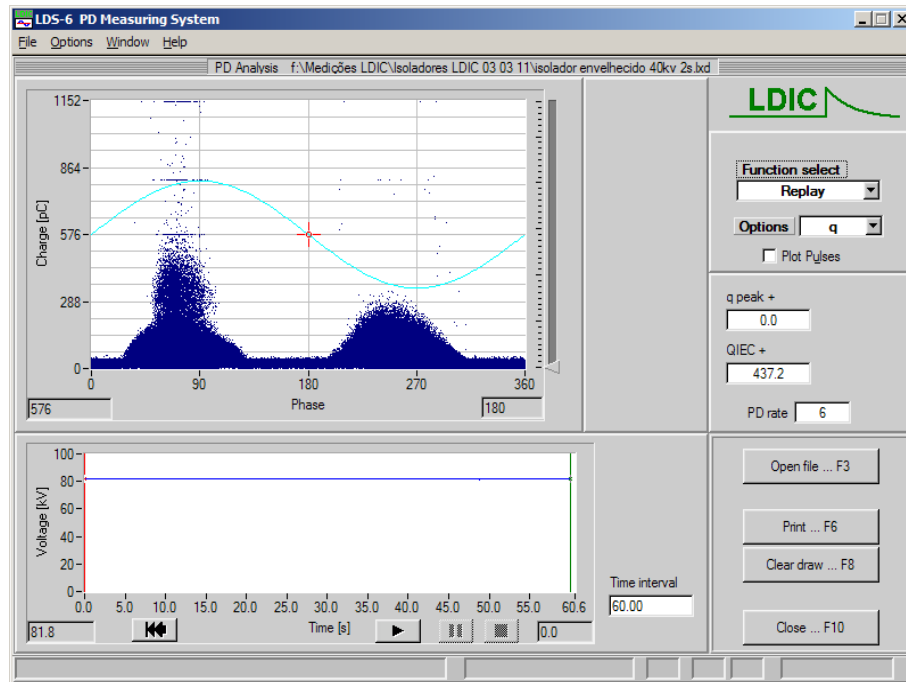


Figura 4.28. Resultados dos ensaios de DP para isolador envelhecido e poluição nível 2.

### III. Isolador com Defeito

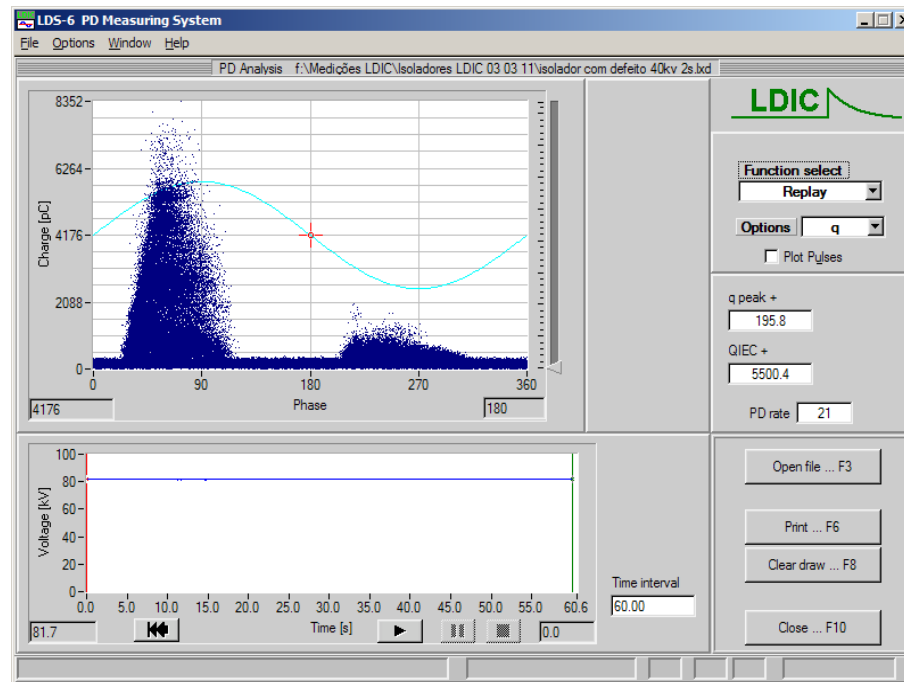
Descargas corona na primeira e na última aleta do isolador foram detectadas com a câmera UV. As descargas corona tiveram uma média de 7.500 pontos/min e 1.500 pontos/min, respectivamente. As imagens UV são ilustradas na Figura 4.29.



Figura 4.29. Imagens detectadas pela câmera UV para isolador com defeito e poluição nível 2.

As descargas parciais chegaram a amplitudes de até 8.352 pC, como ilustrado na Figura 4.30. A maior concentração de descargas ocorreu no semi ciclo positivo, em contraposição as imagens da figura acima que apresentaram mais radiação UV no lado de alta tensão. Neste caso, o isolador apresentou descargas parciais internas que não são perceptíveis através da câmera. Esta capta apenas descargas superficiais provenientes da radiação

ultravioleta. Já as descargas internas devido ao núcleo danificado do isolador ensaiado são medidas através de medições de DP.



**Figura 4.30. Resultados dos ensaios de DP para isolador com defeito e poluição nível 2.**

#### 4.2.2.3. Contaminação Pesada – Condutividade de Suspensão 40 mS/cm

Neste caso, uma contaminação pesada foi utilizada em cada um dos três isoladores, os pulverizado superficialmente com as soluções produzidas adequadamente. Em seguida, medições com câmera UV e detector de DP foram realizadas simultaneamente. As condições ambientais registradas durante o ensaio foram:

- ✓ Pressão atmosférica = 963 mmHg;
- ✓ Temperatura ambiente = 26,4°C;
- ✓ Umidade relativa do ar = 62%.

##### **I. Isolador sem Defeito**

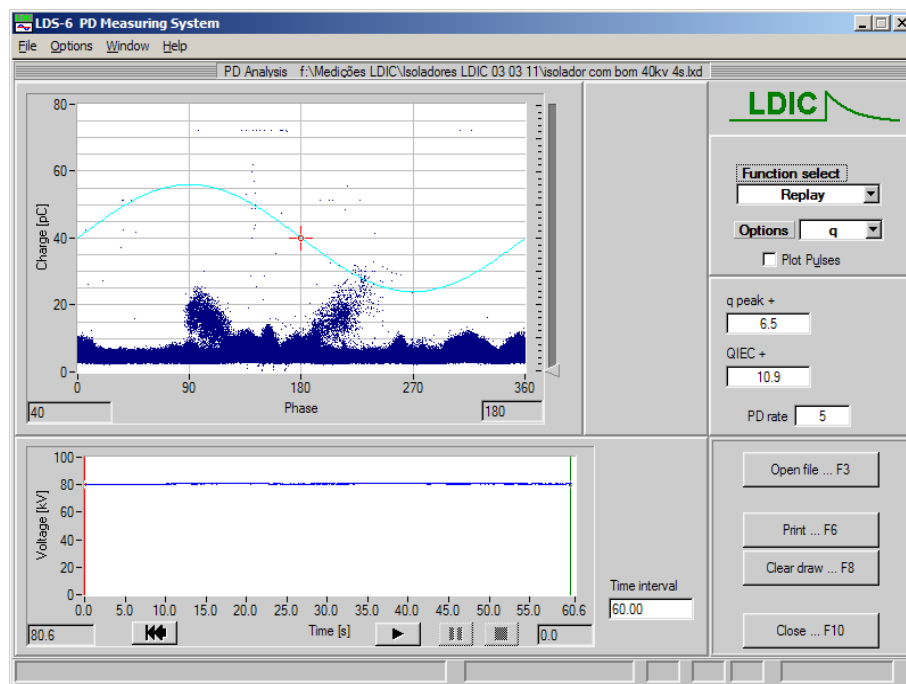
Os resultados das medições com o maior nível de poluição apresentaram o menor número de descargas detectadas pela câmera UV. A queda abrupta da descarga corona detectada ocorreu devido a diminuição da umidade relativa do ar, 14% e 9% em relação aos níveis de poluição 1 e 2, respectivamente. Pequenas concentrações de corona podem ser

visualizadas na primeira e na penúltima aleta do isolador. A média de descargas provenientes do corona foi de 930 pontos/min.



**Figura 4.31.** Imagens detectadas pela câmera UV para isolador sem defeito e poluição nível 3.

As descargas parciais apresentaram um comportamento disperso, indicando pouca atividade do corona. Como ilustrado na Figura 4.32, descargas parciais com níveis máximos de 80 pC e pouca concentração foram detectadas, condizente com os resultados obtidos através da câmera UV.



**Figura 4.32.** Resultados dos ensaios de DP para isolador sem defeito e poluição nível 3.

## II. Isolador Envelhecido

Basicamente não foram observadas atividade de descargas corona para este isolador. A média de descargas foi de 400 pontos/min.



Figura 4.33. Imagem detectada pela câmera UV para isolador envelhecido e poluição nível 3.

As descargas parciais apresentaram um comportamento disperso, indicando poucas descargas provenientes de ruídos ambientes. Como ilustrado na Figura 4.34, descargas parciais com níveis máximos de 80 pC e pouca concentração foram detectadas, condizente com os resultados obtidos através da câmera UV.

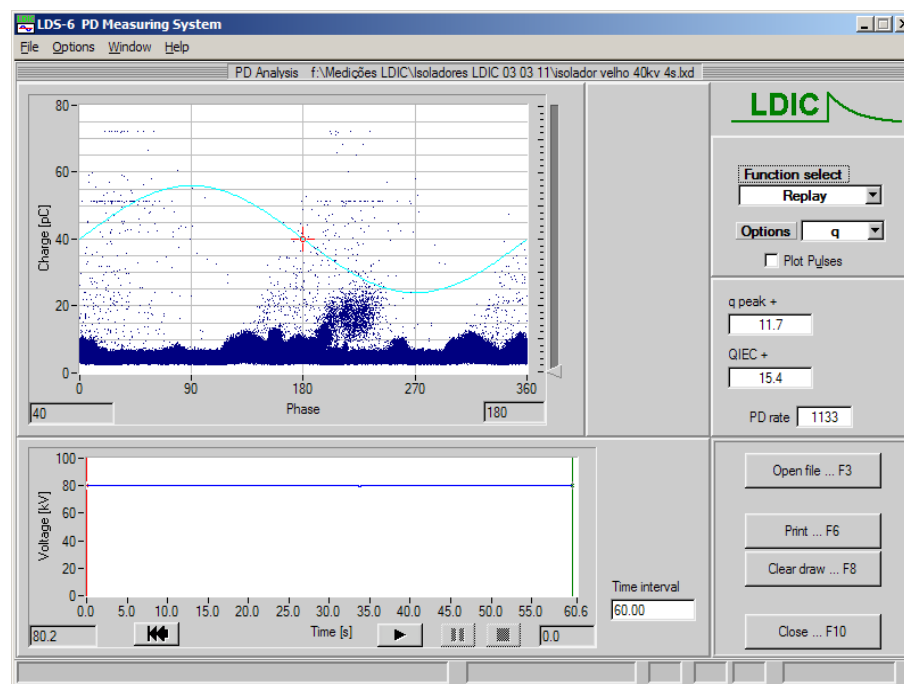


Figura 4.34. Resultados dos ensaios de DP para isolador envelhecido e poluição nível 3.

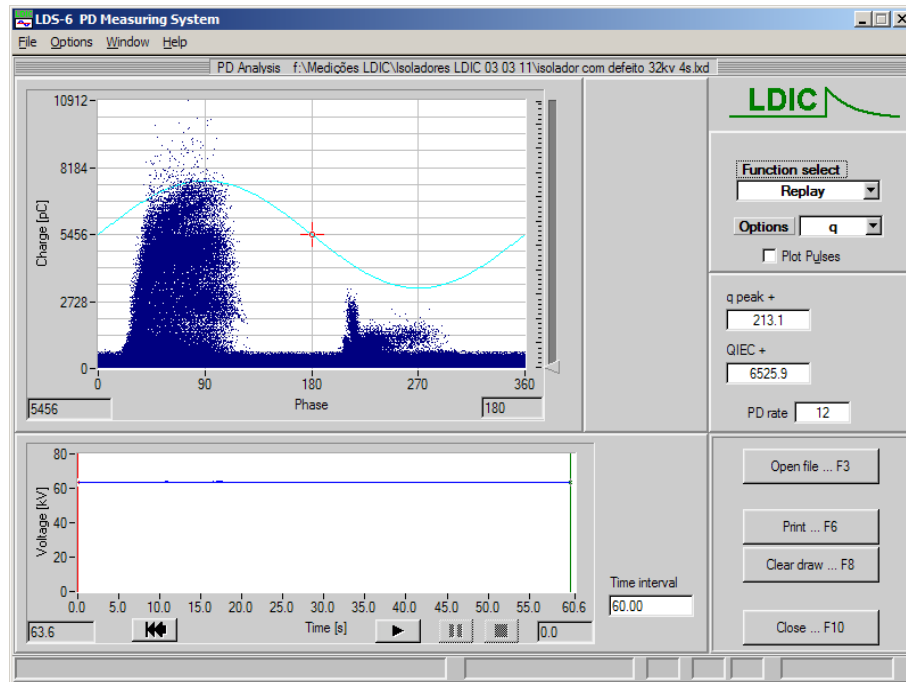
### III. Isolador com Defeito

Descargas corona na primeira aleta do lado de alta tensão e no terminal do isolador foram detectadas com a câmera UV. As descargas corona tiveram uma média de 15.250 pontos/min, como mostrado na Figura 4.35.



**Figura 4.35. Imagem detectada pela câmera UV para isolador com defeito e poluição nível 3.**

As descargas parciais chegaram a amplitudes de até 10.912 pC, como ilustrado na Figura 4.36. A maior concentração de descargas ocorreu no semi ciclo positivo, em contraposição as imagens UV que apresentaram mais radiação UV no lado de alta tensão. Neste caso, o isolador apresentou descargas parciais internas que não são perceptíveis através da câmera UV. Este caso assemelha-se ao isolador com defeito para nível de poluição 2, descrito no item anterior.



**Figura 4.36. Resultados dos ensaios de DP para isolador com defeito e poluição nível 3.**

#### 4.2.2.4. Análise dos Efeitos dos Níveis de Poluição para os Isoladores Poliméricos Escolhidos

Todos os resultados obtidos, câmera UV, descargas parciais e processamento de imagens, estão sintetizados na Tabela 4.15. Dessa forma, será possível correlacionar e analisar os valores medidos de forma simplificada.

Tabela 4.16. Agrupamento dos resultados analisados.

Nível de Poluição	Isoladores Poliméricos	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Câmera UV (pontos/min)	Concentração de píxeis	Descargas Parciais (pC)	
						Média	Máxima
1	Sem defeito	26,6	76	6.000	289	240	316
	Envelhecido	26,6	76	10.300	672	340	620
	Com defeito	26,6	76	9.200 (alta) 9.500 (terra)	413 263	4.600	9.232
2	Sem defeito	25,6	71	14.000	356	2.220	3.232
	Envelhecido	25,6	71	15.000	659	792	1.152
	Com defeito	25,6	71	7.500 (alta) 1.600 (terra)	299 28	5.742	8.352
3	Sem defeito	26,4	62	930	23	20	80
	Envelhecido	26,4	62	230	0	30	80
	Com defeito	26,4	62	15.250	701	6.820	10.912

No nível de poluição 1, atmosfera limpa, as descargas aumentaram gradativamente de acordo com o estado do isolador. Os ensaios com o isolador com defeito apresentou descargas corona proveniente da radiação UV na faixa de 18.700 pontos/min. Visto que este isolador apresentava defeitos internos (núcleo), os sinais de DP detectados chegaram a níveis 14 vezes maiores em comparação com o isolador envelhecido. Enquanto, a contagem de pontos/min da câmera UV e a concentração de píxeis não obtiveram níveis 2 vezes maiores comparando com o isolador envelhecido. Neste caso, descargas parciais internas ocorreram no isolador, as quais não são perceptíveis com a câmera UV. Esta detecta apenas descargas superficiais geradas pela radiação UV.

No nível de poluição 2, contaminação leve, as descargas parciais foram mais intensas no isolador sem defeitos comparando com o isolador envelhecido. Este comportamento não era esperado, pois o isolador envelhecido apresentava ferrugens nas suas conexões e perdas no isolamento, o que deveria gerar mais descargas. O fator que levou a diminuição das descargas foi a aleatoriedade das amplitudes das DP medidas, mesmo quando a intensidade das mesmas aumentava. Já o isolador com defeito apresentou uma contagem de pontos/min da câmera UV e concentração de píxeis menor, em comparação com os isoladores sem defeito e envelhecido. Neste caso, as descargas no isolador com defeito ocorreram internamente

chegando a uma média de DP de 5.742 pC. Assim, as descargas foram medidas apenas através de ensaios de DP, não sendo possível a visualização destas descargas com a câmera UV.

No nível de poluição 3, contaminação pesada, os níveis de pontos/min, concentração de píxeis e DP foram os mais baixos para os isoladores sem defeito e envelhecido. Neste caso, a influência da umidade foi predominante nas medições. Visto que ocorreu uma variação de 14% e de 9% na umidade relativa para os ensaios com nível 1 e nível 2 de poluição, respectivamente. A variação de umidade afetou os ensaios com os isoladores sem defeito e envelhecido para poluição nível 3, pois os mesmos apresentavam descargas corona (superficiais), as quais geram pouca radiação UV para umidades baixas. No caso do isolador com defeito, os sinais de descargas parciais chegaram aos níveis mais altos, visto a ocorrência de descargas internas aumentadas devido à contaminação pesada utilizada na pulverização do isolador.

O isolador sem defeitos apresentou descargas maiores em termos de contagem de pontos/min e amplitude, quanto maior foi o nível de poluição empregado. Salvo o caso de poluição nível 3, onde obteve-se umidade relativa de 62%.

O mesmo caso anterior aconteceu para o isolador envelhecido, os níveis de descargas aumentaram para níveis de poluição mais pesados. Mas, as descargas diminuíram bruscamente com a queda da umidade para o nível de poluição mais pesado.

Comparando os ensaios realizados com o isolador com defeitos, as medições de corona foram coerentes. Os níveis de corona aumentaram de acordo com o nível de poluição, mesmo com as grandes variações de umidade. A média das descargas parciais também aumentou com o aumento da poluição. Neste caso, o isolador apresentava uma grande degradação do núcleo e do isolamento externo, provocando muitas descargas mesmo com a umidade relativa caindo 14% entre medições com diferentes níveis de poluição.

No Capítulo 4 foi possível analisar o comportamento das descargas geradas por três tipos de eletrodos e isoladores poliméricos. O comportamento das descargas medidas forneceu subsídios para as conclusões que serão descritas no próximo capítulo.



## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi estudado o efeito corona em eletrodos e isoladores poliméricos através de ensaios com câmera ultravioleta e com detector digital de descargas parciais, com o objetivo de quantificar o corona para diagnóstico de isoladores defeituosos. Uma técnica de processamento de imagens UV foi proposta, ainda em fase de aperfeiçoamento, apresentando resultados promissores. Foi evidenciada que a concentração de píxeis relativa ao corona aumentou, proporcionalmente, de acordo com o aumento da contagem de pontos/min da câmera UV. A vantagem do método de processamento de imagens UV é a eliminação do ruído ambiente, possibilitando inspeções de corona em campo com mais eficiência.

Devido à utilização de configurações eletrodo-plano com campos não uniformes algumas medições foram efetuadas. As tensões na iminência de ruptura são difíceis de serem quantificadas, tanto com a câmera UV quanto com ensaios de DP. Quando a configuração é ponta-plano, devido à presença mais significativa das cargas espaciais foi possível realizar as medições.

Experimentos foram projetados e realizados com o intuito de se analisar o efeito da distância da câmera ao objeto de teste. Foi evidenciada que a distância da câmera UV ao objeto de teste é um fator decisivo com relação ao nível de descargas corona captadas. Ensaios, testes ou monitoramentos utilizando câmeras de UV devem informar a distância da sua execução.

Experimentos foram projetados e realizados com o intuito de se avaliar o ganho da câmera UV. Os resultados evidenciam uma região linear, entre 120 e 160, a qual é recomendada para campanhas de medição. Nesta região, evidenciou-se que o ganho UV é o mais independente da contagem de pontos/min. Ganhos UV abaixo ou acima desta faixa de valores situam-se em regiões de saturação.

Os experimentos implementados em laboratório evidenciam que a umidade é um fator determinante na inspeção de isoladores defeituosos com câmera UV.

O comportamento da curva de concentração de píxeis de corona versus a tensão aplicada, variando-se a distância, apresentou o mesmo perfil da contagem de ponto/min, validando o processamento de imagens proposto para quantificação do corona.

Os resultados com as três amostras de isoladores poliméricos (sem defeito, envelhecido e com defeito) evidenciam o aumento de descargas detectadas com o aumento do estado de degradação dos mesmos, mantendo-se a umidade relativa com variações menores que 5%.

Os experimentos implementados, em laboratório, para os três isoladores com diferentes níveis de poluição, evidenciam o aumento das descargas detectadas com o aumento da poluição, conforme o ESDD aplicado. Porém, grandes variações de umidade afetaram os resultados para o caso de poluição nível 3, os quais evidenciaram uma diminuição das descargas em relação aos níveis de poluição 1 e 2. Assim, a variação da umidade relativa pode induzir a erros de análise de defeitos de isoladores.

Este trabalho de pesquisa pode ser considerado pioneiro, porém incipiente, na quantificação do corona com respeito ao diagnóstico de isoladores com defeitos. Os ensaios, as suas análises e conclusões mostram que com o monitoramento periódico dos isoladores é possível constatar a evolução do estado de degradação e níveis de poluição dos mesmos se condições de monitoramento são obedecidas.

## **Trabalhos Futuros**

Como motivação para continuidade do trabalho, sugere-se:

- ✓ Realizar medições em campo com a câmera UV para obtenção de resultados na prática, em linhas vivas;
- ✓ Aumentar o banco de dados, utilizando ensaios laboratoriais e medições em campo de isoladores poliméricos de outras classes;
- ✓ Implementar uma curva de correção de umidade para diagnosticar isoladores poliméricos defeituosos, realizando ensaios com diferentes umidades;
- ✓ Implementar uma curva de correção da distância entre câmera UV e ponto de observação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, M. P. Processamento de Imagens: Métodos e Análises. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT. Rio de Janeiro - Brasil. Disponível na internet via URL: <http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF>. Data de acesso: 13 de julho de 2010.

ARORA, R.; MOSCH, W. High Voltage Insulation Engineering. New Age International Publishers, 1995.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. Engineering Dielectrics – Corona Measurement and Interpretation. Vol. I, Philadelphia: ASTM Special Technical Publication SPT 669, 1979.

COSTA, E. G.; NEVES, W. L. A. Guia de Experimento: Descargas Parciais. Universidade Federal de Campina Grande. Dezembro, 1996.

EPRI – Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above. Fred Weidner & Son Printers, Inc., New York, NY, USA, 1975.

FERREIRA, T. V. Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

GIANELLI, B. F. Caracterização do Efeito Corona em Isoladores Poliméricos do Tipo Bastão Submetidos à Poluição Salínica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências, 2008.

GOLDMAN, M.; SIGMOND, R.S. Corona and Insulation. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 17, N<sup>o</sup> 2. April 1982.

HACKAM, R. Outdoor HV Composite Polymeric Insulators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 6 N<sup>o</sup> 5, pp. 557-585, October 1999.

HALL, J.F. History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.: 8, Issue: 1, Jan. 1993. Pages: 376 – 385.

IEC 60270. High-voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements. IEC. 2000.

IEC 60507. Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to Be Used on A.C. Systems, Second Edition, 1991.

KIKUCHI, T.; NISHIMURA, S.; NAGAO, M.; IZUMI, K.; KUBOTA, Y.; SAKATA, M. Survey on the Use of Non-ceramic Composite Insulators IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.: 6, Issue: 5, Oct. 1999. Pages 548 – 556.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.; KUFFEL, J. High Voltage Engineering: Fundamentals. Second Edition 2000.

LEMKE DIAGNOSTICS GmbH. User Manual: DIGITAL PARTIAL DISCHARGE MEASURING SYSTEM LDS-6. Germany.

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J.M.; PHILLIPS, A.J. Daylight Corona Discharge Imager. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. N<sup>o</sup> 467), Vol.: 4, 23-27 Aug. 1999 Pages: 349 - 352.

LINDNER, M. Third UV Inspection User's Group Meeting. Orlando, Florida, USA. February 11-13, 2004.

NBR 6940. Técnicas de Ensaio Elétricos em Alta Tensão – Medição de Descargas Parciais. ABNT, 1981.

NIGRI, A. I. Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção. XV-SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1999.

NATRASS, D. A. Partial Discharge Measurement and Interpretation. IEEE Electrical Insulation - Magazine, 1988, May / June, Vol. 4. No.3.

NERI, M. G. G. Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

PINNANGUDI, B. M.; GORUR, R. S.; KROES, A. J. Energy Quantification of Corona Discharges on Polymeric Insulators. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.

SOUZA, A. L. Estudo de Modelos para Definição de um Critério de Início de Corona Através da Análise de Experimentos e Simulações. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

TIPLER, P. Física. Editora Guanabara Koogan S.A. Vol. 4, 3º edição, 1995.

VOSLOO, W. L.; MACEY, R. E.; TOURREIL, C. The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators. Eskom, 2006.

WENJUN, Z.; JIANBIN, W.; MINGHUA, M.; BIN, M.; XIAO, Y. Research on Quantification of AC Corona Discharge Intensity of Rod-Plane Gap Based on UV Digital Image Processing. Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific.