



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

MARCUS TULIUS BARROS FLORENTINO

**CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE
ISOLADORES POLIMÉRICOS USANDO ATRIBUTOS DAS
DESCARGAS CORONA**

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Setembro de 2019

MARCUS TULIUS BARROS FLORENTINO

Tese de Doutorado:

**CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE
ISOLADORES POLIMÉRICOS USANDO ATRIBUTOS DAS
DESCARGAS CORONA**

*Trabalho de Tese apresentado ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Doutor em Ciências, no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Orientador

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Setembro de 2019

F633c

Florentino, Marcus Tullius Barros.

Caracterização das condições operacionais de isoladores poliméricos usando atributos das descargas corona / Marcus Tullius Barros Florentino. - Campina Grande, 2019.

151 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Engenharia Elétrica e Informática, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira.

Referências.

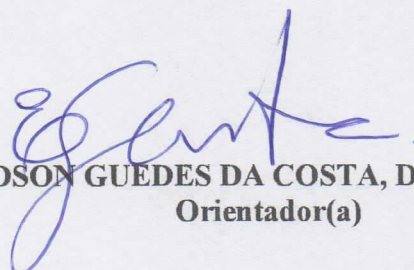
1. Câmera Ultravioleta. 2. Descargas Corona. 3. Isoladores Poliméricos. 4. Inspeção Visual. 5. Processamento Digital de Imagens. I. Costa, Edson Guedes da. II. Ferreira, Tarso Vilela. III. Título.

CDU 621.3(043)

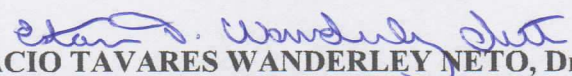
**"CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE ISOLADORES
POLIMÉRICOS USANDO ATRIBUTOS DAS DESCARGAS CORONA"**

MARCUS TULIUS BARROS FLORENTINO

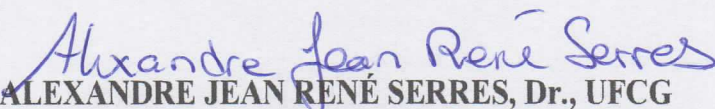
TESE APROVADA EM 23/09/2019

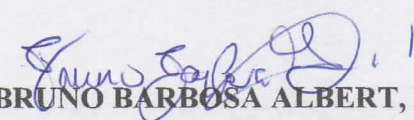

EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)

TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFS
Orientador(a)


ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO, Dr., UNIFEI
Examinador(a)

IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES, Ph.D., UFMG
Examinador(a)


ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, Dr., UFCG
Examinador(a)


BRUNO BARBOSA ALBERT, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Dedico este trabalho aos meus pais, que são meus maiores professores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Jesus pela oportunidade da existência.

Aos meus pais, Cícero e Rita, por me ensinarem a ter, acima de tudo, princípios e valores que me guiam durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos, Mariana e Vinícius, por sempre estarem juntos de mim e por terem caminhado à minha frente me ensinando a desbravar a vida.

A minha amada esposa Ádriah, que é a minha alma gêmea e que me ensina sobre amor e respeito todos os dias.

Aos meus familiares e amigos, pelo carinho que me guardam e pela torcida que sempre me estimulou a seguir em frente.

Aos meus orientadores, professores Edson e Tarso, pela amizade e confiança depositada em mim desde a graduação e por me direcionarem ao ofício de professor.

Aos professores Roberto, Waslon, André, George e Damásio, por todo o apoio.

Aos membros da Banca, que com suas recomendações contribuíram para o encaminhamento da pesquisa.

Aos colegas Jalberth, Kal-El, Bruno, Marconni, Raphael, Filipe, Adriano, George, Lidja, Antônio, Pedro, Arthur, Henrique e aos professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão pela gentileza de sempre e por dividirem comigo as horas de trabalho, certamente mais alegres em suas companhias.

Aos amigos e colegas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em especial os professores Paulo Fábio e Teófilo, que me apoiaram e me estimularam, mesmo nos momentos de minha ausência nestes últimos três anos.

À CHESF e à CAPES pelo suporte ao trabalho.

A todos, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um método de avaliação das condições operacionais de isoladores poliméricos com foco na caracterização das descargas corona usando atributos extraídos de imagens ultravioletas (UV). Para tanto, campanhas de medição e captação das imagens UV foram realizadas em laboratório, em diversos arranjos, utilizando a câmera de detecção UV *Daycor II*, e, simultaneamente, os sinais das descargas parciais foram medidos e captados usando o método clássico da IEC 60270. Com a finalidade de seguir critérios metodológicos de inspeção, os parâmetros de captação da câmera UV foram estabelecidos com base em aproximações. Além disso, a sensibilidade dos principais atributos das imagens UV à variação linear dos parâmetros de captação da câmera foi avaliada, de forma a comparar quais atributos são mais ou menos sensíveis às condições de captação. Durante o processamento digital das imagens UV, foram avaliados os seguintes atributos, como referência: a área da fâcula integrada no intervalo de captação, a distribuição média de píxeis/quadro da imagem, a persistência da fâcula, o número de objetos/quadro e o mapa de persistência. Além destes atributos, a contagem de fótons/minuto apresentada pela câmera também foi avaliada. Os atributos das imagens foram correlacionados com os atributos estatísticos dos pulsos de descargas corona e essas correlações foram abordadas no sentido de caracterizar o comportamento dos isoladores poliméricos sob diversas condições de poluição, umidade e defeitos. Foi possível obter correlações seguras entre os atributos da descarga corona, tanto da imagem quanto dos pulsos, e as condições operacionais dos isoladores, de forma que a quantificação das descargas corona podem ser realizadas com o auxílio da parametrização das imagens UV.

Palavras-chave: câmera ultravioleta, descargas corona, isoladores poliméricos, inspeção visual, processamento digital de imagens.

ABSTRACT

This work presents a method for evaluating the operational conditions of polymeric insulators, focusing on the characterization of corona discharges using attributes extracted from ultraviolet (UV) images. For this purpose, measurement campaigns and UV images capturing were carried out in laboratory, in various arrangements, using the Daycor II UV detection camera, and, simultaneously, the partial discharges signals were measured and captured using the IEC 60270 classical method. In order to comply with inspection methodological criteria, the UV camera's capture parameters were established based on approximations. In addition, the sensitivity of the main attributes of UV images to the linear variation of the camera's capture parameters was evaluated in order to compare which attributes are more or less sensitive to capture conditions. During the digital UV image processing, the following attributes were evaluated as reference: the area of the faculae integrated in the capture interval, the mean pixels/frame distribution of the image, the persistence of the faculae, the number of objects/frame and the persistence map. In addition to these attributes, the photon counting rate presented by the camera was also evaluated. The image attributes were correlated with the statistical attributes of corona discharge pulses and these correlations were addressed in order to characterize the behavior of polymeric insulators under various conditions of pollution, humidity and defects. It was possible to obtain safe correlations between the attributes of corona discharge, both of the image and pulses, and the operational conditions of the insulators, so that the quantification of corona discharges can be performed using the parameterization of UV images.

Keywords: corona discharges, digital image processing, polymeric insulators, visual inspection, ultraviolet camera.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. Fotografias de isoladores poliméricos com: (a) erosão do revestimento polimérico do núcleo, (b) perfuração do revestimento polimérico do núcleo, (c) rachaduras no revestimento polimérico do núcleo, (d) fratura frágil do núcleo, (e) trilhamento do núcleo e (f) oxidação da ferragem.	17
Figura 2.1. Fotografia das Figuras de Lichtenberg com polaridade (a) positiva e (b) negativa. (Fonte: LICHTENBERG, 1778).....	25
Figura 2.2. Fotografia das Figuras de Lichtenberg em polaridades e níveis de tensão distintos. (Fonte: LEE & FOUST, 1927)	26
Figura 2.3. Funções de distribuição de Maxwell-Boltzmann do gás nitrogênio para diferentes temperaturas. (Fonte: adaptado de HALLIDAY <i>et al.</i> , 2009)	27
Figura 2.4. Comportamento da corrente em função da tensão em um processo de ionização como descrito por Townsend. (Fonte: adaptado de KUFFELL, 2000).....	29
Figura 2.5. Curva de Paschen – tensão de ruptura <i>versus</i> característica <i>pd</i> em um campo uniforme.	33
Figura 2.6. Regiões de manifestação das descargas corona do ponto de vista da onda de tensão. (Fonte: próprio autor).....	35
Figura 2.7. Esquema construtivo mostrando as principais partes de um isolador polimérico. (Fonte: adaptado de ORIENT POWER, 2017)	36
Figura 2.8. Comparação entre isoladores com diferentes materiais e condições de envelhecimento em relação à tensão de <i>flashover</i> e a ESDD. (Fonte: adaptado de GORUR <i>et al.</i> , 1999).....	38
Figura 2.9. Contato de uma gota de água em uma superfície hidrofóbica em A e em uma superfície hidrofílica em B. (Fonte: adaptado de AMIN <i>et al.</i> , 2007)	39
Figura 2.10. (a) Exemplos típicos de superfícies com classes de hidrofobicidade HC 1 até HC 6 (Fonte: STRI, 1992), (b) Reprodução das classes de hidrofobicidade com superfícies molhadas por concentrações distintas de álcool isopropílico e água. (Fonte: adaptado de THOMAZINI <i>et al.</i> , 2008).....	40
Figura 2.11. Espectro eletromagnético da radiação solar e corona. (Fonte: adaptado de UVIRCO TECHNOLOGIES, 2017)	47
Figura 2.12. Diagrama esquemático do princípio de funcionamento da câmera DAYCOR II. (Fonte: adaptado de LINDNER, 2004).....	48
Figura 2.13. (a) Espaço bidimensional de uma imagem digital M x N. (b) Representação em 3D de uma imagem digital. (Fonte: próprio autor)	51
Figura 2.14. Imagem decomposta em RGB. (Fonte: próprio autor).....	51
Figura 2.15. Representação de imagem (a) binária e em (b) escala de cinza. (Fonte: próprio autor)	51
Figura 2.16. (a) Representação da vizinhança-4 de um pixel. (b) Representação da vizinhança-8 de um pixel. (Fonte: próprio autor)	52
Figura 3.1. Comportamento da área da descarga corona na imagem UV em função da variação da umidade relativa do ar e do nível de ESDD. (Fonte: Lu <i>et al.</i> , 2010)	61
Figura 3.2. Contagem de pontos UV por minuto <i>versus</i> variação do ganho UV da câmera. (Fonte: BARROS, 2011).....	62
Figura 3.3. Relação entre a área da descarga (em píxeis) e a magnitude da descarga (em pC). (Fonte: WANG <i>et al.</i> , 2014)	64
Figura 4.1 Procedimentos e abordagens realizados no trabalho. (Fonte: próprio autor)	73
Figura 4.2. Fotografia do modelo de placa de captura utilizado com solução para melhoria da resolução da imagem captada pela câmera UV. (Fonte: próprio autor)	75
Figura 4.3. Processo de segmentação das imagens por meio da aplicação de limiar de intensidade de pixel. (Fonte: próprio autor)	77
Figura 4.4. Processo de integração das fâculas. (Fonte: próprio autor)	78
Figura 4.5. Processo de segmentação para obtenção do mapa de persistência. (Fonte: próprio autor)	79

Figura 4.6. Processo de segmentação para se obter a região principal de análise e extração de atributos. (Fonte: próprio autor)	80
Figura 4.7. Representação do arranjo experimental empregado na medição de DP. (Fonte: adaptado de IEC 60270, 2000)	82
Figura 4.8. Diagrama esquemático do arranjo experimental para parametrização da câmera DAYCOR II. (Fonte: adaptado de IEC 60270).....	84
Figura 4.9. (a) Fotografia do isolador polimérico Rodurflex® de 230 kV. (b) Características dimensionais do isolador polimérico. (Fonte: adaptado de FERREIRA, 2007).....	86
Figura 4.10. (a) Fotografia do arranjo experimental e (b) fotografia do arranjo ponta-plano com gap de 30 mm. (Fonte: próprio autor)	88
Figura 4.11. Fotografia da câmera UV apontada para a o arranjo ponta-plano. (Fonte: próprio autor)	90
Figura 4.12. Diagrama esquemático do circuito de energização para captação das imagens do isolador polimérico. (Fonte: próprio autor)	92
Figura 4.13. Diagrama do anel equalizador A158 e suas características dimensionais. (Fonte: FERREIRA, 2007).....	92
Figura 4.14. Condições do isolador para os ensaios em laboratório: (a) limpo e seco, (b) molhado com água limpa e (c) poluído e (d) modelo de pulverizador utilizado. (Fonte: próprio autor)	94
Figura 4.15. Arranjo experimental das medições com o isolador IPB 230/CB/160/EAP/73. (Fonte: adaptado de IEC60270, 2000)	94
Figura 5.1. Relação de calibração para obtenção dos picos de DP. (Fonte: próprio autor)	99
Figura 5.2. Pulsos das descargas parciais em função da fase da tensão aplicada de: (a) 19 kV; (b) 21 kV; (c) 23 kV e (d) 25 kV. (Fonte: próprio autor).....	99
Figura 5.3. Comportamento médio da magnitude das descargas em função da tensão aplicada ao arranjo. (Fonte: próprio autor)	100
Figura 5.4. Representações das imagens captadas no experimento do arranjo ponta-plano a: (a) 19 kV; (b) 21 kV; (c) 23 kV e (d) 25 kV; e os resultados da integração das fâculas sobreposto à imagem do arranjo em (e) 19 kV; (f) 21 kV; (g) 23 kV e (h) 25 kV. (Fonte: próprio autor).....	101
Figura 5.5. Curvas do comportamento da contagem de fótons/minuto da câmera em função do ganho (<i>g</i>) UV para distância de 7,5 m e as diferentes tensões de ensaio. (Fonte: próprio autor).....	102
Figura 5.6. Comportamento da contagem de fótons/minuto da câmera em função da distância para o ganho UV 130 e as diferentes tensões de ensaio. (Fonte: próprio autor).....	105
Figura 5.7. Comportamento médio da contagem de fótons por minuto em função da variação da (a) tensão e da (b) magnitude das descargas. (Fonte: próprio autor).....	106
Figura 5.8. Comportamento médio da área das descargas captadas a 3,5 m, em função do ganho UV, para as tensões adotadas: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV. (Fonte: próprio autor)	107
Figura 5.9. Comportamento da área da fâcula em função da distância de captação para o ganho UV 250 e para cada uma das tensões aplicadas: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV. (Fonte: próprio autor).....	108
Figura 5.10. Comportamento médio da área da região principal em função da variação da tensão e da magnitude das descargas. (Fonte: próprio autor).....	110
Figura 5.11. Comportamento da distribuição média de píxeis/quadro (em p.u.) em função do ganho UV para os níveis de tensão de 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV para a distância de 7,5 m. (Fonte: próprio autor)	111
Figura 5.12. Comportamento da distribuição média de píxeis (em p.u.), em função da distância de captação, para as tensões 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV, para o ganho UV 230. (Fonte: próprio autor) .	112
Figura 5.13. Comportamento da distribuição média de píxeis/quadro em função da (a) tensão e da (b) magnitude das descargas. (Fonte: próprio autor).....	114
Figura 5.14. Comportamento da persistência em função da variação linear do ganho UV para a medição a 7,5 m e para os diferentes níveis de tensão aplicados: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV (Fonte: próprio autor)	114
Figura 5.15. Comportamento da persistência da descarga (em p.u.), em função da distância de captação, para as tensões: (a) 19 kV, (b) 21 kV, (c) 23 kV e (d) 25 kV, para o ganho UV 170. (Fonte: próprio autor)	116

Figura 5.16. Comportamento da persistência em função da (a) tensão aplicada e da (b) magnitude média das descargas. (Fonte: próprio autor)	117
Figura 5.17. Parâmetros obtidos no processamento das imagens UV: (a) contagem de fótons/minuto, (b) área F em píxeis, (c) persistência da fâcula e (d) distribuição média de píxeis. (Fonte: próprio autor)....	122
Figura 5.18. Parâmetros das imagens UV normalizados e agrupados para caracterizar o comportamento de cada um dos isoladores. (Fonte: próprio autor)	122
Figura 5.19. Pulsos de descargas em função da fase da tensão em diferentes condições de ensaio: (a) 1 - limpo e seco; (b) 2 - molhado com água limpa; (c) 3 - contaminação muito leve; (d) 4 - contaminação pesada e (e) 5 - contaminação muito pesada. (Fonte: próprio autor)	124
Figura 5.20. Comparativo entre os parâmetros estatísticos, no semiciclo positivo, para cada situação de ensaio. (Fonte: próprio autor)	126
Figura 5.21. Comparativo entre os parâmetros estatísticos, no semiciclo negativo, para cada situação de ensaio. (Fonte: próprio autor)	127
Figura 5.22. Comparativo entre os atributos da imagem UV para cada situação de ensaio. (Fonte: próprio autor)	128
Figura 5.23. Fotografias do (a) isolador modelo IPB 230/CB/160/EAP/73 e (b) anel equalizador 230 kV recomendado pelo fabricante. (Fonte: adaptado de BALESTRO, 2019)	129
Figura 5.24. Correlação entre o comportamento da magnitude dos pulsos de descarga e a área da fâcula ao longo do tempo para o (a) isolador 06 e (b) isolador 10, na condição de limpos e secos. (Fonte: próprio autor)	131
Figura 5.25. Correlação entre o comportamento da magnitude dos pulsos de descarga e a persistência ao longo do tempo para o (a) isolador 06 e (b) isolador 10, na condição de limpos e secos. (Fonte: próprio autor)	131
Figura 5.26. Correlação entre o comportamento do número de pulsos de descarga e do número de fâculas ao longo do tempo para o (a) isolador 05 e (b) isolador 10, na condição de limpos e secos. (Fonte: próprio autor)	132
Figura 5.27. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela área da fâcula. (Fonte: próprio autor)	133
Figura 5.28. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela área da fâcula visto em detalhe. (Fonte: próprio autor).....	133
Figura 5.29. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela persistência. (Fonte: próprio autor)	134
Figura 5.30. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela persistência visto em detalhe. (Fonte: próprio autor)	134
Figura 5.31. Mapas de persistência representando a intensidade, a recorrência e a localização das descargas corona na imagem UV para o (a,b) Isolador 01, (c,d) Isolador 09, (e,f) Isolador 05, (g,h) Isolador 06 e (i,j) Isolador 10. (continua) (Fonte: próprio autor).	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Critérios e descrições das classes de hidrofobicidade estabelecidos pelo STRI. (Fonte: adaptado de STRI, 1992).	40
Tabela 2.2. Testes para controle de qualidade de isoladores de acordo com as normas IEC 61109 e IEC 62217. (Fonte: adaptado de IEC 61109, 2008; e IEC 62217, 2012).	42
Tabela 2.3. Critérios de ação para a inspeção visual de isoladores poliméricos em campo. (Fonte: adaptado de EPRI, 2006).	46
Tabela 2.4. Exemplos de defeitos em isoladores poliméricos. (Fonte: adaptado de EPRI, 2006 e DOMINGUES, 2012).	46
Tabela 3.1. Resumo das principais contribuições citadas na Revisão Bibliográfica.	70
Tabela 4.1. Características mecânicas dos isoladores poliméricos utilizados nos ensaios. (Fonte: LAPP Insulators, 2017; Balestro, 2019).	87
Tabela 4.2. Caracterização da inspeção visual. (Fonte: próprio autor)	87
Tabela 4.3. Características de ESDD das soluções. (Fonte: adaptado de IEC 60507, 1991; FERREIRA, 2011).	93
Tabela 4.4. Isoladores com e sem defeito e suas correspondentes classificações. (Fonte: próprio autor) ..	96
Tabela 5.1. Parâmetros das descargas medidos em cada um dos níveis de tensão para o eletrodo ponta-plano.	99
Tabela 5.2. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para a contagem de fótons/minuto. (continua) (Fonte: próprio autor)0	103
Tabela 5.3. Parâmetros de aproximação da distância de captação para a contagem de fótons/minuto. (Fonte: próprio autor)	105
Tabela 5.4. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para a formação da área da fâcula ...	108
Tabela 5.5. Parâmetros de aproximação da distância de captação para a área da fâcula. (Fonte: próprio autor)	110
Tabela 5.6. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para o comportamento da distribuição média de pixels/quadro. (Fonte: próprio autor)	111
Tabela 5.7. Parâmetros de aproximação da distância de captação para o comportamento da distribuição média de pixels/quadro. (Fonte: próprio autor)	113
Tabela 5.8. Parâmetros de aproximação do ganho UV para o cálculo da persistência. (Fonte: próprio autor)	115
Tabela 5.9. Parâmetros de aproximação da distância para o cálculo da persistência. (continua) (Fonte: próprio autor).	116
Tabela 5.10. Resultados para a inspeção visual de defeitos. (Fonte: próprio autor)	120
Tabela 5.11. Atributos extraídos das imagens UV. (Fonte: próprio autor)	121
Tabela 5.12. Atributos obtidos pela análise estatísticas dos pulsos de descargas parciais. (Fonte: próprio autor)	125
Tabela 5.13. Atributos obtidos pelo processamento digital de imagens. (Fonte: próprio autor)	125
Tabela 5.14. Resultados dos cálculos dos graus de recorrência dos isoladores. (Fonte: próprio autor) ...	137
Tabela 6.1. Publicações do autor correlatas à pesquisa.	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standard Institute</i> (Instituto Nacional Americano de Normalização)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
BNC	<i>Bayonet Neill Concelman connector</i> (Conector BNC)
°C	graus Celsius
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
cm	centímetro
CSA	<i>Canadian Standard Association</i> (Associação Canadense de Normalização)
DP	Descarga(s) parcial(is)
DSLR	<i>Digital Single-Lens Reflex</i> (Reflexo digital de lente única)
<i>e</i>	exponencial
EPDM	Etileno Propileno Dieno
EPR	Etileno Propileno
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i> (Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica)
ESDD	<i>Equivalent Salt Deposit Density</i> (Densidade equivalente do depósito de sal)
fps	<i>frames</i> por segundo
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero de fibra reforçada)
HC	<i>Hydrophobicity Class</i> (Classe de hidrofobicidade)
HTV	<i>High Temperature Vulcanizing</i> (Vulcanização de Alta Temperatura)
ICCD	<i>Intensified Charge Coupled Device</i> (Dispositivo de carga acoplada intensificada)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)

kV	quilovolt
kVA	quilovoltampère
kΩ	quiloohm
MΩ	megaohm
m	metro
mbar	milésimo de bar – unidade de pressão
mg	miligrama
mm	milímetro
<i>mpeg-2</i>	<i>Moving Picture Experts Group/ISO 2</i> (Grupo de Especialistas em Imagens em Movimento)
MSa	<i>megasamples</i> (amostras)
MSa/s	<i>megasamples/segundo</i>
mV	milivolt
nC	nanocoulomb
nm	nanômetro
NTSC	<i>National Television System Committee</i> (Comitê do Sistema Nacional de Televisão)
PAL	<i>Phase Alternating Line</i> (Linha de Alternância de Fase)
pC	picocoulomb
RCA	<i>Radio Corporation of America</i> (Corporação de Rádio da América)
RGB	<i>red, green, blue</i> (vermelho, verde, azul)
RNA	Redes Neurais Artificiais
RTV	<i>Room Temperature Vulcanizing</i> (Vulcanização à temperatura ambiente)
s	segundo(s)
STRI	<i>Swedish Transmission Research Institute</i> (Intituto Sueco de Pesquisa sobre Transmissão)
TIC	Tensão de Início de Corona
TR	Tensão de Ruptura
URA	Umidade Relativa do Ar
UV	Ultravioleta
YCbCr	Vídeo Componente Luminância

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa - Primeiro coeficiente de Townsend
γ	Gama - Segundo coeficiente de Townsend
δ	Delta - Fator de densidade do ar a 25 °C e a 760 mmHg
θ	Teta - Ângulo de contato
μ	Mi - Valor médio para o cálculo da assimetria
π	Pi - Constante 3,14159...
σ	Sigma - Variância para o cálculo da assimetria
φ	Fi - Fluxo luminoso
Ω	Ômega – Unidade de resistência que representa Ohm.
\ominus	Erosão
\oplus	Dilatação
$A \in B$	A pertence a B
$A \subseteq B$	A é um subconjunto de B
$A \subset B$	A é um subconjunto de B
$A \cap B$	A interseção B
\forall	Para todo
$^\circ$	Símbolo para graus

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Delimitação do Tema	15
1.2	Relevância do Tema	18
1.3	Motivação	20
1.4	Objetivos	22
1.5	Principais Contribuições da Pesquisa	23
1.6	Organização do Texto	23
2	Fundamentação Teórica	25
2.1	Descargas em Gases	25
2.2	Isoladores Poliméricos	36
2.3	Captação e Processamento de Imagens UV	47
2.4	Síntese da Fundamentação Teórica	55
3	Revisão Bibliográfica	56
3.1	Métodos de Parametrização da Imagem UV Aplicados ao Diagnóstico de Isoladores	57
3.2	Síntese da Revisão Bibliográfica	71
4	Procedimentos e Abordagens Práticas	72
4.1	Captação das Descargas Corona	73
4.2	Processamento Digital de Imagens	75
4.3	Medição de Descargas Parciais	81
4.4	Extração de Atributos dos Sinais de Descargas Parciais	84
4.5	Inspeção Visual para Detecção de Defeitos	86
4.6	Abordagem 1: determinação dos parâmetros de captação da câmera UV	87
4.7	Abordagem 2: correlação entre os atributos da imagem e a classificação visual	91
4.8	Abordagem 3: correlação entre os atributos da imagem e das descargas corona	93
4.9	Abordagem 4: correlação entre os atributos da imagem e das descargas corona e os defeitos de isoladores	95
4.10	Síntese dos Procedimentos e Abordagens Práticas	97
5	Resultados e Discussões	98
5.1	Abordagem 1: determinação dos parâmetros de captação da câmera UV	98
5.2	Abordagem 2: correlação entre os atributos da imagem e a classificação visual	119
5.3	Abordagem 3: correlação entre os atributos da imagem e das descargas corona	124
5.4	Abordagem 4: correlação entre os atributos da imagem e das descargas corona e os defeitos de isoladores	130
5.5	Síntese dos Resultados e Discussões	138
6	Conclusões	139
6.1	Perspectivas para Continuação da Pesquisa	141
6.2	Publicações	142
	Referências	143

1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo será introduzido o tema desta tese, com a finalidade de delimitá-lo, apresentar sua relevância e as motivações da pesquisa. Por fim, será apresentado o objetivo geral da tese, bem como, os objetivos específicos, as contribuições da tese e a organização do texto.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Conforme estabelece a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as empresas concessionárias de transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional são responsáveis pela qualidade do serviço de transmissão, associada à disponibilidade e capacidade para operação dentro dos limites e períodos especificados por lei e contratos. A indisponibilidade das linhas de transmissão provoca prejuízos financeiros de grande monta para as concessionárias de transmissão, tanto por perda de faturamento como pela implicação de multas.

Uns dos principais componentes das linhas de transmissão que estão suscetíveis às falhas e que podem provocar a indisponibilidade das linhas são os isoladores. Os isoladores são responsáveis por sustentar os cabos e isolá-los eletricamente, e podem ser classificados de acordo com as características básicas do material que os constitui: isoladores cerâmicos (constituídos por vidro ou porcelana) e os isoladores não cerâmicos (também conhecidos como compostos ou poliméricos).

Os isoladores poliméricos têm tido uma crescente aplicação nas linhas de transmissão frente aos isoladores cerâmicos nos últimos anos. Os materiais poliméricos são mais leves que o vidro e a porcelana, o que facilita o manuseio e a instalação dos isoladores poliméricos. Além disso, os polímeros apresentam a característica de hidrofobicidade, que é a condição de repelir água e criar gotas superficiais em tamanho reduzido, minimizando a formação de caminhos condutivos. Essa característica aumenta a suportabilidade elétrica do isolador polimérico e torna seu desempenho melhor do que o de isoladores cerâmicos em condições de alta umidade relativa do ar, chuva e poluição (GORUR *et al.*, 1999; AMIN *et al.*, 2007).

Por outro lado, os isoladores poliméricos são mais suscetíveis aos efeitos das descargas corona¹ que os isoladores cerâmicos. As descargas corona são inevitáveis em linhas de transmissão devido à presença de campos elétricos não uniformes e notadamente em tensões elevadas.

As descargas corona são uma ameaça à integridade e, conseqüentemente, à vida útil dos isoladores poliméricos. Seus principais efeitos são a radiação ultravioleta (UV), a liberação de ozônio e o bombardeio de partículas carregadas sobre as superfícies poliméricas, que podem provocar a erosão do material e expor o núcleo à atmosfera (BRADWEL, 1984). Além disso, podem ser gerados óxidos de nitrogênio, altamente oxidantes, que quando combinados à umidade formam ácidos (GORUR *et al.*, 1999; VOSLOO *et al.*, 2006).

Diversos mecanismos conseqüentes à presença das descargas corona provocam falhas prematuras nos isoladores poliméricos. Por exemplo, a exposição excessiva ao corona pode provocar erosões, perfurações e rachaduras no revestimento e expor o núcleo do isolador à umidade. Esta condição pode provocar a fratura frágil² (em determinados modelos de isoladores), o trilhamento do núcleo³ e o conseqüente aumento da presença das correntes de fuga. A formação de óxidos de nitrogênio e ácidos pode oxidar as ferragens e aumentar sua rugosidade, além de provocar a perda da hidrofobicidade do revestimento.

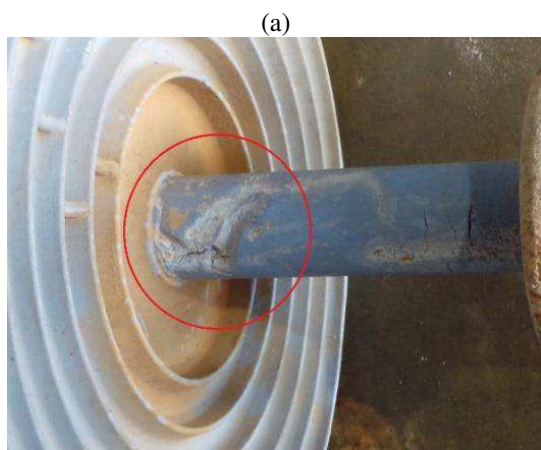
Fotografias de processos de falha potencialmente iniciados pela atividade de descargas corona são apresentados na Figura 1.1(a), Figura 1.1(b), Figura 1.1(c), Figura 1.1(d), Figura 1.1(e) e Figura 1.1(f), sendo respectivamente: região erodida do revestimento; perfuração do revestimento; rachaduras no revestimento; ocorrência de fratura frágil; ocorrência de trilhamento de núcleo e ferragem fase com vestígios de oxidação.

¹ Descargas corona são descargas elétricas autossustentadas em que os processos de ionização do gás são limitados a pequenas regiões de campo elétrico intenso. Para maiores detalhes, ver subseção 2.1.4.

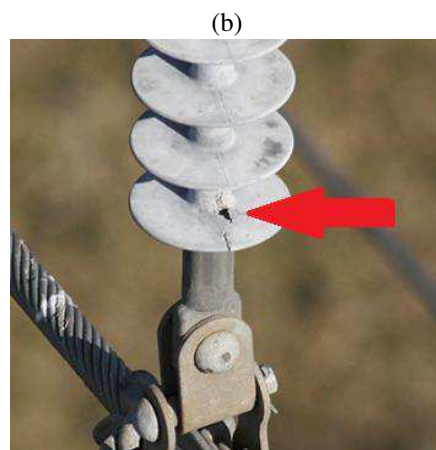
² A fratura frágil ocorre, caracteristicamente, em materiais não dúcteis, levando à formação de trincas ou separações no material sem que ocorra uma deformação plástica.

³ O trilhamento do núcleo de fibra de vidro de um isolador polimérico ocorre devido à ação de descargas elétricas próximas à superfície do material podendo causar erosão e formação de caminhos condutivos para a corrente elétrica.

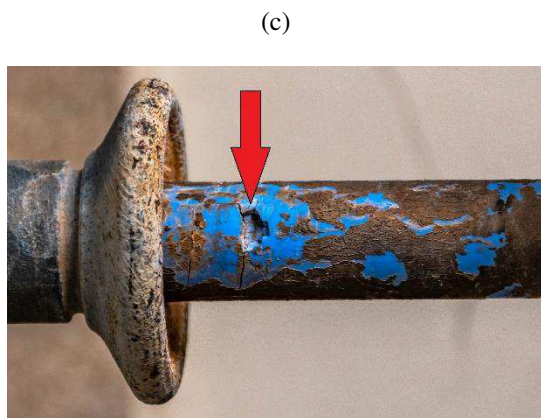
Figura 1.1. Fotografias de isoladores poliméricos com: (a) erosão do revestimento polimérico do núcleo, (b) perfuração do revestimento polimérico do núcleo, (c) rachaduras no revestimento polimérico do núcleo, (d) fratura frágil do núcleo, (e) trilhamento do núcleo e (f) oxidação da ferragem.



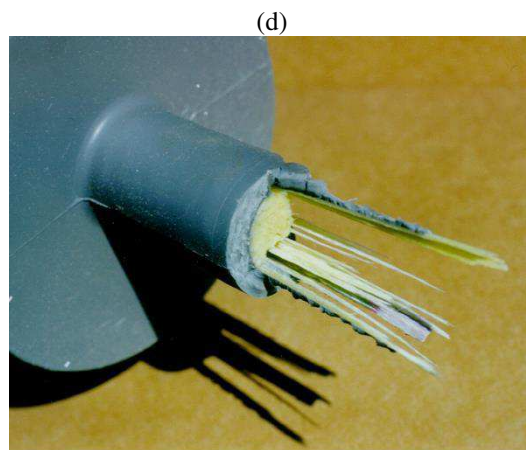
(Fonte: próprio autor)



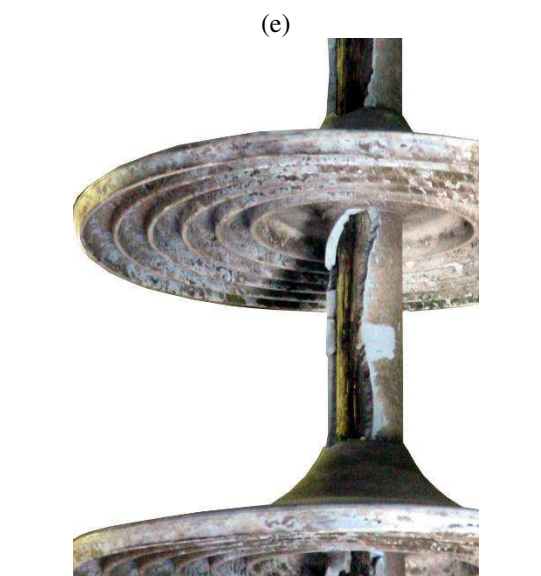
(Fonte: BUONTEMPO, 2017)



(Fonte: próprio autor)



(Fonte: BUONTEMPO, 2017)



(Fonte: FERREIRA, 2007)



(Fonte: próprio autor)

1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA

Considerando que a ANEEL regulamenta que as empresas concessionárias de transmissão são responsáveis por manter o sistema elétrico em disponibilidade, e que os desempenhos elétrico e mecânico dos isoladores estão entre os responsáveis pela integridade das linhas de transmissão (ANEEL, 2016). Considerando também que as descargas corona, em campos não uniformes, são uns dos precursores das descargas disruptivas que provocam as falhas. Além disso, considerando que o corona é uma das fontes principais de degradação das propriedades elétricas e mecânicas dos isoladores, é imprescindível que os fabricantes projetem e ensaiem adequadamente os componentes das linhas de transmissão. Adicionalmente, é necessário que as concessionárias possuam programas de monitoramento periódico das condições de operação dos isoladores, para verificar a viabilidade de mantê-los operando, lavá-los ou trocá-los e evitar os efeitos da poluição e a incidência de corona.

A falta de critérios bem definidos para a manutenção, limpeza, se aplicável, e troca dos isoladores poliméricos é um dos principais motivos que colaboram com a sua falha. A grande maioria dos casos de falhas em isoladores poliméricos pode ser evitada com a adoção de ações ou programas de monitoramento e manutenção adequados (EPRI, 2006; TZIMAS *et al.*, 2010; DOMINGUES, 2012).

Nesse sentido, tanto as empresas de transmissão como pesquisadores têm se preocupado em desenvolver alternativas de monitoramento de isoladores a fim de prever as condições operacionais a partir de parâmetros robustos (GUBANSKI *et al.*, 2007; BARROS, 2011; FERREIRA, 2011; GUEDES, 2015; SOUZA, 2016a; BRITO, 2017; ROCHA *et al.*, 2019). Os autores Tian e outros (1998), Berg e outros (1999), Vazquez e Chavez (1999), Giriantari (2006), Bezerra e outros (2008), Pei e outros (2008), Muniraj e Chandrasekar (2010), Lu e outros (2011a); Murthy e outros (2011), Ferreira e outros (2012) e Abidin e outros (2013) desenvolveram técnicas de monitoramento de isoladores que envolvem a medição de sinais de ruído ultrassônico das descargas superficiais e corona. Os autores Pinnangudi e outros (2005), Barros (2011), Wang e outros (2014), Guedes (2015), Oliveira Neto e outros (2015) e Prasad e Reddy (2017), desenvolveram pesquisas que envolvem a estimação das condições de isolamentos poliméricos com base na detecção da atividade corona.

Os métodos utilizados atualmente no monitoramento de isoladores poliméricos consideram os parâmetros relacionados à intensidade da corrente de fuga, ao nível de descargas parciais, à intensidade das emissões acústicas, à temperatura externa, à intensidade das descargas corona, às condições de hidrofobicidade, ao ruído de radiofrequência emitido e às condições físicas e estruturais do revestimento, do núcleo e das ferragens.

A medição da intensidade da corrente de fuga, assim como, a medição do nível de descargas parciais, a partir da norma IEC 60270 (2000), são métodos diretos de diagnóstico de isoladores. Entretanto, além de serem métodos invasivos, as dificuldades técnicas e econômicas não permitem que essas medições sejam utilizadas em larga escala, a não ser em subestações.

Pelos seus princípios ou metodologia, medições de descargas parciais e de corrente de fuga por meios elétricos convencionais não são adequados ao monitoramento não invasivo e replicável em grandes quantidades de isoladores. Assim, outras alternativas que sejam seguras ao monitoramento e ao diagnóstico tornam-se necessárias. Uma relação de compromisso que deve ser satisfeita em um método de monitoramento de isoladores consiste em fornecer um diagnóstico seguro sobre as reais condições do isolador, ao mesmo tempo em que seja rápido, replicável, não invasivo, técnica e economicamente viável.

Um dos métodos mais utilizados no monitoramento de isoladores poliméricos é a inspeção visual. A inspeção visual simples, a olho nu e sem o uso de aparelhos, é limitada pela distância de observação, experiência das equipes e localização efetiva de defeitos internos ou condições de superfície. Por outro lado, a inspeção pode ser aprimorada com o uso de binóculos, *drones*, câmeras de alta resolução, câmeras termográficas para medição de temperatura externa e câmeras sensíveis ao UV emitido pelas descargas corona.

Além das técnicas visuais, assistidas ou não, atualmente disponíveis, como a detecção das descargas corona (BARROS, 2011; GUEDES, 2015) ou a termografia (SOUZA, 2016a), existem alternativas acústicas como as medições de ultrassom (FERREIRA *et al.*, 2012) e as medições de rádio interferência (ROCHA *et al.*, 2017). Todas elas possuem vantagens e desvantagens. Mas, como principais vantagens em quaisquer dos casos, destacam-se: a alta reprodutibilidade das medições e a utilização de número reduzido de equipamentos para captura dos sinais.

1.3 MOTIVAÇÃO

Um dos métodos que vem ganhando destaque no monitoramento de isoladores poliméricos adota câmeras sensíveis à radiação UV emitida pelas descargas corona.

As descargas corona originam-se em campos elétricos intensos e não uniformes que, por sua vez, estão relacionados aos níveis de tensão, à configuração não uniforme dos cabos e isoladores e à rugosidade ou saliências (imperfeições) das superfícies das ferragens e do revestimento dos isoladores (LOEB, 1965; KUFFEL *et al.*, 2000). Em níveis elevados, durante um tempo prolongado, as descargas corona podem ocasionar degradação da superfície polimérica do isolador, devido ao bombardeio de partículas, à radiação UV e à liberação de ácido nítrico provenientes dos processos de ionização do ar úmido (GORUR *et al.*, 1999). Portanto, uma das formas de se avaliar a criticidade da operação de um isolador polimérico pode ser a detecção, avaliação, estimativa e ponderação da atividade corona.

As padronizações a respeito da vida útil de isoladores poliméricos e do seu desempenho ao longo do tempo ainda estão em desenvolvimento (GUBANSKI, 2007; DOMINGUES, 2012; RAMESH *et al.*, 2019) e são um dos maiores desafios de pesquisa com dielétricos. Isso ocorre, principalmente, porque os mecanismos de falha dos isoladores poliméricos têm muitas causas (EPRI, 2006; DOMINGUES, 2012).

Adicionalmente, de acordo com Moreno e outros (2003), um dos principais fatores responsáveis pela redução da vida útil dos materiais poliméricos está relacionado ao longo tempo de exposição ao efeito corona. Neste sentido, o desenvolvimento de técnicas que auxiliem na avaliação da atividade corona em isoladores poliméricos é necessário e atual. Uma das formas de se obter parâmetros das descargas corona é captando as imagens através de câmeras sensíveis ao UV. Tais parâmetros podem ser estimados a partir da correlação com os atributos das imagens.

Por ser tão incipiente, poucos trabalhos são encontrados na literatura voltados à avaliação das descargas corona de isoladores poliméricos baseada na imagem UV (PINNANGUDI *et al.*, 2005; LU *et al.*, 2010; BARROS, 2011; LU *et al.*, 2012a; WANG, 2014; AI, 2015; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2016; BRITO, 2017; RIBEIRO, 2017). Além disso, segundo os fornecedores de equipamentos, as empresas do Setor Elétrico Brasileiro que trabalham diretamente com a manutenção de linhas ainda não têm como prática difundida a adoção de câmeras de detecção UV, tampouco de

metodologias computacionais aliadas às técnicas de detecção visual do corona. As principais razões são a falta de padronizações dos procedimentos de captação, bem como a ausência de parametrização definida para a avaliação das descargas corona em linhas de transmissão, fornecendo um diagnóstico confiável e reproduzível.

Geralmente, as equipes que trabalham com câmeras de detecção da atividade corona só utilizam, como um dos critérios de decisão, a quantidade de fótons captados pela câmera. Contudo, a simples avaliação da quantidade de fótons captados não traz todas as informações possíveis sobre as condições de operação dos isoladores (BARROS, 2011; ZHANG *et al.*, 2016). Portanto, as imagens captadas pelas câmeras UV devem ser processadas com a finalidade de extrair-se o máximo de informações ou atributos possíveis.

Embora as técnicas computacionais de processamento de imagens sejam largamente utilizadas em diversos campos da ciência e engenharia, seu uso no diagnóstico de isoladores poliméricos é relativamente novo e, portanto, estão em pleno desenvolvimento e com um campo vasto de aplicabilidade. Dentro deste escopo, a parametrização da imagem UV ainda não foi completamente definida, de forma que existem parâmetros que podem ser extraídos e efetivamente correlacionados com os parâmetros das descargas corona em isoladores poliméricos.

Ademais, o uso de técnicas de processamento digital e a avaliação da imagem UV permitem estimar as características das descargas por meio da correlação de parâmetros, tendo em vista que o esforço consiste em compreender o grau de criticidade da atividade corona e suas prováveis consequências na operação dos isoladores poliméricos em linhas de transmissão.

Neste enfoque, novas pesquisas necessitam ser desenvolvidas com o objetivo avaliar técnicas de quantificação das descargas corona, a partir de atributos da imagem UV de isoladores poliméricos. Assim, nesta tese, é apresentado um estudo sistematizado das técnicas de processamento digital de imagens e o desenvolvimento de algoritmos para extração de atributos robustos.

Como atributos da imagem, nesta tese serão investigados a área, a persistência das fâculas (regiões de descarga na imagem), a distribuição média de píxeis/quadro ao longo do tempo, a número de objetos/quadro e o mapa de persistência. Estes atributos, em conjunto, possibilitam quantificar adequadamente a atividade corona. Além disso, de posse desses atributos, é possível avaliar o grau de severidade das descargas, uma vez que o tempo de exposição ao corona é um dos principais fatores que provocam a falha do

isolador (MORENO *et al.*, 2003). Se as descargas são mais recorrentes, sua severidade também é maior e, portanto, tornam-se mais nocivas ao isolador.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é propor um método de avaliação das condições operacionais de isoladores poliméricos a partir do processamento digital de imagens UV. Para tanto, os atributos obtidos no processamento de imagens são correlacionados com os atributos das descargas corona e com os níveis de degradação e poluição dos isoladores, a fim de estabelecer os graus de criticidade da operação dos isoladores poliméricos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor uma métrica baseada em aproximações para estabelecer os principais parâmetros de captação da câmera UV (ganho UV e distância de captação) e avaliar a sensibilidade dos atributos da imagem UV à variação dos parâmetros de captação;
- Propor um método de parametrização de imagens UV e extração de atributos, considerando:
 - Integração das fâculas em uma única região principal;
 - Segmentação da região principal do isolador do resto da imagem;
 - Definição do tamanho da fâcula (área);
 - Definição da persistência da fâcula (densidade ou quantidade píxeis/pixel);
 - Definição da quantidade média de píxeis/frame (distribuição média) para formar a região;
 - Localização da fâcula em relação ao isolador;
 - Mapeamento da persistência ao longo do tempo como forma de estimar o grau de severidade da descarga.

- Correlacionar os atributos das imagens com os parâmetros da medição de descargas parciais em isoladores em diversas condições operacionais;
- Correlacionar os atributos das imagens com o grau de degradação e poluição de isoladores poliméricos;
- Estimar o grau de criticidade da operação de isoladores poliméricos com base na análise dos atributos da imagem UV ao longo do tempo.

1.5 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Dentre as contribuições desta tese, destacam-se as seguintes:

- Elevação a confiabilidade do diagnóstico das condições operacionais de isoladores poliméricos;
- Atenuação das subjetividades e a escassez de atributos numéricos durante o procedimento de inspeção baseado na imagem UV;
- Proposição do uso de novos atributos da imagem UV para correlação com os atributos das descargas corona;
- Estimação numérica dos atributos das descargas corona a partir de atributos da imagem UV;
- Enfim, a proposição de um método de caracterização das condições operacionais de isoladores baseado nos atributos da imagem UV que quantificam as descargas corona.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho é composto por seis capítulos ordenados conforme a seguir.

No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos dos principais temas desta tese, quais sejam: a condução de eletricidade nos gases, os tópicos pertinentes ao estudo de isoladores poliméricos e as técnicas de processamento digital de imagens; com a finalidade de introduzir o leitor nos temas abordados por esta tese.

No Capítulo 3, é realizada uma revisão bibliográfica do estado da arte. O enfoque foi dado nas pesquisas que tratam das metodologias de monitoramento de isoladores

poliméricos que empregam técnicas de processamento digital de imagens UV para quantificação das descargas corona.

No Capítulo 4, são apresentados o material e os métodos utilizados no trabalho. Os métodos estão divididos em procedimentos experimentais e abordagens, sendo estas definidas em consonância com os objetivos propostos.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, bem como, são feitas as considerações finais de cada uma das abordagens do trabalho.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da pesquisa, conforme os objetivos propostos, e como elas contribuem para o resultado final desta tese. Além disso, são apresentadas perspectivas vislumbradas por este autor sobre as pesquisas que podem dar prosseguimento a esta tese. Por fim, são apresentados os trabalhos técnico-científicos publicados que são correlatos à pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as bases teóricas sobre as descargas elétricas em gases, com foco nos mecanismos de condução de cargas, explicitados pelas teorias de Townsend e de streamer. Além disso, é discutido o fenômeno das descargas corona. Em seguida, são apresentadas as principais características dos isoladores poliméricos. Por fim, é apresentada a tecnologia de captação de descargas corona baseada na blindagem solar e as bases matemáticas e computacionais que envolvem o processamento digital de imagens.

2.1 DESCARGAS EM GASES

Os efeitos das descargas elétricas em objetos começaram a ser investigados para fins científicos por volta da penúltima década do século XVIII, quando Lichtenberg (1778) descreveu a formação das descargas a partir de figuras em papéis-filmes fotográficos, denominadas Figuras de Lichtenberg (LICHTENBERG, 1778). As Figuras de Lichtenberg são o resultado visual da carbonização do material durante a descarga elétrica, como apresentado na Figura 2.1(a) e (b). A partir da análise das figuras de Lichtenberg, constatou-se que a formação das descargas varia conforme a polaridade da tensão aplicada, sua amplitude e sua forma de onda, como apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.1. Fotografia das Figuras de Lichtenberg com polaridade (a) positiva e (b) negativa. (Fonte: LICHTENBERG, 1778)

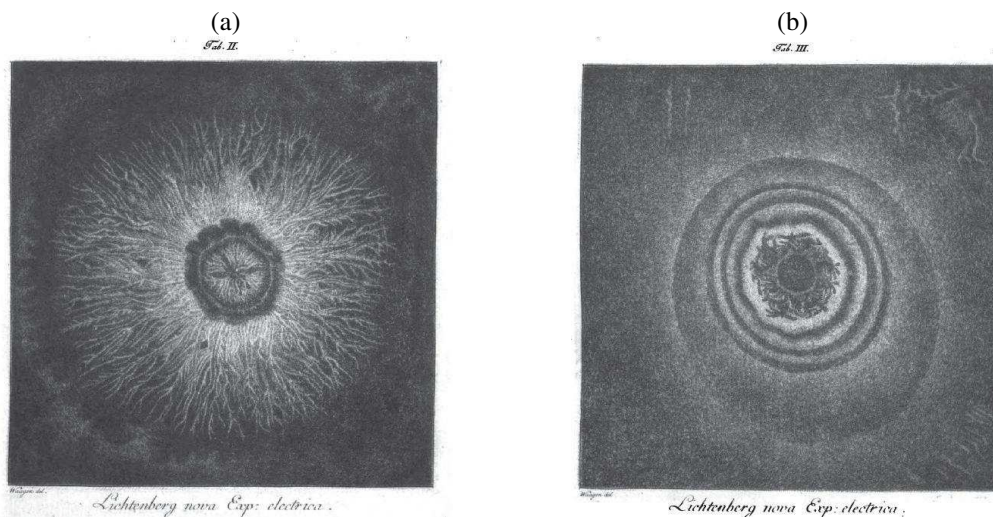
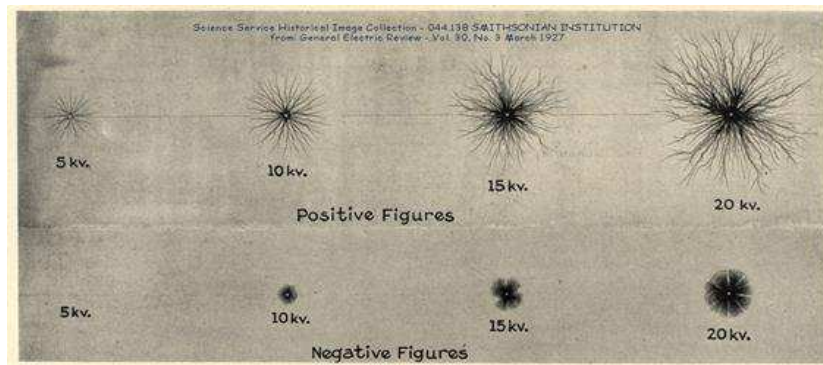


Figura 2.2. Fotografia das Figuras de Lichtenberg em polaridades e níveis de tensão distintos.
(Fonte: LEE & FOUST, 1927)



Quando as descargas elétricas ocorrem em gases, provocam alguns fenômenos físicos de interesse para o estudo da engenharia de alta tensão tais como o efeito corona, principalmente, porque os sistemas elétricos que operam sob níveis elevados de tensão estão submetidos, constantemente, ao efeito corona e suas implicações. Para se compreender os processos físicos envolvidos nas descargas elétricas em gases é necessário entender o comportamento dos gases e suas moléculas constituintes a partir da teoria cinética dos gases.

2.1.1 TEORIA CINÉTICA DOS GASES

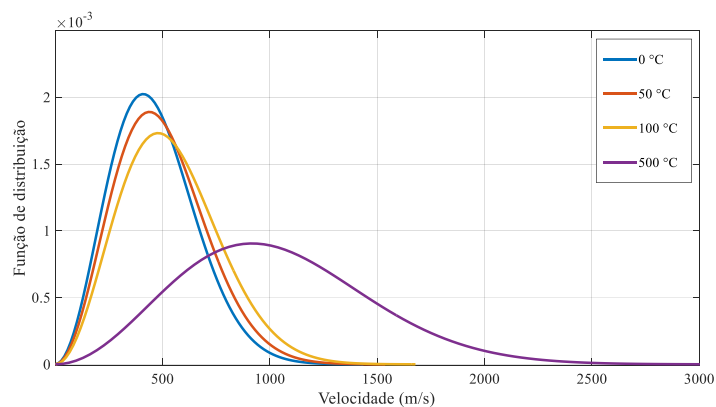
Os primeiros estudos da teoria cinética dos gases foram conduzidos por Bernoulli (1738) e publicados na obra intitulada *Hydrodynamica*, que tratava da dinâmica dos fluidos (BERNOULLI, 1738). De acordo com Bernoulli, os gases são constituídos de moléculas livres se movimentando em direções aleatórias e chocando-se elasticamente entre si e com superfícies.

Desdobramentos dos trabalhos de Bernoulli contribuíram para Clausius (1851) a estabelecer o conceito de ‘caminho médio livre’ das moléculas de um gás. O caminho médio livre é o valor médio das distâncias percorridas por uma molécula entre duas colisões consecutivas e está sujeito ao tamanho das moléculas do gás bem como às variações de pressão e temperatura; e, na atmosfera, é tão maior quanto mais rarefeito é o ar. Além disso, a agitação térmica das moléculas com o aumento da temperatura diminui o caminho médio livre.

Formulações matemáticas robustas para explicar o comportamento das moléculas do gás, sob o aspecto da influência da temperatura na velocidade das moléculas, foram desenvolvidas por Maxwell (1859) e, posteriormente, consolidadas por Boltzmann (1871)

(HALLIDAY *et al.*, 2009). Eles estabeleceram uma função distribuição de probabilidade das velocidades das moléculas dos gases para diferentes níveis de temperatura, como se vê no exemplo da Figura 2.3.

Figura 2.3. Funções de distribuição de Maxwell-Boltzmann do gás nitrogênio para diferentes temperaturas. (Fonte: adaptado de HALLIDAY *et al.*, 2009)



Assim, as moléculas de um gás se distribuem de forma que assumem intervalos distintos de velocidade média. Portanto, dependendo das condições atmosféricas e de sua velocidade, as moléculas podem assumir diferentes estados da matéria. Isso pode ser observado, por exemplo, na evapotranspiração da água, em que as moléculas submetidas às maiores temperaturas evaporam e outras se mantêm no estado líquido.

2.1.2 MECANISMOS DE CONDUÇÃO DE ELETRICIDADE NOS GASES

Os primeiros estudos relevantes sobre a condução da eletricidade nos gases foram desenvolvidos por Coulomb (1785), que concluiu que a eletricidade flui no gás a partir das forças de repulsão entre moléculas carregadas com a mesma polaridade. Entretanto, o mecanismo de condução da eletricidade nos gases não é exatamente como proposto por Coulomb (THOMSON, 1906).

Matteucci (1850) também verificou que a eletricidade pode fluir através do gás e foi o primeiro a provar experimentalmente que os níveis de condução da eletricidade no gás estão sujeitos às variações de pressão (THOMSON, 1906). De acordo com o autor, quanto menor a pressão, menor a condutividade do gás. Mas, essa relação não é completamente linear.

Paschen (1889) demonstrou experimentalmente o comportamento da condutividade de um gás, em termos de sua tensão de ruptura, sob a variação da pressão.

O autor provou que a tensão de ruptura do gás é elevada em baixas e altas pressões, a partir da expressão empírica denominada, posteriormente, Lei de Paschen. A Lei de Paschen relaciona o produto da pressão do gás com a distância entre eletrodos, ou pontos de potenciais elétricos distintos, e a tensão de ruptura do gás (KUFFELL, 2000).

De acordo com Thomson (1906), um gás em seu estado normal conduz eletricidade de forma tão irrelevante quanto possam ser as forças elétricas atuantes sobre ele. Entretanto, sob a ação de um campo elétrico e por mais isolante que um gás seja, haverá a condução de eletricidade através dele em determinado nível (THOMSON, 1906). Nesse caso, dependendo das condições do campo elétrico, pressão do gás, umidade relativa e temperatura, um gás pode perder sua propriedade isolante provocando uma descarga disruptiva entre dois pontos com potenciais elétricos distintos. Ainda de acordo com o autor, a descarga no gás é sustentada pelo agente externo, neste caso o campo elétrico, durante o tempo em que ele esteja sendo aplicado. A partir do momento em que a ação do campo elétrico é interrompida, o gás retorna ao seu estado não condutivo paulatinamente até a condutividade ser irrelevante. Então, sob condições normais, um gás pode ser considerado um bom isolante elétrico, sendo necessário entender os mecanismos que fazem o gás conduzir corrente elétrica.

2.1.2.1 MECANISMO DE TOWNSEND

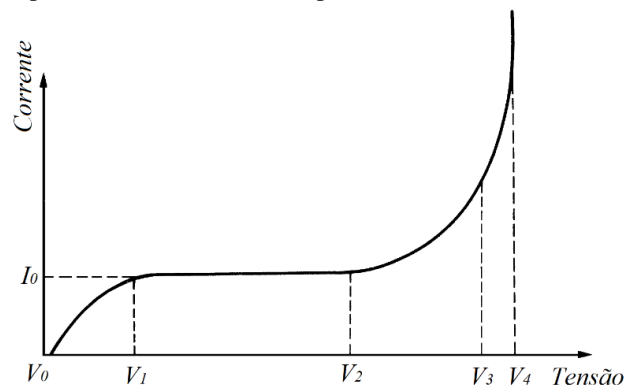
Para que haja corrente elétrica em um gás é necessário que algumas partículas sejam ionizadas e que exista um campo elétrico para dirigi-las. O processo de ionização ocorre quando um elétron é removido da camada orbital do átomo além da influência do núcleo e, simultaneamente, ocorre a formação de um íon positivo (TOWNSEND, 1915). Um átomo ou molécula neutros só podem ser ionizados se for aplicada uma energia, denominada energia de ionização, suficiente para remover o elétron da camada orbital. Se a energia de ionização não for suficiente para remover o elétron da camada orbital, mas suficiente para fazer o elétron saltar para outra camada, ocorre a excitação do átomo ou molécula.

Em um meio gasoso entre dois eletrodos com diferentes potenciais elétricos, os elétrons livres adquirem energia na direção do campo elétrico. Durante sua aceleração em direção ao ânodo, os elétrons podem colidir com moléculas neutras e provocar a liberação de novos elétrons e a criação de íons positivos. Os íons positivos são acelerados em direção ao cátodo e, ao bombardeá-lo, podem dar origem a elétrons secundários. Esse

processo é denominado ionização por colisão e a condução ocorrerá por meio de avalanches de elétrons.

Townsend (1915) descreveu experimentalmente o processo de ionização por colisão a partir da variação da corrente em função do campo elétrico aplicado entre dois eletrodos paralelos. Townsend constatou que a corrente se comporta, inicialmente, de forma mais ou menos linear e proporcional à tensão aplicada até um determinado nível de tensão, como pode ser visto na Figura 2.4, no intervalo entre V_0 e V_1 (TOWNSEND, 1915). Neste intervalo, os elétrons estão sendo acelerados em direção ao ânodo. Durante o intervalo de tensão entre V_1 e V_2 , a corrente permanece constante ou saturada, porque a quantidade de elétrons livres ainda é limitada. No intervalo entre V_2 e V_3 a tensão atinge valores mais elevados e a corrente passa a se comportar de forma exponencial, devido às colisões entre elétrons e moléculas, que dão origem a mais elétrons livres e íons positivos.

Figura 2.4. Comportamento da corrente em função da tensão em um processo de ionização como descrito por Townsend. (Fonte: adaptado de KUFFELL, 2000)



Para explicar o comportamento exponencial da corrente, Townsend definiu o parâmetro α , ou primeiro coeficiente de ionização de Townsend, como uma função da intensidade de campo elétrico e que representa a quantidade de elétrons livres (e, portanto, íons e colisões) produzidos por elétron livre por unidade de comprimento na direção do campo elétrico aplicado. Considerando dois eletrodos distanciados entre si de d e uma corrente inicial I_0 deixando o cátodo, Townsend descreveu a corrente de ionização I a partir da equação em (2.1):

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

Entretanto, essa equação explica somente a primeira etapa do processo de ionização até a ruptura, caracterizado na curva pelo intervalo entre V_2 e V_3 . Essa primeira

etapa torna-se completa quando a avalanche inicial de elétrons atinge o ânodo. Todavia, considerando o aumento exponencial da quantidade de elétrons livres, novos elétrons podem ser liberados no dielétrico por outros mecanismos e podem dar origem a novas avalanches. O aumento da taxa de crescimento da corrente, no intervalo entre V_3 e V_4 , são creditados aos mecanismos adicionais (secundários) que podem ocorrer, quais sejam: a colisão de íons positivos com o cátodo com energia suficiente para liberar elétrons do cátodo, a foto-emissão de elétrons causada pela excitação de átomos que emitiram fótons em avalanches anteriores e o retorno de partículas excitadas ao estado inicial, provocando a emissão dos elétrons das camadas mais externas.

Os elétrons liberados nos processos secundários são contabilizados em termos do segundo coeficiente de ionização de Townsend, γ . O coeficiente γ é definido como a quantidade líquida de elétrons secundários produzidos por íons positivos incidentes sobre o cátodo, fótons e partículas metaestáveis, por unidade de comprimento na direção do campo elétrico aplicado. O valor total de γ é a soma de cada coeficiente relativo aos processos secundários e é uma função da pressão do gás e da intensidade do campo elétrico. Como descrito pelo processo de ionização de Townsend, a aplicação de potenciais mais elevados acarreta no aumento exponencial da corrente. Os elétrons criados pelos processos secundários podem elevar a corrente à região entre os valores de tensão V_3 e V_4 , na Figura 2.4. Nessa região está o limiar entre uma descarga não sustentada e um descarga autossustentada, portanto, a corrente de ionização é reescrita em termos do segundo coeficiente de Townsend pela equação em (2.2):

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}, \quad (2.2)$$

em que I é a corrente de ionização, I_0 é a corrente inicial que sai do cátodo, α e γ são os coeficientes de ionização primário e secundário, respectivamente, e d é a distância entre os eletrodos.

A equação em (2.2) explicita a corrente de ionização até o instante em que ocorre a ruptura, ou a descarga torna-se autossustentada. Nesse instante, a corrente de ionização não depende mais da corrente inicial, porque os processos secundários é que sustentam a descarga. Dessa forma, a corrente de ionização é indeterminada, porque o denominador da equação em (2.2) se aproxima de zero. Essa condição determina o critério de ruptura de Townsend e é escrita em termos da equação em (2.3):

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

De acordo com o critério de ruptura de Townsend, se o termo à esquerda da equação é menor do que 1, as correntes devido às avalanches primárias e secundárias tendem a diminuir e a descarga não se sustenta. Se é maior do que 1, a descarga cresce muito rapidamente.

Considerando o espaçamento e a pressão do gás determinados, a tensão que fornece os valores de α e γ que satisfazem o critério de ruptura é chamada tensão de ignição (tensão de centelhamento ou tensão de ruptura) e a distância do espaçamento é chamada distância de ignição. O tempo entre o instante em que o valor da tensão de ignição é atingido entre os eletrodos e o instante em que ocorre efetivamente a ruptura é chamado de tempo de atraso para a ruptura e depende, principalmente, das características do gás presente, da geometria dos eletrodos e, portanto, do grau de uniformidade do campo elétrico.

2.1.2.2 MECANISMO DE *STREAMER* OU FORMAÇÃO DO CANAL

A teoria de Townsend foi comprovada experimentalmente, todavia não foi capaz de explicar a ruptura em determinadas condições como em grandes espaçamentos entre eletrodos, em configurações de campo não uniformes e em situações de tensão de impulso rápido. Dessa forma, uma nova teoria foi desenvolvida baseada na formação de um canal ou plasma condutor, denominado de *Streamer* (KUFFELL, 2000).

O Mecanismo de *Streamer* explica porque a tensão de ruptura depende da pressão do gás e da geometria dos eletrodos, e não somente do processo de ionização como explicitado por Townsend. Além disso, na prática, os tempos de atraso são muito menores do que os previstos pelo mecanismo de Townsend e as descargas de Townsend seriam muito difusas, enquanto que na prática são encontradas descargas filamentosas e irregulares, intermitentes e permanentes.

Em um campo uniforme, o crescimento de uma avalanche de elétrons é dado por $e^{\alpha d}$. Entretanto, Raether (1940) observou que, se em um espaçamento a quantidade de elétrons ultrapassar 10^8 , a carga espacial criada pelos portadores de carga provoca uma distorção no campo elétrico externo aplicado (KUFFELL, 2000). O movimento dos elétrons em direção ao ânodo é representado por uma esfera seguida de um cone que apresenta íons. Os elétrons se movem muito rápido em relação aos íons e ao atingirem o

ânodo fazem com que os íons, ainda em suas posições originais, formem uma carga espacial próxima ao ânodo.

Devido à presença da carga espacial criada, o campo elétrico aumenta e novas avalanches são formadas por elétrons secundários por fotoionização na ponta do cone da carga espacial. As avalanches secundárias incrementam ainda mais a carga espacial e esta passa a se estender para as proximidades do cátodo. Esse processo é relativamente rápido e provoca a criação de um caminho ou canal, porque há liberação de mais elétrons no cátodo na tentativa de neutralizar a carga espacial positiva. O resultado é a ruptura do dielétrico gasoso (KUFFELL, 2000).

2.1.2.3 LEI DE PASCHEN

Os mecanismos de ruptura dos dielétricos gasosos foram determinados a partir da teoria de Townsend para campos uniformes e da teoria da formação de canal ou teoria de *streamer* para campos não uniformes. As condições de ruptura dependem de diversos fatores, tais como: grau de uniformidade do campo, pressão do gás, temperatura, geometria dos eletrodos, distância entre eletrodos e o material dos eletrodos. A lei de Paschen esclarece o comportamento da tensão de ruptura em função de pd (pressão-distância) para diversos gases.

Anteriormente, foi apresentado o critério de Townsend para ruptura na equação em (2.3). Os coeficientes α e γ são funções da pressão do gás (p) e do campo elétrico (E) aplicado, que por sua vez é função da diferença de potencial (V) e da distância (d) entre eletrodos, conforme as expressões em (2.4), (2.5) e (2.6):

$$\frac{\alpha}{p} = f_1 \left(\frac{E}{p} \right), \quad (2.4)$$

$$\gamma = f_2 \left(\frac{E}{p} \right) e \quad (2.5)$$

$$E = \frac{V}{d}. \quad (2.6)$$

A substituição dos termos das equações em (2.4), (2.5) e (2.6) na equação que descreve o critério de ruptura de Townsend, em (2.3), resulta na equação em (2.7):

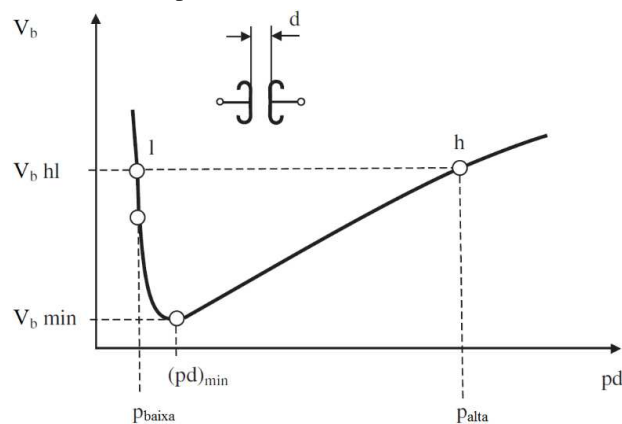
$$f_2\left(\frac{V}{pd}\right)\left[e^{pd f_1\left(\frac{V}{pd}\right)} - 1\right] = 1. \quad (2.7)$$

A relação entre a tensão aplicada (V) e pd resulta na curva de Paschen para os gases. Uma curva típica de Paschen é apresentada na Figura 2.5. Sendo conhecidas as funções f_1 e f_2 , a lei de Paschen pode ser diretamente representada como em (2.8):

$$V = f(pd). \quad (2.8)$$

Figura 2.5. Curva de Paschen – tensão de ruptura *versus* característica pd em um campo uniforme.

(Fonte: adaptado de ARORA e MOSCH, 2011)



2.1.3 TIPOS DE DESCARGAS EM GASES

As descargas típicas que ocorrem nos gases são:

- **Descarga escura:** é também chamada descarga de Townsend, com uma magnitude de corrente de até 10^{-6} A, e ocorre devido à resistividade do gás, provocando a distorção local das cargas espaciais, sem que haja energia suficiente para fotoionizações;
- **Descarga streamer:** é definida como a descarga de ruptura do dielétrico. As descargas *streamer* podem ser observadas a partir da análise da onda no osciloscópio e se manifestam nos picos positivos como impulsos de corrente discretos (com 50 a 300 ms de duração e amplitude variável). Geralmente, o aumento da tensão aplicada entre os eletrodos provoca o aumento da amplitude das descargas. Fótons podem ser emitidos e formar novas avalanches;

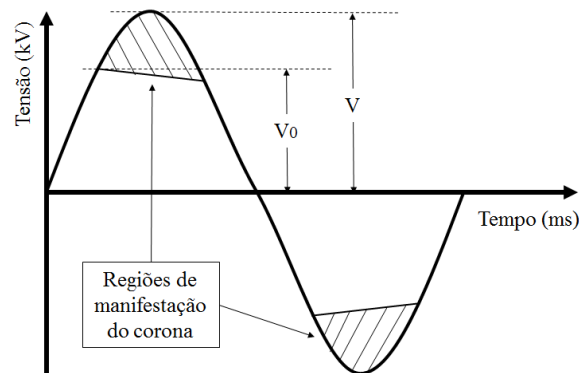
- **Descarga *leader*:** em campos elétricos intensos em que os eletrodos estão muito distantes entre si pode haver a pré-ruptura da descarga *streamer*. A pré-ruptura da descarga *streamer* pode ser entendida como a descarga *leader*, provocada por fotoionizações, que aparentemente forma a imagem imediatamente antes da ruptura do dielétrico;
- **Descarga *impulsiva*:** ocorre devido a uma tensão de impulso de ascendência brusca em que o tempo de subida seja semelhante ao tempo de formação de uma descarga. Ela se desenvolve em forma de avalanche, num processo rápido, que depende da forma de onda e do pico de tensão;
- **Descarga *corona*:** ocorre em campos elétricos locais muito intensos e divergentes. Não caracteriza a ruptura completa do dielétrico, mas a energia transferida pelos campos elétricos ioniza as partículas do gás. É perceptível pela luminescência caracteristicamente azulada e emite luz UV. Além disso, possui um som característico ruidoso. A presença da descarga corona (ou efeito corona) em linhas aéreas pode introduzir perdas ao sistema.

Dentre as descargas citadas, o estudo das descargas corona é relevante para a engenharia de alta tensão, principalmente, porque a maioria dos equipamentos elétricos que trabalham sob campo elétrico intenso e não uniforme estão submetidos aos efeitos das descargas corona. Um dos principais componentes do sistema elétrico que operam sob essas condições são os isoladores poliméricos.

As descargas corona se originam em campos elétricos locais intensos e não uniformes produzidos por altas tensões. Elas se caracterizam por serem descargas pequenas em um único meio gasoso exterior, que se formam antes que haja a ruptura completa. Alguns dos efeitos destas descargas são cintilações luminosas e audíveis, que podem ocorrer de forma estacionária ou intermitente, a formação de ozônio no ar e o aparecimento de perdas em sistemas de energia.

De acordo com Peek Jr. (1920) e Whitehead (1920), as perdas devido às descargas corona são proporcionais à amplitude da tensão aplicada e à frequência de operação. As descargas corona tendem a se manifestar próximo às regiões de pico da onda de tensão, na região acima da tensão de início de corona, conforme apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6. Regiões de manifestação das descargas corona do ponto de vista da onda de tensão. (Fonte: próprio autor)



A expressão para as perdas apresentada por Peek Jr. (1920) considera a diferença entre a tensão de pico de operação e a tensão de início de corona, que é determinada pelas condições do ar atmosférico e pela geometria dos eletrodos, regiões energizadas ou condutores, e está representada pela equação em (2.9):

$$P = a(f + c)(V - V_0)^2, \quad (2.9)$$

em que P é a quantidade de perdas devido às descargas corona em watts (W), f é a frequência de operação do sistema (em Hz), c é uma constante obtida experimentalmente e igual a 25, V é a tensão de operação do sistema no instante em que a perda está sendo calculada e V_0 é a tensão de início de corona para as condições de operação. A constante a é dada pela equação em (2.10):

$$a = \frac{A}{\delta} \sqrt{r/s}, \quad (2.10)$$

em que A é uma constante obtida experimentalmente e igual a 241, δ é o fator de densidade do ar a 25°C e a 760 mmHg, r é o raio do condutor e s é a distância entre condutores.

A tensão de início de corona V_0 (em kV) foi determinada experimentalmente por Peek e denominada tensão crítica de corona visual para sistemas em corrente alternada, como apresentada na equação em (2.11):

$$V_0 = 21,1 \cdot m \cdot \delta \cdot r \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \log_v s/r, \quad (2.11)$$

em que m é o fator de irregularidade da superfície do condutor ($m = 1$ para superfícies polidas), r é o raio do condutor em centímetros, s é o espaçamento entre condutores

paralelos e v é a tensão de operação do sistema em relação ao neutro. O parâmetro δ é o fator de densidade do ar, a 25 °C e 760 mmHg, de acordo com a equação em (2.12):

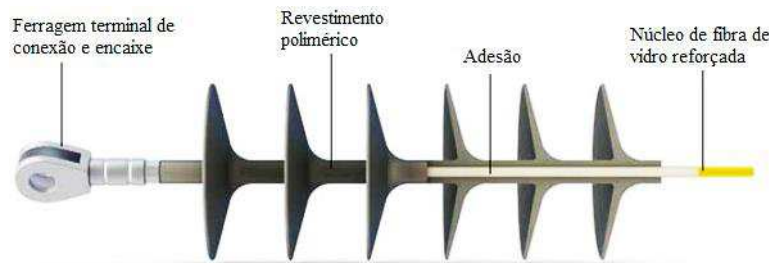
$$\delta = \frac{3,92 \cdot b}{273 + t}, \quad (2.12)$$

em que b é a pressão barométrica em milímetros de mercúrio e t é a temperatura em °C.

2.2 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Os isoladores poliméricos são componentes estáticos e passivos no sistema elétrico cujas funções são suportar mecanicamente e isolar eletricamente e os cabos das linhas de transmissão. Os isoladores poliméricos surgiram no final da década dos 50 e início da década dos 60 e passaram a ser utilizados de forma ostensiva a partir da década dos 70 (HALL, 1993). Desde então, sofreram diversas modificações em seus materiais constituintes e em sua estrutura construtiva. Um esquema de uma forma construtiva comum de um isolador polimérico nos dias atuais é mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7. Esquema construtivo mostrando as principais partes de um isolador polimérico. (Fonte: adaptado de ORIENT POWER, 2017)



2.2.1 NÚCLEO DE FIBRA DE VIDRO REFORÇADA

O núcleo corresponde ao dielétrico que separa as partes de diferentes potenciais e é fabricado com fibra de vidro reforçada com polímero (*Fiber Reinforced Polymer - FRP*) para suportar as solicitações mecânicas de tração, torção e compressão a que está submetido em operação, além das solicitações elétricas. O processo de fabricação do núcleo é denominado pultrusão. Nesse processo, os fios de fibra de vidro recebem reforços de resina para adesão entre si e passam por uma cura térmica até o final do processo em que são cortados em perfis de tamanhos e espessuras pré-definidos

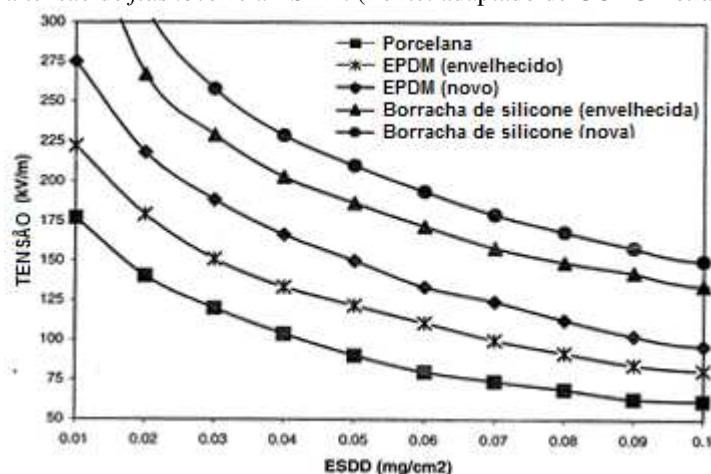
(GORUR *et al.*, 1999; LAPP, 2017). Após esse processo, o núcleo recebe o revestimento polimérico.

2.2.2 REVESTIMENTO POLIMÉRICO

O revestimento tem a função de proteger o núcleo de radiação UV e poluição química e, além disso, possui aletas que formam o perfil da distância de escoamento entre as ferragens. Existem diversos materiais poliméricos que podem ser utilizados na fabricação do revestimento de isoladores, tais como: borrachas de silicone vulcanizadas em temperatura ambiente (*Room Temperature Vulcanizing - RTV*) e em altas temperaturas (*High Temperature Vulcanizing - HTV*), monômeros de EPR e copolímeros, monômeros EPDM e copolímeros, copolímeros de silicone e borrachas de etileno e polipropileno. Alguns desses materiais ainda podem receber aditivos inorgânicos como a sílica e a alumina tri-hidratada, que intensificam a resistência ao trilhamento.

Os materiais poliméricos se destacam devido ao seu desempenho sob poluição e à resistência ao trilhamento, que são fatores críticos de operação do isolador. Um processo de fabricação inadequado ou o envelhecimento precoce do material podem provocar falhas no isolador e desligamentos de linhas. Uma comparação entre isoladores poliméricos com diferentes revestimentos e níveis de envelhecimento e isoladores de porcelana é mostrada na Figura 2.8, em uma relação entre a tensão de ruptura e a densidade equivalente de deposição de sal (*Equivalent Salt Deposition Density - ESDD*) (GORUR *et al.*, 1999). Esses dados demonstram o desempenho superior de isoladores poliméricos frente aos cerâmicos quando ambos são submetidos à poluição. Mas, também evidencia a perda de desempenho dos isoladores poliméricos com o passar do tempo, quando sofrem envelhecimento.

Figura 2.8. Comparação entre isoladores com diferentes materiais e condições de envelhecimento em relação à tensão de *flashover* e a ESDD. (Fonte: adaptado de GORUR *et al.*, 1999)



2.2.3 FERRAGENS E TERMINAIS DE CONEXÃO

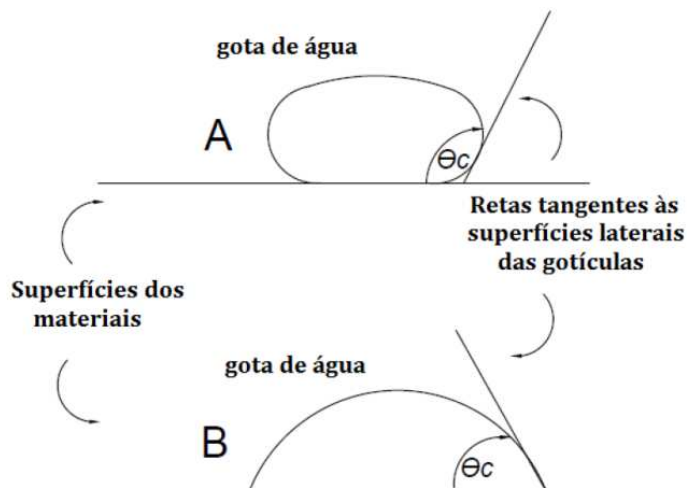
As ferragens terminais (*end fittings*), por sua vez, cumprem a função de conectar o núcleo do isolador entre o suporte da torre e o suporte dos cabos. Elas são fabricadas em obediência às normas internacionais IEC 60471 (1977), IEC 60120 (1984), e ANSI C29 (2013) e à norma brasileira ABNT NBR 15255 (2005), e podem ser dos seguintes tipos: olhal, manilha direta, manilha em Y, concha e bola (HUBBELL, 2017). As formas mais comuns de conexão das ferragens ao núcleo do isolador podem ser por colagem com resina ou por estampagem. Em qualquer dos casos, a conexão entre as ferragens e o núcleo deve ser segura e inviolável, para que o núcleo não sofra ataques químicos por intrusão de impurezas. A degradação ou violação dessas conexões é fator determinante para retirada do isolador da linha, assim como a presença de corrosão nas ferragens que intensifica a atividade corona.

2.2.4 CARACTERÍSTICA DE HIDROFOBICIDADE

Uma característica desejável dos polímeros é a hidrofobicidade. A hidrofobicidade é a capacidade que um material possui de repelir água. A água depositada em uma superfície hidrofóbica forma gotas ao invés de caminhos contínuos ou filmes superficiais. Essa característica pode ser descrita pelo ângulo de contato entre uma gota e uma superfície. Na Figura 2.9 são apresentados diagramas representativos de gotas de

água em superfície hidrofóbica (em A) e hidrofílica (em B). O ângulo de contato θ_c maior que 90° caracteriza uma superfície hidrofóbica.

Figura 2.9. Contato de uma gota de água em uma superfície hidrofóbica em A e em uma superfície hidrofílica em B. (Fonte: adaptado de AMIN *et al.*, 2007)



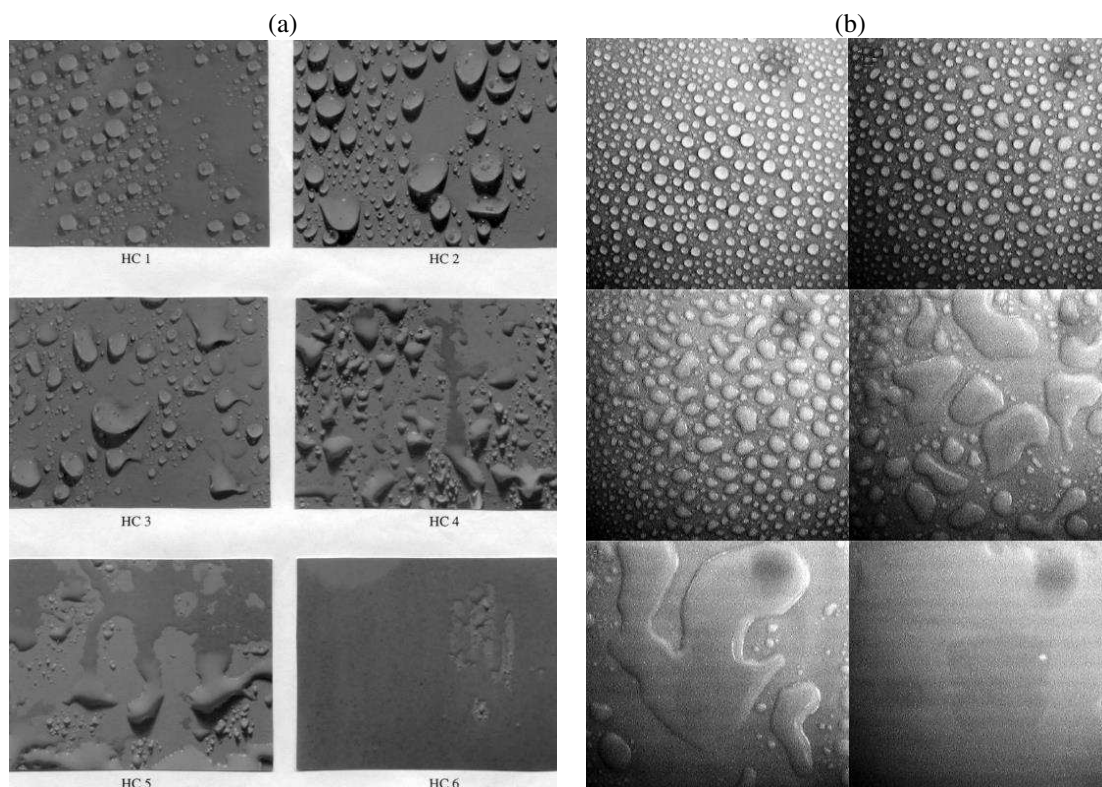
Por não permitir a formação de caminhos aquosos contínuos, a superfície hidrofóbica tem uma resistência de superfície superior à de uma superfície hidrofílica. Essa condição faz com que o desempenho dos isoladores poliméricos seja superior ao dos isoladores cerâmicos em condições de alta umidade relativa do ar, chuva e poluição (STRI, 1992; GORUR *et al.*, 1999). A capacidade hidrofóbica se transfere, até certo ponto, à camada de poluição depositada sobre o isolador, o que tende a aumentar os intervalos entre as lavagens programadas (OESTERHELD, 1996). Entretanto, a hidrofobicidade reduz-se ao longo do tempo, devido à exposição do isolador às condições ambientais e às descargas superficiais e corona (STRI, 1992).

Com o intuito de orientar a inspeção de superfícies poliméricas em campo, o *Swedish Transmission Research Institute* (STRI) estabeleceu diferentes classes de hidrofobicidade (*Hydrophobicity Class - HC*), cujo critério utilizado para distingui-las é o ângulo de contato θ_c entre as gotas e a superfície polimérica. As classes de hidrofobicidade e seus respectivos critérios estão resumidos na Tabela 2.1. Fotografias de superfícies com diferentes níveis de hidrofobicidade são mostradas na Figura 2.10(a) e (b). Na Figura 2.10 (a), as fotografias apresentam as diferenças visuais entre as classes de hidrofobicidade e constam no guia de inspeção elaborado pelo STRI (1992). Na Figura 2.10 (b), as fotografias mostram as classes de hidrofobicidade reproduzidas a partir de diferentes concentrações de álcool isopropílico e água (THOMAZINI *et al.*, 2008).

Tabela 2.1. Critérios e descrições das classes de hidrofobicidade estabelecidos pelo STRI. (Fonte: adaptado de STRI, 1992).

HC	Critério	Descrição
1	$\theta_c \geq 80^\circ$	Formação de gotas discretas de tamanho reduzido.
2	$50^\circ \leq \theta_c < 80^\circ$	Formação de gotas discretas de tamanho superior às da classe HC 1.
3	$20^\circ \leq \theta_c < 50^\circ$	Formação mista de gotas discretas e disformes.
4	$\theta_c < 20^\circ$	Formação mista de gotas e traços molhados que cobrem não mais que 2 cm ² . Toda a área molhada não é superior a 90% da área observada.
5	$\theta_c \approx 0^\circ$	Presença de áreas molhadas superiores a 2 cm ² que cobrem até 90% da área observada.
6	$\theta_c = 0^\circ$	Presença de áreas molhadas que cobrem mais de 90% da área observada e poucas áreas filamentosas secas.
7	$\theta_c = 0^\circ$	Filme contínuo de água que cobre toda a área observada.

Figura 2.10. (a) Exemplos típicos de superfícies com classes de hidrofobicidade HC 1 até HC 6 (Fonte: STRI, 1992), (b) Reprodução das classes de hidrofobicidade com superfícies molhadas por concentrações distintas de álcool isopropílico e água. (Fonte: adaptado de THOMAZINI *et al.*, 2008)



2.2.5 CONTROLE DE QUALIDADE EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

O desempenho dos isoladores em serviço está intimamente relacionado com o controle de qualidade de sua fabricação. Sendo assim, o fabricante deve garantir que os isoladores poliméricos preencham requisitos minimamente aceitáveis para suportarem as

diversas condições às quais estão expostos durante sua operação. Além disso, embora considerando-se as características intrínsecas de cada projeto, as linhas de transmissão acompanham modelos padronizados. Portanto, torna-se uma regra geral que os isoladores também possuam padronização. Para garantir que os isoladores atendam às exigências de operação, algumas amostras são testadas mediante ensaios elétricos e mecânicos.

As principais normatizações que tratam da padronização de isoladores poliméricos foram elaboradas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) e pelo *American National Standards Institute* (ANSI). Além dessas organizações, a *Canadian Standard Association* (CSA), a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também possuem documentos que normatizam ensaios para isoladores poliméricos e relacionados a materiais poliméricos.

As normas IEC 61109 (2008) e IEC 62217 (2012) dividem os testes com isoladores poliméricos em quatro categorias: testes de projeto (ou desenho), testes de tipo, testes de amostra e testes de rotina. Os testes de projeto têm a finalidade de determinar as aptidões do desenho de um modelo específico do isolador, do material do qual foi constituído e dos métodos de manufatura utilizados para produzi-lo.

Os testes de tipo, por sua vez, são definidos pela norma IEC 61109 (2008). Os testes de tipo têm a finalidade de diferenciar os isoladores segundo suas características construtivas. Dessa forma, os isoladores podem ser diferenciados eletricamente de acordo com as seguintes características: distância de arco a seco, distância de escoamento, inclinação das aletas, diâmetro das aletas e espaçamento entre as aletas. Mecanicamente, os isoladores se diferenciam por: máxima carga média especificada para o diâmetro do núcleo, método de acoplamento das ferragens e tipos de ferragens. Na Tabela 2.2, estão resumidos os testes de projeto e testes de tipo apresentados por ambas as normas.

Tabela 2.2. Testes para controle de qualidade de isoladores de acordo com as normas IEC 61109 e IEC 62217. (Fonte: adaptado de IEC 61109, 2008; e IEC 62217, 2012).

Norma	Testes de Projeto
IEC 62217 (2012)	Testes nas interfaces e conexões com as ferragens:
	<ul style="list-style-type: none"> • Exame visual; • Teste de impulso de tensão de frente íngreme; • Teste de tensão na frequência industrial à seco.
	Testes nas aletas e material do revestimento:
	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de dureza; • Teste de intemperismo acelerado; • Teste de trilhamento e erosão em névoa salina; • Teste de inflamabilidade.
	Testes no material do núcleo:
	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de porosidade (penetração de corantes); • Teste de difusão de água ou umidade; • Teste de tensão suportável.
IEC 61109 (2008)	Testes de tipo
	Testes elétricos:
	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de tensão suportável de impulso atmosférico à seco; • Teste de tensão suportável molhado; • Teste de tensão suportável de impulso atmosférico molhado, para isoladores ≥ 300 kV.
	Testes mecânicos:
	<ul style="list-style-type: none"> • Teste de resistência a danos; • Teste de rigidez mecânica do acoplamento das ferragens ao núcleo.

Já os testes de amostra, que são generalistas, são realizados com amostras aleatórias dos lotes de isoladores fabricados de forma a verificar características construtivas e de qualidade da manufatura, bem como os materiais utilizados. São verificadas dimensões, qualidade das conexões entre núcleo, revestimento e ferragens, carga mecânica suportável e teste de galvanização nas ferragens. Caso a amostra apresente falhas em alguns dos requisitos, repetições dos testes estão previstas pela IEC 61109 (2008).

Segundo a IEC 61109 (2008), dois testes de rotina são realizados com a finalidade de eliminar isoladores defeituosos da linha de produção e, portanto, todos os isoladores são submetidos aos testes de rotina. O primeiro é o teste mecânico de rotina, em que todo isolador deve suportar uma carga de tensão igual a 50% da carga mecânica suportável por pelo menos 10 segundos. O segundo é o teste por exame visual, em que todas as partes do isolador são verificadas visualmente, não sendo permitidas as seguintes condições:

- Defeitos superficiais com áreas superiores a 25 mm² ou áreas defeituosas acima de 0,2% da área total superficial do isolador e profundidade superior a 1 mm;
- Fissuras ou frestas no revestimento, principalmente nas regiões próximas às ferragens;
- Separações na interface entre ferragens e o núcleo revestido;
- Separações entre aletas e revestimento do núcleo;
- Protrusões na superfície polimérica do revestimento superiores a 1 mm.

2.2.6 MECANISMOS DE FALHA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

Na década dos 60, logo após o início do uso de isoladores poliméricos, foram notadas diversas falhas devido a danos superficiais e punctura (perfurações) (VOSE, 1965), que é uma descarga disruptiva que ocorre em um dielétrico sólido e provoca perdas no isolamento e destruição de microestruturas. Com o desenvolvimento de novos materiais e redesenhos de perfis, algumas melhorias substanciais foram obtidas como, por exemplo: diminuição da não uniformidade de campos elétricos, aumento da resistência à erosão e aperfeiçoamento da superfície hidrofóbica. Entretanto, os modelos atuais de isoladores poliméricos ainda estão sujeitos às falhas, que podem ocorrer por diversas razões (GORUR *et al.*, 1999; GUBANSKI *et al.*, 2007). Dentre as razões que provocam a falha de isoladores poliméricos estão:

- Manejo durante transporte e instalação;
- Vandalismo;
- Defeitos e falhas no processo de fabricação;
- Descargas *flashovers*;
- Contaminação química;
- Estresses elétricos.

Segundo Gorur e outros (1999) e Tourreil (1999), os isoladores poliméricos são facilmente avariados devido ao manejo inadequado. Durante a armazenagem e o transporte, podem estar suscetíveis a superfícies afiadas ou abrasivas que podem danificar o revestimento. A violação do revestimento aliada à umidade e campos elétricos intensos pode provocar trilhamento e fratura frágil no núcleo, embora os fabricantes aleguem que

a fratura frágil é um problema superado. Durante a instalação, movimentos inadequados de içamento, trações e torções também podem provocar fraturas no núcleo. Por essas razões, o grupo de trabalho WG 22.03 do Cigrè (2001) elaborou um guia de manejo de isoladores poliméricos, desde sua fabricação até à energização em linha, com o intuito de mitigar as falhas provocadas por manejo inadequado.

Outro fato que pode provocar a falha do isolador é o vandalismo. Os vândalos costumam usar os isoladores como alvo para disparos por armas de fogo. De acordo com Kikuchi e outros (1999), esse tipo de vandalismo é muito mais notável nos isoladores de vidro, porque espatifam ao serem alvejados e provocam um efeito visual mais atrativo. Os isoladores poliméricos não explodem nem se despedaçam ao serem alvejados, tornando-se menos atrativos. Entretanto, segundo demonstrado por Burnham e Waidelich (1997), um tiro que atinge o isolador polimérico pode provocar exposição do núcleo à umidade ao remover porções do revestimento. A localização de defeitos provocados por vandalismo não é trivial e, conseqüentemente, se não houver tempo hábil para reparos, o isolador pode vir a falhar.

Um outro fator determinante para a falha do isolador polimérico está relacionado ao seu processo de fabricação. Nesse sentido, o controle de qualidade durante a fabricação é de extrema importância para evitar problemas durante a operação. Por exemplo, durante o processo de pultrusão, o uso inadequado de resina ou de pressões não uniformemente distribuídas pode provocar baixa adesão na fibra do núcleo e, conseqüentemente, fraturas. No revestimento, a exigência de perfis homogêneos sem sobras, de forma que não haja rebarbas, não é em vão. Como o polímero sofre degradação por erosão devido à ação de bandas secas ou corona, concentrações de campo elétrico em regiões limitadas do revestimento devem ser evitadas. Durante o processo de extrusão ou adesão do revestimento ao núcleo não pode haver falhas como pré-aquecimento incorreto, presença de umidade e moldes inadequados. Toda a superfície no entorno do núcleo deve ser revestida com boa adesão, de forma que não haja infiltração e difusão de impurezas e compostos químicos degradantes.

Além dos fatores anteriores, o surgimento de sobretensões ocasionadas por manobra e descargas atmosféricas na linha podem provocar *flashover* no isolamento (GORUR *et al.*, 1999). O *flashover*, nesse caso, não tem origem em falhas do isolador. Mas, dependendo do tempo da ocorrência e da energia dissipada, pode provocar avarias no revestimento e na interseção (selo) entre ferragem e núcleo, além de danificar ferragens e anéis equalizadores.

Por outro lado, a degradação de isoladores poliméricos tem como causas majoritárias as condições do ambiente de instalação, que relacionam o clima, os níveis de poluição e as configurações dos campos elétricos. Nos seus trabalhos, em Moreno e Gorur (2001) e em Moreno e outros (2003), os autores demonstraram que, mesmo sob condições de baixa poluição e umidade, os revestimentos poliméricos sofrem degradação por exposição a períodos prolongados de atividade corona provocada por campos elétricos locais intensos. Os autores demonstraram que o tempo de exposição ao corona é um dos principais fatores que degradam o revestimento polimérico, uma vez que os danos provocados pelo corona ao material são irreversíveis.

Além disso, os autores demonstraram que a combinação de fatores elétricos e químicos são mais nocivos ao revestimento polimérico do que fatores térmicos. Operando sob condições atmosféricas adversas, o isolador polimérico pode sofrer contaminação por agentes degradantes. Poluição advinda da fuligem, compostos da chuva ácida, ácido nítrico da atividade corona são exemplos de contaminantes que causam degradação do revestimento polimérico e facilitam o aparecimento de correntes de fuga elevadas. Nesses casos, o trilhamento do revestimento e a possibilidade de sua violação, atingindo o núcleo, são fatores limitantes da operação do isolador que pode vir a falhar e provocar *flashover*, principalmente sob condições de umidade relativa do ar elevada.


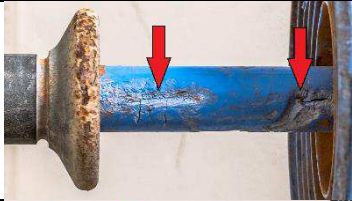
Devido aos diversos mecanismos de falha a que os isoladores poliméricos estão submetidos, é imprescindível procurar maneiras de monitorar e diagnosticar suas condições operacionais.

O *Electric Power Research Insitute* (EPRI) elaborou um guia que apresenta os principais defeitos visíveis em isoladores poliméricos, suas prováveis causas e os efeitos que provocam as falhas, visando facilitar a inspeção visual de isoladores em campo, Além disso, o guia do EPRI (2006) recomenda critérios de tomada de decisão e prioridade de ação, conforme está mostrado na Tabela 2.3. Um guia semelhante de identificação de defeitos foi elaborado pelo STRI (2003). Um resumo das informações fornecidas por ambos os guias que mostra os principais defeitos em isoladores é apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.3. Critérios de ação para a inspeção visual de isoladores poliméricos em campo. (Fonte: adaptado de EPRI, 2006).

Prioridade de ação	Definição	Ação
A	Isolador bom ou similar a novo.	Nenhuma ação necessária.
B	Baixo grau de degradação, desgaste ou dano.	Monitorar possíveis danos futuros.
C	Grau moderado de degradação, desgaste ou dano.	Considerar a troca do isolador.
D	Alto grau de degradação, desgaste ou dano.	Remover isolador de serviço.

Tabela 2.4. Exemplos de defeitos em isoladores poliméricos. (Fonte: adaptado de STRI (2003), EPRI (2006) e DOMINGUES (2012))

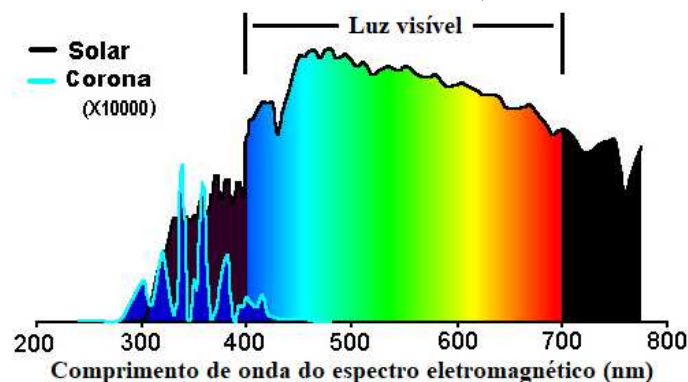
Visualização	Descrição	Classificação EPRI
	Rachaduras e descascamento – Degradação provocada por condições severas de poluição, umidade e distribuição de campo elétrico. Pode ser agravado por polímero de baixa qualidade.	Prioridade de ação: C Ação: Considerar a troca do isolador.
	Trilhamento – Degradação provocada por formação de caminhos condutivos devido à circulação intensa de correntes de fuga ou contaminação superficial elevada.	Prioridade de ação: D Ação: Remover isolador de serviço.
	Erosão – Degradação provocada por atividade corona intensa e persistente, correntes de fuga e condições severas de poluição, umidade e distribuição de campo elétrico.	Prioridade de ação: D Ação: Remover isolador de serviço.
	Exposição do núcleo - Degradação provocada por atividade elétrica intensa e condições severas de poluição, umidade e distribuição de campo elétrico.	Prioridade de ação: D Ação: Remover isolador de serviço.
	Corrosão das Ferragens – Degradação provocada por condições severas de poluição, umidade ou galvanização inadequada.	Prioridade de ação: B Ação: Monitorar possíveis danos futuros.

2.3 CAPTAÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS UV

2.3.1 DETECÇÃO DAS DESCARGAS CORONA POR CÂMERA UV

A radiação luminosa emitida pelas descargas corona se manifesta com comprimentos de onda na faixa do UV, entre 230 e 405 nm, aproximadamente. As emissões mais intensas se manifestam na faixa entre 300 e 360 nm, como está mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11. Espectro eletromagnético da radiação solar e corona. (Fonte: adaptado de UVIRCO TECHNOLOGIES, 2017)



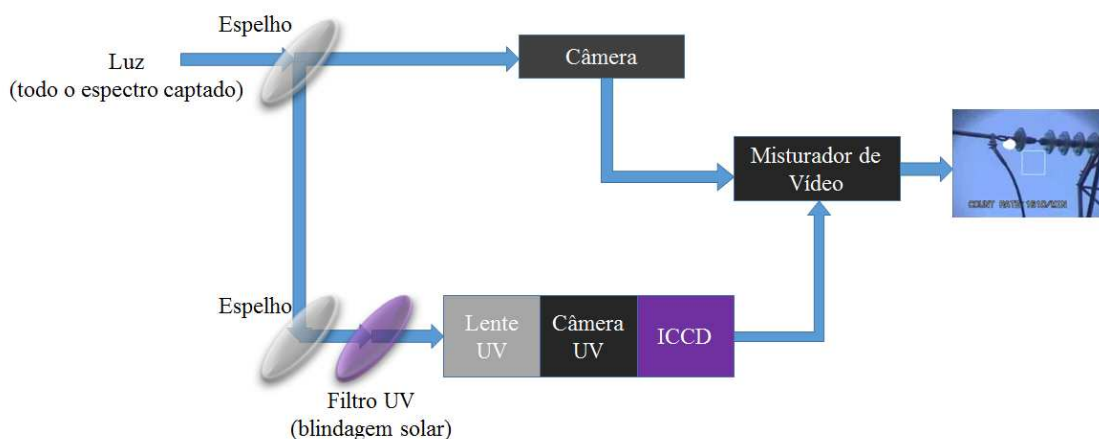
Nessa faixa do espectro luminoso, a radiação solar é mais intensa que a radiação das descargas corona. Entretanto, abaixo de 300 nm a radiação solar na superfície terrestre tem intensidade próxima de zero devido à proteção da camada de ozônio (LINDNER *et al.*, 1999). Na faixa entre 240 e 280 nm do espectro eletromagnético, a radiação UV das descargas corona ainda se manifesta. É justamente nessa faixa de blindagem solar que as câmeras especiais sensíveis ao UV podem detectar a atividade corona durante o dia.

As câmeras UV captam os sinais luminosos do corona e o sobrepõem na imagem convencional, indicando por meio de fâculas (regiões luminosas ou píxeis com alta intensidade) exatamente a região de ocorrência do fenômeno (OFIL SYSTEMS, 2017; UVIRCO TECHNOLOGIES, 2017). Portanto, duas imagens são captadas: uma imagem de fundo, representando o equipamento ou trecho de linha que se quer verificar, e uma imagem de fâculas, que é sobreposta à primeira. Essas imagens são processadas pela câmera e podem ser extraídas no formato de vídeo.

Na Figura 2.12, é apresentado o diagrama esquemático do funcionamento da câmera *Daycor II* (LINDNER, 2004). A luz é captada em todo o espectro disponível por

um dispositivo de câmera convencional. Paralelamente, um filtro UV capta a luz na faixa entre 240 e 280 nm. A luz filtrada atinge a lente e sensor ICCD (*Intensified Charge-Coupled Device*) e é processada pela câmera UV. As câmeras são alinhadas por espelhos para que capturem a mesma imagem em espectros de luz distintos. Após o processo de captura, as imagens geradas pelas duas câmeras são misturadas e é possível localizar a região de ocorrência das descargas no equipamento elétrico. Os sinais das duas câmeras podem ser exibidos na tela do dispositivo em conjunto ou separadamente por meio de três canais de vídeo distintos: um canal da imagem visível, um canal da imagem das descargas e um canal com as duas imagens misturadas.

Figura 2.12. Diagrama esquemático do princípio de funcionamento da câmera DAYCOR II.
(Fonte: adaptado de LINDNER, 2004).



O parâmetro utilizado pelas câmeras UV para quantificar a emissão luminosa do corona é a quantidade de fótons captados pelo sensor. Geralmente, as câmeras apresentam essa quantidade em fótons captados por minuto (fótons/min.). A quantidade de fótons varia se houver variação do ganho de detecção. A tecnologia utilizada para alterar o ganho de detecção UV baseia-se na utilização placas de micro canais que servem para dispersar os elétrons. Essa dispersão ocorre em três estágios e multiplica a quantidade de elétrons que atinge o sensor ICCD, aumentando a área de captação da descarga. Assim, a área da descarga que aparece na imagem pode ser alterada, principalmente, pela variação do ganho UV, mas também pela variação da distância de captação.

Um dos fenômenos físicos associados à captação da radiação luminosa das descargas corona e que deve ser levado em consideração na pesquisa trata da atenuação da luz. Assim como qualquer radiação eletromagnética, que apresenta característica ondulatória, a luz sofre atenuação na medida em que se afasta da fonte que a originou.

Segundo a lei do inverso do quadrado da distância, a amplitude da radiação varia na razão inversa do quadrado da distância. Assim, por exemplo, considerando que uma fonte luminosa de intensidade fixa é pontual e está no centro de uma esfera de raio r , a densidade de fluxo luminoso φ será dada pela quantidade de fluxo luminoso incidente I dividida pela área de superfície da esfera, de acordo com a expressão em (2.13):

$$\varphi = \frac{I}{4\pi r^2}. \quad (2.13)$$

2.3.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens serve para dois propósitos principais. O primeiro trata da extração de informações da imagem para posterior interpretação humana. O segundo trata do armazenamento, transmissão e representação da imagem para processamento computacional autônomo (GONZALEZ & WOODS, 2008). Em ambos os casos é evidente a necessidade de informações paramétricas que permitam quantificar a imagem em termos numéricos.

Existem duas principais técnicas de exploração de informações de imagens digitais (ALBUQUERQUE, 2016):

- *Image Enhancement*: melhoria da qualidade da imagem, evidenciando as regiões de interesse, para posterior julgamento do indivíduo;
- *Análise ou Parametrização*: utilização de medidas quantitativas para descrição da informação dentro de uma imagem.

2.3.2.1 IMAGEM DIGITAL

Uma imagem digital pode ser generalizada como uma representação discreta de dados que processam informação espacial e de intensidade relacionadas à localização e cor (SOLOMON & BRECKON, 2013). A representação espacial da imagem é dada em termos de elementos individuais denominados píxeis, que são referidos por índices de localização por linha e coluna. Portanto, a imagem digital pode ser representada por uma matriz, em que a cada posição de pixel é dado um valor referente à intensidade de cor.

Assim, o pixel I localizado na linha m e coluna n da imagem possui um valor relativo à intensidade de cor, como em (2.14):

$$\text{Valor} = I(m, n). \quad (2.14)$$

A imagem digital possui um ou mais canais de cor. Geralmente, os sistemas digitais adotam os três canais de cor aditivos RGB constituídos por vermelho (*R-red*), verde (*G-green*) e azul (*B-blue*). Dessa maneira, a representação matricial da imagem possui três dimensões, em que a primeira representa a quantidade de linhas, a segunda representa a quantidade de colunas e a terceira representa a quantidade de canais de cor. A intensidade $I(m, n)$ de um pixel em uma imagem digital representada no sistema RGB, portanto, é referida como em (2.15):

$$I(m, n) = (I_r(m, n), I_g(m, n), I_b(m, n)), \quad (2.15)$$

em que, $I_r(m, n)$ representa a intensidade do pixel em vermelho (canal R), $I_g(m, n)$ representa a intensidade do pixel em verde (canal G) e $I_b(m, n)$ representa a intensidade do pixel em azul (canal B).

Na Figura 2.13(a), uma imagem com suas dimensões representadas em termos de linhas e colunas é mostrada. Na Figura 2.13(b), é mostrada a representação em três canais de uma imagem. Na Figura 2.14, a imagem original e suas decomposições em RGB são apresentadas.

Além da representação em cores, as imagens podem ser determinadas de acordo com o tipo de dados armazenados nas localizações dos píxeis. Dessa maneira, existem as imagens binárias, que são matrizes ou conjuntos bidimensionais que alocam um dos valores numéricos do conjunto binário $\{0, 1\}$ em cada um dos píxeis, formando uma imagem em preto (valor de píxel 0) e branco (valor de píxel 1). Outra representação é caracterizada pelas imagens de intensidade ou escala de cinza. Neste caso, as imagens também são representadas por matrizes bidimensionais que alocam, na posição de cada píxel, um valor de intensidade limitado ao conjunto estabelecido pela resolução de *bit*. Por exemplo, uma imagem de 8 *bits* irá conter um conjunto de 256 valores de intensidade de píxel. Na Figura 2.15(a) e (b) estão mostrados, respectivamente, a imagem binária e em escala de cinza da imagem mostrada na Figura 2.13(a).

Figura 2.13. (a) Espaço bidimensional de uma imagem digital $M \times N$. (b) Representação em 3D de uma imagem digital. (Fonte: próprio autor)

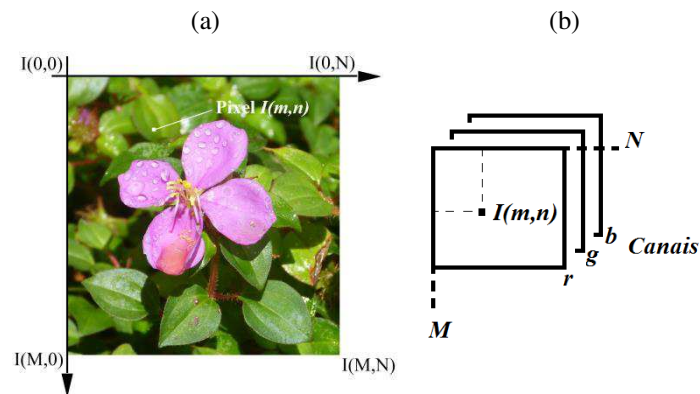


Figura 2.14. Imagem decomposta em RGB. (Fonte: próprio autor)



Figura 2.15. Representação de imagem (a) binária e em (b) escala de cinza. (Fonte: próprio autor)



2.3.2.2 RESOLUÇÃO

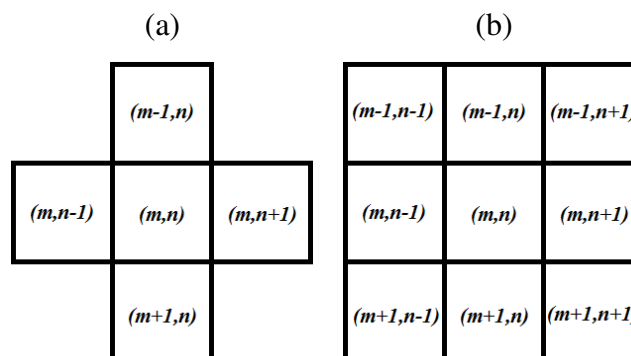
A capacidade de representação de informações visuais de uma imagem é definida por sua resolução (SOLOMON & BRECKON, 2013). Geralmente, a resolução de uma imagem pode ser decomposta em três parâmetros: resolução espacial, temporal e a nível de bit. O primeiro refere-se ao tamanho da imagem ($M \times N$) e indica a quantidade de píxeis, sendo referido como resolução de pixel. O segundo parâmetro refere-se às imagens em

composição contínua, como em um vídeo, e indica quantidade de imagens (quadros ou *frames*) por segundo adotada. O terceiro parâmetro refere-se à quantidade bits utilizados para representar o sistema de cores/intensidades da imagem. Os parâmetros de qualidade e, portanto, de quantização de uma imagem estão completamente correlacionados aos parâmetros de resolução.

2.3.2.3 VIZINHANÇA DE PÍXEIS

Com o conhecimento da resolução de uma imagem é possível ter conhecimento da quantidade de píxeis. Os píxeis podem ser correlacionados por intensidade de cor (nível de cinza, por exemplo) pela utilização de operações aritméticas. Esta tarefa requer a utilização de critérios de vizinhança entre os píxeis. Existem duas formas de vizinhança básicas para imagens 2D. A vizinhança-4 relaciona um pixel (m,n) aos seus vizinhos nas coordenadas verticais e horizontais, de forma que a vizinhança é representada por 4 píxeis, como é mostrado na Figura 2.16(a). A vizinhança-8 relaciona um pixel (m,n) a todos os píxeis que fazem fronteira nas coordenadas verticais, horizontais e diagonais, de forma que 8 píxeis são representados, como mostrado na Figura 2.16(b).

Figura 2.16. (a) Representação da vizinhança-4 de um pixel. (b) Representação da vizinhança-8 de um pixel. (Fonte: próprio autor)



2.3.2.4 SEGMENTAÇÃO

A segmentação de uma imagem consiste em subdividi-la em regiões de interesse. A segmentação completamente autônoma é uma das tarefas mais difíceis do processamento digital de imagens (SOLOMON & BRECKON, 2013). Por outro lado, essa

etapa desempenha um papel muito importante, visto ser o primeiro passo para a execução de outras tarefas tais como extração de características, classificação e descrição.

Genericamente, a segmentação se dá pela aplicação de critérios que estabeleçam as diferenças a serem notadas pelo computador entre os objetos da imagem. Geralmente, utilizam-se características de intensidade, com a aplicação de um limiar (*threshold*), ou textura. Um dos métodos de segmentação mais difundidos, devido à sua simplicidade, é a binarização. A binarização consiste em estabelecer o limiar e converter os píxeis de intensidade maior que o limiar para valor 1 e os de menor intensidade para valor 0 (BACKES & SÁ JÚNIOR, 2016). O resultado é a imagem binária, como a do exemplo apresentado na Figura 2.15(a). Em processamentos computacionais, não é prático para o usuário estabelecer o limiar, tendo em vista que o universo de imagens pode ser variado.

A adoção de um limiar automático no processo de binarização de uma imagem que depende de características intrínsecas à imagem pode ser realizada pelo método de Otsu. O método de Otsu consiste em identificar um valor de limiar que minimiza a variância dentro das classes de píxeis brancos e pretos, a partir da aplicação desse limiar em uma imagem em escala de cinza. Ou seja, o limiar estabelecido resulta em um agrupamento de classes em que a intensidade de píxel é bem caracterizada de acordo com a média e a variância de cada classe (SOLOMON & BRECKON, 2013). As vantagens do algoritmo de Otsu são: a ampla separabilidade entre as classes, a estabilidade numérica, a não necessidade de supervisão, e a simplicidade (OTSU, 1979). Por ser tão simples, possui as seguintes limitações: a adoção do limiar não leva em consideração a vizinhança (relação espacial) entre os píxeis, é insensível às variações no campo de iluminação e só pode ser aplicado em imagens onde pode ocorrer a subdivisão entre primeiro e segundo plano (SOLOMON & BRECKON, 2013). Para os propósitos da segmentação de imagens de descargas corona, que são representadas por píxeis brancos na imagem UV, o algoritmo de Otsu é suficiente para uma segmentação automática e segura.

Um método que considera as relações espaciais entre píxeis é baseado na subdivisão de regiões correlatas pela posição e intensidade dos píxeis e é denominado simplesmente segmentação por crescimento de região (*region growing*). A segmentação por crescimento de região requer a utilização de píxeis sementes que servirão para comparação de similaridade entre píxeis vizinhos e posterior agregação à região da semente. Neste caso, o critério de agregação está submetido a uma faixa de tolerância entre as informações dos píxeis. A vantagem do método consiste em obedecer às relações espaciais de acordo com a localização de píxeis estabelecida de forma não supervisionada.

Esse método é muito comum na segmentação de imagens onde o primeiro plano é constituído por muitos objetos e o objetivo é segmentá-los. As limitações deste método consistem, essencialmente, na adoção dos critérios de similaridade para a detecção das bordas dos objetos.

2.3.2.5 DETECÇÃO DE BORDAS

A detecção de bordas é a etapa do processamento digital da imagem que tem por objetivo identificar as fronteiras entre os objetos. Isso se dá a partir da aplicação de critérios de intensidade entre os contornos dos objetos. Em muitos casos, a suavidade das bordas dos objetos pode dificultar a sua detecção. Uma vez identificadas as bordas de determinado objeto, pode-se notar que ele está segmentado (SOLOMON & BRECKON, 2013).

Fundamentalmente, as técnicas de detecção de bordas são baseadas no uso de filtros diferenciais de gradiente, tais como os denominados núcleos de Prewitt e de Sobel, o filtro laplaciano de gaussiano, o método de Canny e a aplicação de *Wavelets* (PREWITT, 1970; WALKER, 1999; SOLOMON & BRECKON, 2013).

Por outro lado, se o critério de intensidade for considerado em uma imagem binária (branco e preto) simplesmente, a detecção das bordas de um objeto nessa imagem se limita a analisar a vizinhança dos píxeis. Desta maneira, o critério a ser utilizado na detecção de bordas em imagens binárias considera se um ou mais píxeis da vizinhança de um pixel possuem intensidade distinta do pixel central. Se isso for verdadeiro, a probabilidade de o pixel central estar localizado na borda do objeto é elevada.

2.3.2.6 PROCESSAMENTO MORFOLÓGICO

As operações morfológicas são utilizadas, normalmente, em imagens binárias, para transformação das regiões do primeiro plano e filtragem dos ruídos. Os operadores morfológicos mais simples são os de dilatação e erosão. As operações morfológicas são baseadas na comparação dos píxeis das bordas dos objetos de primeiro plano na imagem com o píxel central do elemento estrutural escolhido. O elemento estrutural é uma matriz binária em que um píxel central é escolhido e uma conectividade de 4 (vizinhança-4) ou 8 (vizinhança-8) é escolhida. A dimensão da matriz do elemento estrutural depende, muitas vezes, da resolução a nível de píxel, portanto, sua escolha depende das configurações da

imagem e pode influenciar na quantidade de operações morfológicas realizadas nos processos de dilatação e erosão.

O processo de erosão irá remover os píxeis das bordas dos objetos de primeiro plano na imagem, transformando esses píxeis em píxeis de segundo plano, ou seja, um píxel de borda com intensidade 1 será transformado em píxel de intensidade 0. A operação matemática do processo de erosão e de dilatação de uma imagem binária A a partir de um elemento estrutural B é conforme em (2.16) e em (2.17), respectivamente:

$$A \ominus B = \{z \in E | (B)_z \subseteq A\} \quad (2.16)$$

$$A \oplus B = \{z \in E | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2.17)$$

em que E é um espaço Euclidiano, do qual A faz parte, $(B)_z$ é a translação de B pelo vetor z , ou seja: $(B)_z = \{b + z | b \in B\}$, $\forall z \in E$ e \hat{B} é o simétrico de B , em que $\hat{B} = \{z \in E | -z \in B\}$.

Estas expressões podem ser entendidas da seguinte forma: ao sobrepor o pixel central do elemento estruturante sobre um pixel qualquer em A , verifica-se se todos os píxeis do elemento estruturante coincidem com os píxeis de A e sendo positiva a resposta, o píxel de A é mantido, caso contrário, significa que o píxel de A está em uma borda e ele é eliminado, se o processo é de erosão, ou os píxeis do elemento estruturante são mantidos em A , se o processo é de dilatação.

2.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo foram discutidos os mecanismos das descargas em gases, com ênfase nas descargas corona. Além disso, as principais características dos isoladores poliméricos foram discutidas, bem como foram introduzidos os conceitos sobre a captação e o processamento das imagens UV. No próximo capítulo é apresentada uma revisão do estado da arte que versa sobre os principais mecanismos de falhas em isoladores poliméricos e as principais pesquisas que envolvem a caracterização das descargas corona e do comportamento dos isoladores com base no processamento digital de imagens UV.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Lichtenberg (1778) introduziu o estudo dos efeitos das descargas corona através de uma técnica de diagnóstico utilizada até os dias atuais: a análise de imagens.

Com o avanço das tecnologias de imagem, diversas técnicas foram desenvolvidas com a finalidade de diagnosticar os estados de operação dos equipamentos de alta tensão, notadamente, dos sistemas de isolamento. A principal razão é o efeito prejudicial das descargas corona ao desempenho desses sistemas, principalmente os que são constituídos por componentes com materiais poliméricos.

O uso de imagens como ferramenta de diagnóstico de isoladores poliméricos não é recente e existem diversas metodologias disponíveis baseadas, por exemplo, nas tecnologias de detecção da irradiação térmica do infravermelho, no uso de câmeras convencionais de vídeo e fotografia, aéreas ou em solo, e no uso de câmeras de detecção do espectro luminoso na faixa do ultravioleta. Contudo, qualquer que seja a tecnologia envolvida, a aplicação do processamento digital de imagens se faz, muitas vezes, necessária, quer seja como forma de realizar tratamento para melhoria da imagem, quer seja para encontrar padrões pré-determinados, quer seja para quantificar ou parametrizar o fenômeno físico envolvido.

Os autores Moore e outros (1991) foram pioneiros na detecção e processamento de imagens UV para quantificação de parâmetros elétricos ao proporem a parametrização das imagens de descargas corona para medição do nível de tensão em sistemas de corrente contínua. Desdobramentos dos seus trabalhos estão bem relatados por Moore e outros (2000) e Li e outros (2004).

A tecnologia atual das câmeras de detecção do ultravioleta permite captar imagens mesmo durante o dia. O uso de câmeras de detecção UV facilita a localização de pontos de ocorrência de descargas corona em linha, principalmente, nos isoladores. Dessa forma, não só a localização, mas também a quantificação e ponderação do fenômeno são essenciais para auxiliar o diagnóstico do defeito.

Assim, o processamento da imagem tornou-se uma ferramenta de captura e extração de informações e parâmetros relacionados às descargas corona proporcionando uma linha de pesquisa bem definida. Neste enfoque, a seguir serão descritos e comentados

os trabalhos mais relevantes que tratam da parametrização das imagens UV para diagnóstico de isoladores poliméricos.

3.1 MÉTODOS DE PARAMETRIZAÇÃO DA IMAGEM UV APLICADOS AO DIAGNÓSTICO DE ISOLADORES

O primeiro trabalho que trata da parametrização da imagem ultravioleta aplicada à quantificação das descargas corona é de autoria de Pinnangudi e outros (2005). Os autores obtiveram relações lineares entre a intensidade dos píxeis da descarga na imagem (fácua), a área da descarga na imagem e a magnitude da descarga (em nanocoulombs [nC]). Os autores utilizaram câmeras dos modelos CoroCAM 2 e CoroCAM 3 para captação das imagens das descargas e mediram a magnitude das descargas através do método clássico da IEC 60270. A partir de medições com diferentes modelos de isoladores, os autores constaram que as aproximações foram satisfatórias e concluíram que as imagens podem ser utilizadas para obtenção de parâmetros quantificáveis, os quais apresentaram boa correlação com a magnitude da descarga corona. Além disso, os autores avaliaram os efeitos da distância de captação e da umidade relativa do ar (sob névoa) nos valores de intensidade dos píxeis na imagem, obtendo, para diferentes valores de magnitude de descarga, que a intensidade dos píxeis varia com o inverso do quadrado da distância de captação e que quanto mais elevado o nível de umidade, menos intenso se torna o píxel.

Os autores realizaram o processamento da imagem dividindo-a entre plano de fundo e imagem do corona. Para isso, eles compararam as intensidades dos píxeis para cada região da imagem com a intensidade de píxel máxima do plano de fundo. Uma vez segmentada a imagem, os autores obtiveram a intensidade acumulada dos píxeis da descarga e a sua área. O problema do cálculo da intensidade de píxeis é que este varia com a iluminância do ambiente, com a exposição (grau de contraste) e a abertura da câmera. Além disso, as câmeras UV apresentam píxeis luminosos de intensidade máxima (1 ou 255) para identificar as descargas corona. Dessa forma, a comparação entre diferentes intensidades de píxeis é dispensável, visto que todos os píxeis de descarga passam a ter os mesmos valores de intensidade, a não ser os píxeis de borda, que não representam uma quantidade significativa na imagem de alta resolução. Assim, mais parâmetros devem ser obtidos a fim de parametrizar a imagem UV.

Um dos primeiros trabalhos que analisou o comportamento da contagem de fótons (*photon counting rate*) apresentada pela câmera foi conduzido por Ma e outros (2006). Os autores tiveram como objetivo observar o comportamento da contagem de fótons, da magnitude da descarga e dos pulsos de corrente de descarga sob a variação da tensão aplicada em arranjos pré-definidos. Assim, os autores propuseram que, por meio da avaliação conjunta destes parâmetros, era possível observar as etapas do processo de condução de eletricidade nos gases, quais sejam: a descarga inicial, a descarga sustentada pelo processo de Townsend, a descarga sustentada pelo mecanismo de *streamer* e a ruptura do dielétrico. De acordo com os autores, foi possível observar que os parâmetros refletem o comportamento do processo de formação das descargas e que a contagem de fótons pode caracterizar o comportamento da magnitude da descarga e do valor de pico dos pulsos de corrente da descarga. Entretanto, até os dias atuais, a contagem de fótons ainda não se consolidou como parâmetro de quantificação das descargas corona.

Shong e outros (2007) conduziram uma investigação orientada na parametrização da imagem UV com o objetivo de detectar condições próximas à ocorrência de *flashover* sobre isoladores cerâmicos. Para tanto, os autores analisaram unicamente o comportamento do diâmetro médio da fâcula sob a variação do ganho UV e da tensão aplicada. Os autores encontraram que, para qualquer dos ganhos utilizados, as descargas corona começaram a ser detectadas quando a tensão aplicada atingiu 25% da tensão de *flashover*. Além disso, os autores determinaram limiares de criticidade baseados no diâmetro da fâcula que serviram para auxílio ao diagnóstico. Entretanto, cada um dos limiares é dependente, principalmente, do ganho UV utilizado e da distância de captação.

Baseados no trabalho de Ma e outros (2006), Liu e outros (2008) apresentaram os resultados do comportamento da contagem de fótons da câmera sob níveis de tensão distintos. Os autores consideraram que a contagem de fótons pode ser um parâmetro de quantificação da intensidade da descarga corona, uma vez que a estabilidade do parâmetro durante a captação pôde ser comprovada por um erro inferior a 3%. Entretanto, os autores alcançaram este resultado obtendo apenas as relações entre os níveis de tensão aplicados a condutores e a contagem de fótons por minuto. Uma vez que as descargas corona se relacionam não somente com os níveis de tensão, mas com a geometria dos sistemas, bem como com as condições atmosféricas do ambiente, não é suficiente inferir que o comportamento das descargas corona é determinado unicamente pelo nível de tensão do sistema. Portanto, a quantificação das descargas corona pela contagem de fótons da forma como os autores apresentaram é insuficiente.

A partir de medições com diferentes configurações de campo elétrico, em arranjos ponta-plano e com tensões CA e CC aplicadas, Zang e outros (2008) concluíram que a contagem de fótons por minuto não reflete a magnitude das descargas corona, mas pode ser utilizada como um parâmetro de referência para a intensidade da radiação ultravioleta. Os autores investigaram o comportamento da contagem de fótons sob diversas perspectivas, dentre elas sob a variação da tensão e a comparação com a magnitude das descargas parciais. Para diferentes configurações de campo elétrico e sob a mesma tensão aplicada, valores distintos de descargas parciais, assim como, de fótons emitidos foram encontrados. Além disso, os autores puderam obter o comportamento da contagem de fótons sob a variação da distância de captação e sob a variação do ganho UV. A contagem de fótons variou com o inverso do quadrado da distância e apresentou uma relação não linear com o ganho UV. Para o modelo de câmera utilizado (CoroCAM 504), a contagem de fótons cresceu com o aumento do ganho UV até cerca de 60% do ganho máximo. A partir desse ganho, a contagem de fótons decresceu até se estabilizar a partir de 80% do ganho máximo. Por fim, os autores sugeriram o uso do ganho UV próximo a 60% e uma distância fixa de captação próxima a 6 metros, a fim de garantir a máxima sensibilidade da câmera para a contagem de fótons.

Cardoso e outros (2009) investigaram a aplicabilidade do uso de câmeras UV na detecção de descargas corona em medições em laboratório, enquanto que Li e outros (2017) investigaram a mesma aplicabilidade em campo. Os autores trabalharam na mesma linha de raciocínio do uso da contagem de fótons como parâmetro de quantificação das imagens de descargas corona. Entretanto, Cardoso e outros (2009) investigaram apenas a correlação da contagem de fótons com os níveis da tensão de rádio interferência emitidos pelas descargas corona em diferentes componentes de linha: cabos, cadeias de isoladores e buchas; enquanto que Li e outros (2017) apenas relataram as diferenças existentes entre a contagem de fótons/minuto de diversos equipamentos em campo. Os resultados alcançados por Cardoso e outros (2009) permitiram verificar um comportamento similar entre a contagem de fótons e a tensão de rádio interferência em função da tensão aplicada. Além disso, em ambos os trabalhos, os autores verificaram a dependência da contagem de fótons à variação dos parâmetros de medição investigados: a tensão aplicada e o ganho UV.

Em Zhou e outros (2009) e Zhou e outros (2011), os autores deram prosseguimento ao trabalho de Ma e outros (2006) ao proporem a quantificação da intensidade luminosa das descargas corona a partir do cálculo da área percentual da

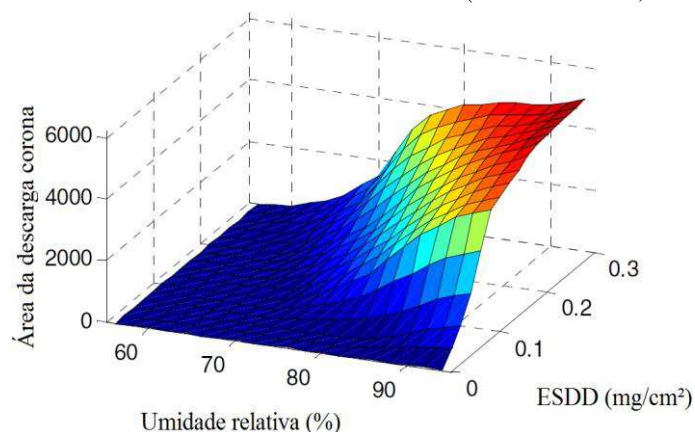
fácua. Os autores analisaram o comportamento da área percentual da fácua em diferentes níveis de tensão e espaçamento aplicados a um arranjo ponta-plano, e puderam observar os diferentes estágios de ocorrência das descargas, desde o nível de inepção das descargas corona até à ruptura. Mas, o principal objetivo dos autores foi encontrar uma expressão que relatasse a aproximação para o comportamento da área percentual da fácua em função da distância de captação, definida por:

$$y_1 = 0,033 \cdot x_2^2 \cdot y_2 \cdot e^{(0,4125 - 0,075x_2)}, \quad (3.1)$$

na expressão, y_1 é a área percentual estimada para uma distância de captação de 5,5 m, x_2 é a distância de captação adotada na medição e y_2 é a área percentual obtida na medição calculada no processamento digital de imagem. Com essa aproximação, os autores estabeleceram critérios de decisão baseados na área percentual obtida na medição da ocorrência de ruptura para indicar os estágios das descargas.

Tendo em vista que a análise do comportamento das descargas corona através da extração de atributos pelo processamento digital de imagens se mostrou promissor, Lu e outros (2010), seguidos por Ai e outros (2015), propuseram a avaliação do grau de poluição em isoladores a partir dos dados paramétricos da área das descargas corona e da contagem das descargas em um intervalo de tempo definido. Ao verificar as correlações entre a área das descargas na imagem, o nível de ESDD aplicado e a umidade relativa do ar, conforme está apresentado na Figura 3.1, Lu e outros (2010) propuseram o uso de um sistema de inferência do grau de poluição baseado na Lógica *Fuzzy*. A partir de regras pré-definidas e de intervalos ordenados em função dos valores máximos e mínimos encontrados para cada um dos parâmetros nas medições, os autores encontraram correlações com relativa acurácia entre o grau de poluição aplicado ao isolador e o grau inferido pelo sistema *Fuzzy*, sendo possível concluir que o uso de dados paramétricos da imagem UV podem ser utilizados como referência ao diagnóstico.

Figura 3.1. Comportamento da área da descarga corona na imagem UV em função da variação da umidade relativa do ar e do nível de ESDD. (Fonte: Lu *et al.*, 2010)

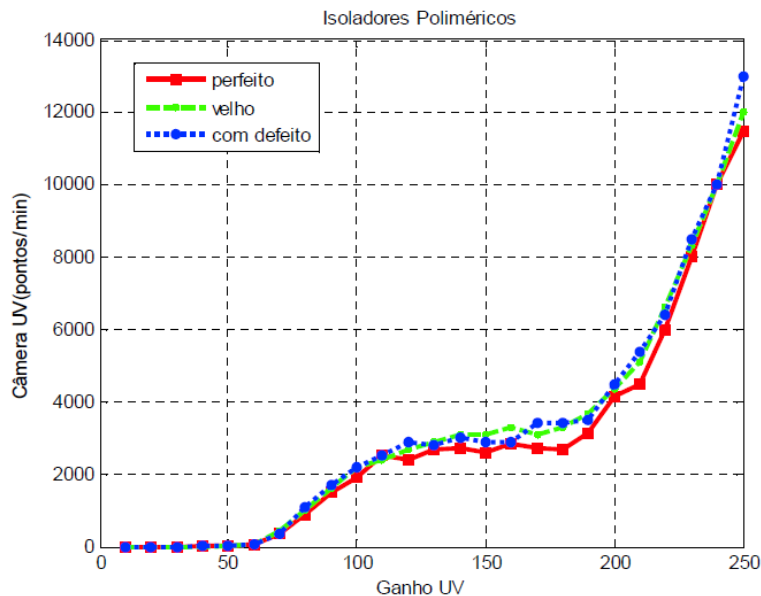


Considerando que o diagnóstico das condições operacionais de isoladores poliméricos requer o uso de parâmetros robustos, dentre eles, os que representam o comportamento das descargas corona, em Barros (2011) e em Barros e outros (2011) os autores propuseram uma metodologia de processamento digital de imagens UV aplicado na quantificação das descargas corona. O objetivo do trabalho foi utilizar a quantificação do corona, a partir das imagens, para classificar o grau de deterioração de isoladores. Para tanto, os autores realizaram ensaios com arranjos de eletrodos e isoladores com defeitos emulados e compararam o comportamento da contagem de fótons por minuto com a concentração de píxeis na imagem da descarga corona e com a magnitude das descargas parciais (em picocoulombs [pC]). Os três parâmetros foram obtidos em diferentes faixas de valores de acordo com a variação da tensão aplicada sobre os eletrodos e sobre os isoladores. Os autores encontraram que tanto a contagem de fótons por minuto quanto a concentração de píxeis têm comportamentos crescentes com o aumento da tensão e o crescimento é tão acentuado quanto menor a distância de captação da imagem. Quando comparada com a concentração de píxeis, a contagem de fótons tem um crescimento até certo ponto, quando começa a saturar.

Contudo, os autores não deixaram claro como realizaram o cálculo da concentração de píxeis. Apenas explicitaram que escolheram imagens, dentre as captadas, que apresentavam uma descarga visualmente mais intensa; e que os ruídos foram desconsiderados a partir do momento em que apareciam em menos de 30% das imagens, sendo o restante dos píxeis de intensidade superior considerados como píxeis de descarga. Por outro lado, a avaliação da contagem de fótons realizada pelo autor revelou o seu comportamento quando o ganho UV da câmera *Daycor II* foi variado. Como está mostrado na Figura 3.2, existe uma região em que a contagem de fótons por minuto é

linear com o aumento do ganho, o que justifica utilizar ganhos nessa faixa de valores: entre 120 e 160.

Figura 3.2. Contagem de pontos UV por minuto *versus* variação do ganho UV da câmera. (Fonte: BARROS, 2011).



No seu trabalho, Xu e outros (2011) introduziram o uso de redes neurais artificiais aplicadas ao reconhecimento de padrões de descargas corona em imagens UV. Os autores observaram três estágios diferentes das descargas corona, em que a área absoluta da descarga foi calculada. A partir dos padrões definidos através de diversas medições, os autores conseguiram obter aproximações que os permitiram classificar os níveis de criticidade das descargas corona de acordo com a magnitude da área da descarga obtida na imagem.

Em contrapartida ao uso da contagem de fótons como parâmetro principal na quantificação das descargas corona, Lu e outros (2012a) e Lu e outros (2012b) propuseram o uso dos parâmetros área da descarga (fácua) e diâmetro na parametrização da imagem UV. A justificativa dos autores se baseia nos seguintes aspectos: a contagem de fótons é não linearmente dependente do ganho UV e da distância de captação e não pode ser medido ou calculado automaticamente, uma vez que é um parâmetro interno à câmera e apresentado na imagem captada. Para justificar sua escolha, os autores avaliaram o comportamento de isoladores poliméricos com cinco condições operacionais distintas, as quais foram classificadas como: normal, satisfatório, poucas marcas de deterioração, deteriorado e deterioração severa. Os testes foram realizados nas condições

molhada e a seco e em três níveis de tensão. Os autores encontraram relações de alta similaridade entre a área e o diâmetro das descargas para cada uma das situações investigadas. Além disso, foi possível distinguir os níveis dos parâmetros nas diferentes condições operacionais dos isoladores.

Han e outros (2014) investigaram a influência do ganho UV, da distância de captação e das condições atmosféricas no ambiente de medição sobre o comportamento da contagem de fótons. Ao avaliar a influência das condições atmosféricas, os autores demonstraram que a umidade relativa do ar tem influência nas medições em campo e é fator determinante na obtenção da contagem de fótons (e na imagem, de forma geral) uma vez que há uma variação do comportamento das descargas corona e alterações na propagação da radiação UV. Em dias adjacentes, mas com umidades relativas distintas (50% e 76%), os autores verificaram que o aumento da umidade relativa do ar provocou a atenuação do efeito visual das descargas corona.

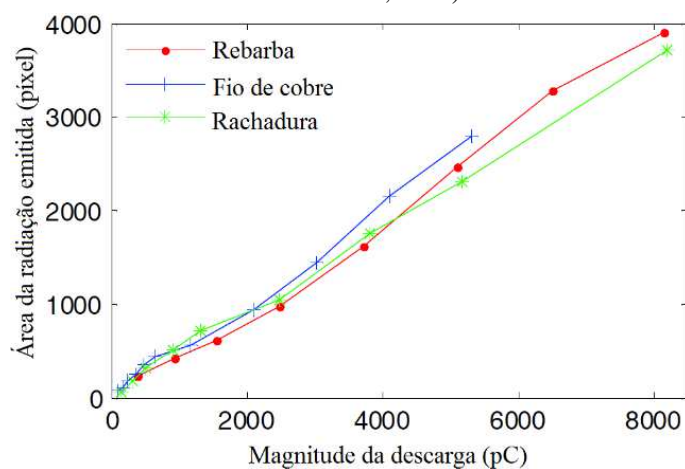
Via de regra, os autores obtiveram relações não lineares entre a contagem de fótons e a distância. Nos casos avaliados, a contagem de fótons manteve a tendência proporcional ao inverso do quadrado da distância. Em função do ganho UV, entretanto, a contagem de fótons variou de forma distinta da encontrada por Barros (2011). Os autores utilizaram o mesmo modelo de câmera, mas, por sua vez, observaram um crescimento acentuado da contagem de fótons até o ganho 140 e, em seguida, um decréscimo acentuado até o ganho 190, seguido por uma estabilização. Este fato denota que a avaliação paramétrica da imagem UV com base unicamente na contagem de fótons ainda não demonstra aplicabilidade consolidada.

Em contrapartida, Li e outros (2016) apresentaram resultados da avaliação da contagem de fótons de dois modelos distintos de câmera UV (CoroCAM 6D e Ofil Superb) sugerindo o uso deste parâmetro como ferramenta de diagnóstico, desde que obedecidas as aproximações para as diferentes condições de captação. Os autores demonstraram, em diferentes casos estudados, que o comportamento da contagem de fótons apresentado pelos dois modelos de câmera UV em função da variação do ganho UV e da distância de captação não é trivial e deve ser aproximado por funções matemáticas. Tais aproximações basearam os autores na escolha de valores fixos de ganho para cada um dos modelos de câmera UV (ganho UV 80% para a câmera CoroCAM 6D e ganho UV 120 para a câmera *Ofil Superb*).

Wang e outros (2014) desenvolveram uma metodologia para estimar a magnitude das descargas corona em isoladores poliméricos a partir da parametrização da imagem

UV e uso de lógica neuro-*fuzzy*. O único parâmetro extraído das imagens UV foi a área da descarga (em píxeis). Sua relação com a magnitude da descarga medida (em pC) foi encontrada. Os resultados apresentados para os três modelos de emulação de descargas corona em isoladores poliméricos (com rebarba, fio de cobre e rachadura), representam comportamentos lineares e relativamente similares entre si, como reproduzido na Figura 3.3. A estratégia adotada pelos autores para quantificar a magnitude das descargas corona, a partir do cálculo da área da descarga, considerou as aproximações deste parâmetro sob a influência da variação do ganho UV e da distância de captação. Com as aproximações calculadas, os autores adotaram um sistema baseado em lógica Neuro-*Fuzzy*. Para diminuir a complexidade do sistema, os autores adotaram modelos independentes em função dos ganhos UV (50, 60, 70 e 80% para o modelo CoroCAM504) e as entradas do sistema se limitaram às variáveis área da descarga e distância de captação. Como resultado, os autores obtiveram estimações satisfatórias e sugerem o uso da área da descarga como parâmetro de quantificação da magnitude das descargas corona.

Figura 3.3. Relação entre a área da descarga (em píxeis) e a magnitude da descarga (em pC). (Fonte: WANG *et al.*, 2014)



Um trabalho muito similar ao de Wang e outros (2014) foi publicado por Zhang e outros (2016). Neste último, os autores propuseram que o uso da área da fâcula como parâmetro de quantificação das descargas corona é mais efetivo que a contagem de fótons por minuto apresentado pela câmera, porque a área cresce monotonamente com o incremento do ganho UV e obedece à lei do inverso do quadrado da distância, enquanto que a contagem de fótons tem uma variação não linear com o ganho UV, apresentando mais de um valor para ganhos distintos.

Oliveira Neto e outros (2015) avançaram na procura por mais parâmetros que pudessem indicar o comportamento das descargas corona ao proporem o uso não só da área da fâcula, como também, da persistência e da distância da fâcula em relação às áreas consideradas críticas à operação segura dos isoladores poliméricos. Embora o trabalho não seja conclusivo os autores avaliaram quatro casos distintos de ocorrência de descargas em isoladores e verificaram que a avaliação conjunta dos parâmetros pode ser utilizada como referência na tomada de decisão sobre o diagnóstico.

Guedes (2015) e Guedes e outros (2015) propuseram uma metodologia de auxílio à tomada de decisão sobre a manutenção de isoladores poliméricos baseada na avaliação da imagem ultravioleta e no uso de lógica *fuzzy*. Os autores utilizaram a metodologia de processamento de imagem proposta por Barros (2011) para encontrar a concentração de píxeis de descarga na imagem. Nos seus trabalhos, está mais claro como é feito o processamento, do ponto de vista do cálculo utilizado para determinar a concentração de píxeis. Dessa forma, os autores determinaram a concentração de píxeis como a área da fâcula. Eles utilizaram a mesma quantidade de imagens que Barros (2011) e o mesmo critério para diminuição de ruídos. Um dos resultados mais relevantes do trabalho dos autores diz respeito à avaliação da influência da umidade nos parâmetros da imagem da descarga. A umidade relativa do ar apresentou uma relação diretamente proporcional à contagem de fótons por minuto e à concentração de píxeis. Com os valores de concentração de píxeis e os correspondentes valores de umidade obtidos nos experimentos em laboratório, os autores desenvolveram um sistema lógico *fuzzy* e determinaram os níveis de degradação dos isoladores avaliados.

Uma vez que os parâmetros da imagem se correlacionam profundamente com as condições físicas e atmosféricas do ambiente de medição, é necessário entender o comportamento das descargas corona em situações distintas. Souza (2016b) investigou o aparecimento do efeito corona na superfície de isoladores poliméricos quando estes são submetidos às condições adversas, como: formação de gotas e formação de gotas com poluição. Em diversos arranjos, o autor avaliou o nível de tensão disruptiva (ou de início do corona) e estimou as concentrações de campo elétrico. O autor explicitou a intensidade das descargas através da quantidade de pixels associada ao brilho das descargas. Como resultado, o autor observou que tanto a tensão de início de corona como a condutividade das gotas de água não se apresentaram como parâmetros determinantes para a intensidade das descargas, por não ter encontrado correlações seguras entre eles. Mesmo em dois arranjos sob condutividade semelhante, uma tensão de início menor pôde gerar uma

intensidade maior de descargas. Por outro lado, o autor também observou que a intensidade das descargas corona está associada aos níveis de tensão aplicados, principalmente, em campos não uniformes. Ainda, com arranjos de esferas metálicas, que emulavam gotas de água na superfície de isoladores poliméricos, o autor observou que o aumento da distância da esfera ao ponto energizado do isolador provoca um aumento na intensidade das descargas e, conseqüentemente, na intensidade dos píxeis, porque a tensão de início de corona também é maior neste caso. Assim como, o autor verificou que quanto mais distante a esfera estiver do núcleo do isolador (no eixo do ponto energizado) menor é a intensidade do campo elétrico na região. Este resultado demonstrou que as regiões de maior distorção de campo influenciam mais facilmente no surgimento das descargas corona, corroborando com a justificativa da investigação de seus efeitos nos isoladores poliméricos. Não somente isso, o autor demonstrou que a poluição depositada na superfície do isolador, associada à presença de gotas de água, provoca o surgimento de descargas corona.

Dando continuidade ao trabalho de Oliveira Neto e outros (2015), Brito (2017) e Brito e outros (2017) propuseram uma metodologia para o aprimoramento da classificação de isoladores poliméricos baseada na extração de atributos de imagens UV. O trabalho dos autores se concentrou na formatação de técnicas de processamento digital de imagens, com vistas à extração eficiente de atributos da imagem e análise de sensibilidade desses atributos em relação à quantidade de quadros a serem processados e o limite de ruído a ser considerado dentro do intervalo de píxeis de fâcula (imagem da descarga). O processamento digital utilizado pelos autores para a extração dos atributos é robusto no sentido em que consegue descrever satisfatoriamente a região da fâcula, com eliminação de ruídos, apresentando a área efetiva da fâcula, o perímetro, o fator de forma e a persistência.

Além disso, os autores ainda obtiveram os resultados das distâncias entre a fâcula e as partes constituintes do isolador: núcleo, primeira aleta e ferragem fase. A área da fâcula foi calculada como a quantidade de píxeis da região de fâcula resultante da soma de todos os quadros analisados. O perímetro foi calculado sobre a mesma região de fâcula como a quantidade de píxeis de borda. O fator de forma foi calculado como a relação entre a área e o perímetro da região de fâcula. Finalmente, a persistência considerada pelos autores foi calculada de duas maneiras. Primeiro, como a persistência absoluta, em que a intensidade dos píxeis foi somada ao longo do tempo e, segundo, como a persistência relativa, em que o resultado da persistência absoluta foi dividido pela área da

fácua. Esse cálculo não só é válido, como se baseia efetivamente no grau de aparecimento da descarga limitada à região da fácua. Como os autores realizam a integralização dos quadros conforme o aparecimento da fácua e a imagem soma é um resultado médio da intensidade dos píxeis ao longo do tempo, a fácua é formada por píxeis de intensidades distintas em que a maior intensidade representa o píxel mais persistente. Os resultados de persistência apresentados pelos autores foram considerados para dois isoladores poliméricos de 230 kV, sendo um novo e um envelhecido, e foram muito próximos: 212,16 e 221,74, respectivamente. Por outro lado, as áreas encontradas foram muito distintas: 2943 e 1360 píxeis, respectivamente. Os autores encontraram esses resultados para diferentes quantidades de quadros e limite de ruído considerados. Comparando os resultados de persistência e área, constata-se que o isolador novo apresentou uma fácua maior com uma persistência muito similar à fácua do isolador envelhecido, sendo que as áreas são muito distintas, o que demonstra uma maior suscetibilidade do isolador envelhecido à degradação. O cálculo de persistência realizado pelos autores se assemelha muito com o cálculo proposto por este trabalho, com a diferença de que, aqui, conta-se efetivamente a quantidade de vezes em que um píxel aparece, formando-se “camadas” de píxeis dentro da área de fácua considerada. Sendo assim, o resultado da persistência (adimensional) é no mínimo 1 e aumenta conforme a descarga apareça mais vezes.

Ribeiro (2017) realizou um estudo de classificação de isoladores poliméricos a partir dos resultados obtidos em medições termográficas e de radiação UV. Segundo a autora, foram utilizadas técnicas de processamento digital de imagens para obter os seguintes parâmetros das imagens UV: densidade de píxeis, persistência e distância das descargas em relação ao núcleo do isolador. Os parâmetros foram calculados em cada quadro das imagens captadas, sendo que cada um foi dividido em 16 partes iguais. A autora não deixou explícito como realizou o cálculo de tais parâmetros durante o processamento. Entretanto, pelos resultados apresentados, a densidade de píxeis foi obtida pela contagem fótons por minuto da própria câmera, condição que não evidencia que o cálculo tenha sido realizado por processamento da imagem. Além disso, o resultado da densidade foi apresentado como a quantidade de píxeis dentro de cada uma das 16 partes de cada quadro. A nomenclatura do parâmetro seria mais adequada se fosse utilizada quantidade de píxeis por quadro ou, simplesmente, área de fácua. Por outro lado, o resultado apresentado pela autora se justifica para ser utilizado no algoritmo de tomada de decisão baseado em RNA e a estratégia de dividir o quadro em 16 partes é

muito consistente com a necessidade de uma quantidade expressiva de dados para treinamento da rede.

Adicionalmente, conforme a análise dos resultados apresentados, o parâmetro persistência foi calculado considerando o somatório da quantidade de píxeis dentro de cada uma das 16 partes durante um intervalo de 20 segundos ou cerca de 600 quadros. A persistência pode ser calculada dessa forma, demonstrando quais quadros apresentaram maior acúmulo de píxeis, ou descargas, ao longo do tempo. Entretanto, da forma como é calculada, a persistência não se correlaciona diretamente com a área da fâcula, tendo em vista que áreas de fâcula de tamanhos distintos podem conter descargas mais ou menos persistentes. Portanto, não se pode correlacionar, como a autora o fez, com um grau de persistência ou frequência de ocorrência da descarga.

Como se viu nos trabalhos anteriores, a parametrização da imagem UV é complexa e depende de fatores internos e externos à câmera. Uma informação útil, mas que é difícil de ser obtida nos catálogos dos fabricantes, é sobre a forma como a contagem de fótons é calculada e obtida. A contagem de fótons não é, necessariamente, obtida pela contagem de elétrons que bombardeiam o sensor óptico da câmera. Existe um processamento digital interno à câmera que calcula a quantidade estimada de pontos luminosos que aparecem na tela em um intervalo definido, geralmente, segundos ou minutos.

Ainda, conforme medições realizadas, mas não publicadas, com diferentes modelos de câmeras, a contagem de fótons não apresenta um padrão definido. Cada modelo apresenta uma faixa de valores distinta, o que significa que não há uma padronização deste parâmetro. Portanto, a contagem de fótons serve apenas como um referencial de captação para baixa, média ou alta atividade corona, que não é, necessariamente, quantificável. Ou seja, a quantificação das descargas corona única e simplesmente pela avaliação da contagem de fótons não é suficiente.

Devido aos questionamentos à eficiência do uso da contagem de fótons para quantificação das descargas corona, os diversos autores citados anteriormente buscaram soluções para o problema da detecção, avaliação, monitoramento, processamento e diagnóstico de imagens UV. Este autor, pela análise dos trabalhos publicados, verificou uma tendência ao uso da área da fâcula como parâmetro principal de análise, tendo sido reiteradamente justificado pelos diversos outros autores. Entretanto, somente alguns autores consideraram o comportamento probabilístico das descargas corona e, portanto, do comportamento da fâcula em suas análises. A área da fâcula, quando avaliada em um

intervalo muito curto, não representa suficientemente o fenômeno, por que este é dinâmico em sua natureza.

Dessa maneira, parâmetros de persistência da fâcula e distribuição de píxeis ao longo do tempo foram introduzidos aos estudos. Em um trabalho recente, Luo e outros (2017) propuseram uma análise influenciada pelo tempo de captação, em que as áreas de maior incidência de descargas foram avaliadas e correlacionadas às fontes de descargas. Além disso, os autores investigaram qual seria o tempo suficiente de captação, tendo em vista que um tempo curto traz poucas informações e que estão mais suscetíveis aos ruídos e que um tempo muito longo introduziria redundância no sinal captado. Assim, os autores encontraram que um intervalo de captação entre 1000 quadros (33,3 segundos) e 3000 quadros e (100 segundos) é necessário para se obter dados estatísticos suficientes para a análise.

O resumo dos trabalhos discutidos neste Capítulo é apresentado na Tabela 3.1. Assim, as principais contribuições de cada um dos trabalhos são destacadas. A inserção deste trabalho também pode ser vista na Tabela 3.1 de forma resumida.

Na revisão bibliográfica realizada, verificou-se que a grande maioria das pesquisas são voltadas para os estudos da parametrização da imagem UV e quantificação das descargas corona. Também se verificou que grande parte dos estudos se limita aos estudos da parametrização da imagem sem considerar a variação estatística do fenômeno das descargas corona. Portanto, a quantificação das descargas corona no tempo ainda não foi realizada. Além disso, poucos trabalhos apresentaram métodos de caracterização das condições operacionais de isoladores poliméricos, com o objetivo de estimar o grau de criticidade das descargas corona.

Pelo exposto e objetivando contribuir para o aprimoramento dos estudos acerca da caracterização das descargas corona a partir da parametrização da imagem UV, bem como, a possibilidade de estimação das condições operacionais de isoladores poliméricos, esta tese propõe um método para extração de atributos das imagens UV e correlação com os atributos das descargas corona.

O comportamento da contagem de fótons é avaliado com o objetivo de obter os intervalos ótimos de ganho UV para o modelo de câmera utilizado e uma distância de captação suficiente para a caracterização das fâculas. Os atributos obtidos pelo processamento digital de imagens são: a área da fâcula integrada no tempo, a persistência da fâcula, ou densidade de píxeis que constituíram a área da fâcula integrada, a quantidade média de píxeis/quadro e o número de objetos (fâculas) ao longo do tempo (que se

relaciona com a contagem de fótons). Portanto, considerando o comportamento probabilístico das descargas corona, e considerando que a captação das imagens foi realizada sincronicamente com a medição das descargas em pC, esta tese realiza uma análise do comportamento dos atributos da imagem ao longo do tempo e introduz o uso do mapa de persistência como forma de estimar o grau de criticidade das descargas corona. Assim, a análise pelos graus de criticidade das descargas corona é correlacionada às condições operacionais dos isoladores poliméricos.

Tabela 3.1. Resumo das principais contribuições citadas na Revisão Bibliográfica.

Referência	Contribuições					
	1	2	3	4	5	6
Pinnangudi e outros (2005)			✓		✓	
Ma e outros (2006)	✓				✓	✓
Shong e outros (2007)		✓	✓			✓
Liu e outros (2008)	✓					✓
Zang e outros (2008)	✓	✓			✓	
Cardoso e outros (2009)	✓					
Zhou e outros (2009)		✓	✓			✓
Lu e outros (2010)			✓			✓
Zhou e outros (2011)		✓	✓			✓
Barros (2011)	✓	✓	✓		✓	
Barros e outros (2011)	✓	✓	✓		✓	
Xu e outros (2011)			✓			✓
Lu e outros (2012a)			✓			✓
Lu e outros (2012b)			✓			✓
Han e outros (2014)	✓	✓				
Wang e outros (2014)			✓		✓	✓
Ai e outros (2015)		✓	✓			✓
Oliveira Neto e outros (2015)			✓	✓		✓
Guedes (2015)	✓		✓			✓
Guedes e outros (2015)	✓		✓			✓
Li e outros (2016)	✓	✓				
Zhang e outros (2016)	✓	✓	✓			
Brito (2017)			✓	✓		
Ribeiro (2017)	✓		✓	✓		✓
Li e outros (2017)	✓					✓
Luo e outros (2017)			✓	✓		
Esta Tese (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1 – Avaliação do comportamento da contagem de fótons;
2 – Parametrização dos atributos de captação da câmera UV;
3 – Extração de atributos da imagem UV;
4 – Definição de atributos correlacionados ao tempo de captação;
5 – Correlação dos atributos das imagens com os atributos das descargas corona;
6 – Estimativa do grau de criticidade das descargas.

3.2 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo foram discutidos os resultados das principais pesquisas sobre o monitoramento e o diagnóstico de isoladores poliméricos, com foco nas técnicas de processamento de imagens UV, e justificados os objetivos e contribuições alcançados por esta tese. No próximo capítulo serão apresentados os procedimentos computacionais e práticos adotados no desenvolvimento desta tese.

4 PROCEDIMENTOS E ABORDAGENS PRÁTICAS

Neste Capítulo são apresentados os procedimentos adotados e as abordagens realizadas para atingir os objetivos da tese. Os procedimentos estão divididos entre procedimentos experimentais e computacionais. Os procedimentos experimentais realizados são: a captação das imagens UV das descargas corona, a medição de descargas parciais e a inspeção visual de isoladores poliméricos, além dos ensaios em alta tensão realizados em cada uma das abordagens. Os procedimentos computacionais são: o processamento digital de imagens, que apresenta os métodos elaborados nesta tese para extração de atributos das descargas corona, e a extração de atributos dos sinais de descargas parciais.

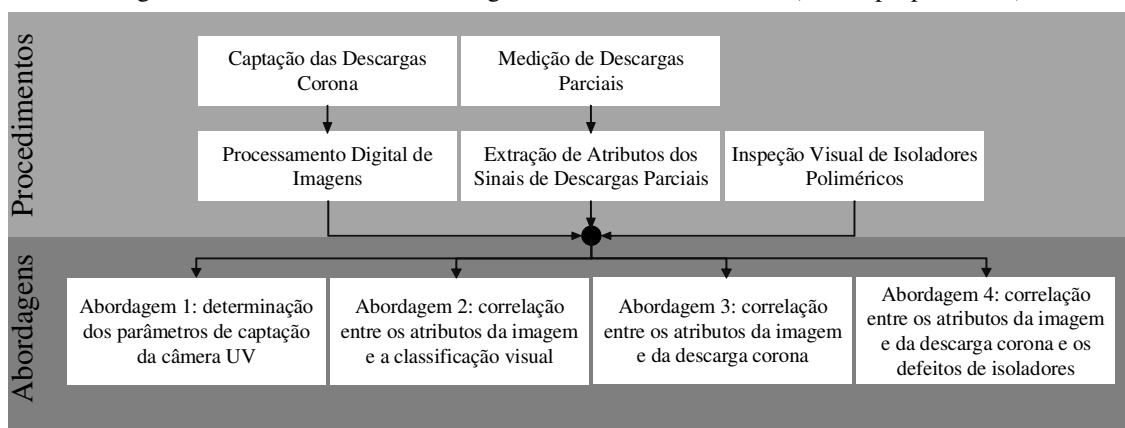
As abordagens práticas são:

- Abordagem 1: determinação dos parâmetros de captação da câmera UV, que tem o objetivo de estabelecer os critérios e parâmetros a serem utilizados durante a captação das imagens UV nas demais abordagens, além de avaliar a sensibilidade dos atributos da imagem à variação dos principais parâmetros de captação;
- Abordagem 2: correlação entre os atributos da imagem e a classificação visual, que tem o objetivo de analisar as correlações entre os diferentes atributos obtidos no processamento digital de imagens e a classificação dos isoladores poliméricos obtida usando a inspeção visual baseada no guia EPRI (2006);
- Abordagem 3: correlação entre os atributos da imagem e das descargas corona, que tem o objetivo de analisar as correlações entre os diferentes atributos obtidos no processamento digital de imagens e os atributos estatísticos das descargas corona obtidos usando a medição e extração de atributos de sinais de descargas parciais;
- Abordagem 4: correlação entre os atributos da imagem e da descarga corona e os defeitos dos isoladores, que tem o objetivo de estabelecer correlações no tempo entre os atributos da imagem e os atributos da descarga corona, considerando a variação estatística destes atributos. Além disso, esta abordagem tem o objetivo de estimar o grau de criticidade

da descarga corona com base na obtenção do mapa de persistência da imagem, caracterizando as condições operacionais dos isoladores com defeitos.

Os procedimentos e as abordagens estão sumarizados no diagrama mostrado na Figura 4.1. Como cada uma das abordagens adotou os procedimentos de forma particular, eles são apresentados primeiro, para atenuar a repetição de dados e informações. Durante as apresentações das abordagens, está claro quais procedimentos foram adotados em cada uma delas.

Figura 4.1 Procedimentos e abordagens realizados no trabalho. (Fonte: próprio autor)



Durante os ensaios em alta tensão, todos os procedimentos contidos nas normas de segurança para serviços em eletricidade (NR 10) foram rigorosamente executados.

4.1 CAPTAÇÃO DAS DESCARGAS CORONA

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA UV

A câmera UV utilizada nesta pesquisa foi fabricada pela *Ofil Systems*. O modelo de câmera utilizado é denominado *Daycor II*, que utiliza a tecnologia de blindagem da luz solar absoluta, permitindo realizar medições durante o dia.

De acordo com o fabricante, a sensibilidade da câmera *Daycor II* para detecção da radiação luminosa ultravioleta é de 3×10^{-18} W/cm² e ela é capaz de detectar descargas corona a partir de 1,5 a 2 pC de magnitude, considerando uma distância de 8 metros para captação (OFIL LTD., 2003). Além disso, o fabricante também garante que o dispositivo é capaz de localizar as descargas corona a distâncias de até 150 m (OFIL LTD., 2003). A

cadência (taxa de amostragem) da câmera UV é de 30 quadros por segundo (*FPS – frames por segundo*).

Os parâmetros de captura que estão disponíveis para ajuste são: foco, exposição (*exposure*), *zoom* óptico e ganho UV. Todos eles podem ser ajustados automaticamente e dependem da distância de captura. A experiência demonstrou que distâncias de captura muito elevadas não permitem uma boa focalização do objeto, mesmo com o *zoom* no seu máximo valor.

O ganho UV varia entre 0 e 250, em passos de 10. O valor de ganho UV altera a contagem de pontos por minuto realizada pela câmera UV, embora exista uma faixa de ganho entre 120 e 160 em que a contagem de fótons por minuto é independente do ganho UV (BARROS, 2011).

Quanto mais alto o ganho, mais sensível se torna o sensor do sinal luminoso da descarga. O resultado é uma fâcula maior apresentada na tela. Quanto mais próximo de 0, mais difícil se torna de detectar e visualizar a descarga. Quanto mais próximo de 250, mais difícil se torna de visualizar a região de ocorrência da descarga, a não ser a uma distância relativamente grande. Por esse motivo, ganhos muito elevados se tornam relativamente úteis para distâncias de captação elevadas. Entretanto, além de amplificar o sinal da descarga, o ganho também amplifica o sinal de ruído. A variação do ganho UV em conjunto com a variação da distância de captação altera, consideravelmente, os resultados obtidos.

4.1.2 CAPTAÇÃO E MELHORIA DA IMAGEM

Uma vez que a resolução da imagem digital influencia diretamente na capacidade quantitativa e qualitativa dos parâmetros a serem extraídos no processamento computacional, a captação das imagens UV requer o uso de soluções que visem uma melhor qualidade da imagem. O modelo *Daycor II* requer um sistema de captação externo para leitura e armazenamento das imagens geradas. A câmera UV possui três canais de vídeo, mas somente uma saída de vídeo analógica com conexão BNC (*Bayonet Neill-Concelman connector*) coaxial codificada em cores nos sistemas PAL (*Phase Alternating Line – 25 FPS*) ou NTSC (*National Television System(s) Committee – 29,97 FPS*). O conector coaxial pode ser adaptado para uma conexão de saída de vídeo analógica do tipo RCA (*Radio Corporation of America*). Durante os procedimentos experimentais

as imagens foram captadas e armazenadas em formato de vídeo mpeg-2 (*Moving Picture Experts Group/ISO*).

O sistema de captação sugerido pelo fabricante para a câmera *Daycor II* é uma câmera filmadora digital acoplada e com a entrada de vídeo conectada à saída analógica, visando a portabilidade do sistema como um todo, importante nas inspeções de campo.

Para uso em laboratório esta câmera pode ser substituída por uma placa de captura de vídeo com conversão analógico/digital, conforme o modelo mostrado na Figura 4.2. A resolução da imagem captada por meio deste dispositivo é superior de 720x480 píxeis.

Uma prática simples que facilita o processamento digital é o uso do canal UV da câmera. Tendo em vista que, neste canal, a imagem captada se resume às fâculas de descargas corona, a segmentação entre o primeiro plano (fâcula de píxel branco) e o plano de fundo fica facilitado. Portanto, foi adotada essa estratégia nas captações em que o nível de ruído da imagem interferia na identificação das fâculas. Em um primeiro momento, a imagem do isolador é capturada e, em seguida, a imagem das fâculas no canal UV. Ao final do processamento computacional, é possível misturar as imagens e estabelecer a localização das descargas em relação ao isolador. Essa prática, contudo, só é válida se o posicionamento da câmera durante toda a captação permanecer inalterado.

Figura 4.2. Fotografia do modelo de placa de captura utilizado com solução para melhoria da resolução da imagem captada pela câmera UV. (Fonte: próprio autor)



4.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Visando contribuir para o aprimoramento das técnicas de caracterização das descargas corona a partir da parametrização da imagem UV, bem como, a possibilidade de estimação das condições operacionais de isoladores poliméricos, esta tese propõe um método para extração de atributos das imagens UV baseado na análise, no tempo, das descargas. Além disso, avançando nas técnicas de extração utilizadas pelos diversos trabalhos apresentados no Capítulo 3, esta tese apresenta uma alternativa ao cálculo da

persistência, bem como introduz o uso do mapa de persistência, como forma de determinar a localização e a taxa de recorrência das descargas corona.

Durante os procedimentos para processamento das imagens, as seguintes etapas foram realizadas:

- *Image Enhancement*: melhoria da qualidade e condições da imagem para facilitar o processamento, segmentação e extração de atributos. Essa etapa está integrada à captação da imagem, como apresentado na subseção 4.1.2;
- Localização e segmentação das regiões de interesse: extração dos píxeis correspondentes às fâculas em cada quadro e à região principal ao final do processo de integração;
- Integração das fâculas: os píxeis extraídos na segmentação foram integralizados quadro a quadro a fim de formar regiões de persistência das descargas, em que o conjunto é chamado região principal. Juntamente com a segmentação, esta etapa está apresentada na subseção 4.2.1;
- Extração dos atributos: área da região principal, distribuição média de píxeis das fâculas para formar a região principal, persistência, mapa de persistência, e número médio de fâculas ao longo dos quadros (similar à contagem de fótons). Esta etapa está apresentada na subseção 4.2.2.

4.2.1 SEGMENTAÇÃO E INTEGRAÇÃO DAS FÁCULAS

O processo de segmentação das imagens captadas consiste na localização das regiões de interesse. As regiões de interesse em uma imagem de descargas corona são essencialmente: o isolador, o defeito do isolador e as fâculas da descarga. Entretanto, os atributos extraídos no processamento computacional limitam-se à análise da região das fâculas das descargas corona, obtendo parâmetros de intensidade, repetitividade e localização.

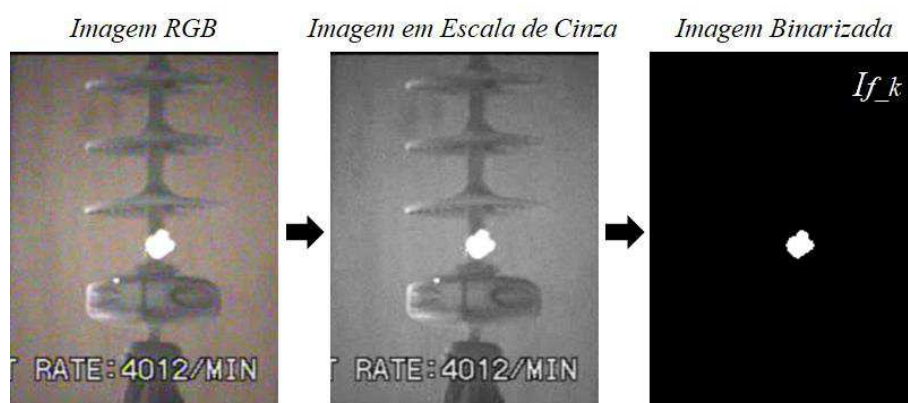
A segmentação adotada neste trabalho foi realizada em duas etapas. A primeira etapa refere-se à extração das fâculas em cada um dos quadros do intervalo de vídeo captado. A entrada é a imagem RGB extraída de cada quadro do vídeo captado. Essa imagem em formato de cor é transformada para a escala de cinza. Nesta etapa, as diferenças entre as intensidades de píxeis são acentuadas e a imagem sofre um ajuste de

contraste, a partir da função *imadjust* no ambiente Matlab. Esse ajuste permite que as bordas das regiões de interesse sejam mais facilmente identificáveis.

A partir da imagem em escala de cinza com contraste ajustado, um limiar de intensidade é aplicado para a binarização da imagem e segmentação das regiões onde a intensidade de cor é máxima. Para a imagem de 8 bits, a intensidade de cor máxima é 255. A fábula é constituída, majoritariamente, por píxeis brancos com valores de intensidade de 255. Após a aplicação de limiar de binarização, a imagem representa somente as regiões de interesse que localizam as fábulas das descargas. Neste caso, os píxeis da fábula passam a ter intensidade 1, e se localizam no primeiro plano da imagem, enquanto que os píxeis que não são fábula passam a ter intensidade 0, localizando-se no segundo plano da imagem. Este processo está ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.3. Processo de segmentação das imagens por meio da aplicação de limiar de intensidade de píxel.

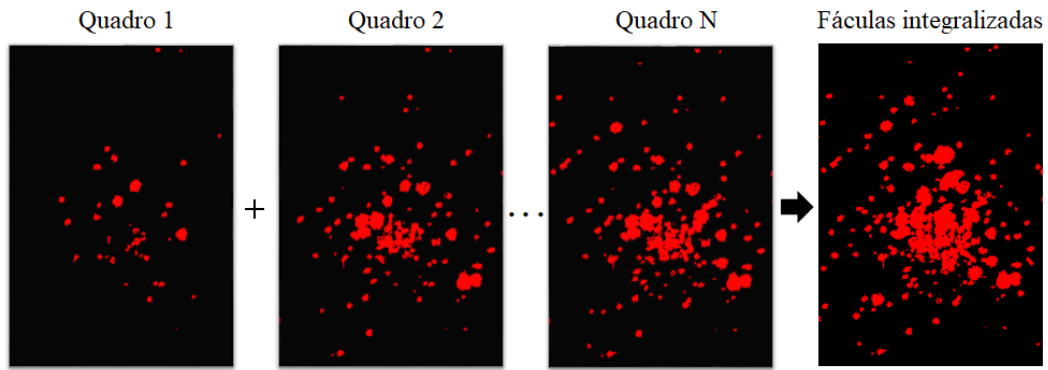
(Fonte: próprio autor)



A segunda etapa do processo de segmentação é mais complexa e é completamente baseada na observação do comportamento da descarga ao longo do tempo. Esta observação foi pouco explorada por outros autores, como visto na Revisão Bibliográfica. Entretanto, o fenômeno das descargas corona é dinâmico e apresenta variação estatística no tempo. Por isso, esta etapa é essencial para que as variações estatísticas sejam observadas.

A segunda etapa da segmentação tem dois objetivos. O primeiro objetivo é vinculado ao processo de integração das imagens das fábulas. A integração das fábulas é realizada com as imagens segmentadas em cada um dos quadros do tempo definido do vídeo. A taxa de amostragem da câmera de captação é de cerca de 30 *fps* (*frames* ou quadros por segundo), portanto, se 1 segundo de vídeo for adotado como intervalo de tempo, 30 quadros serão integrados para formar uma única imagem. O processo de integração das fábulas é representado como na Figura 4.4.

Figura 4.4. Processo de integração das fâculas. (Fonte: próprio autor)



No intervalo de tempo considerado, as imagens das fâculas segmentadas ($I_{f,k}$ – Imagem do *frame* k) são somadas uma à outra. A matriz que representará a imagem da região principal (I_{rp}), gerada nesta segunda etapa de segmentação, é o resultado da soma das intensidades de píxel de cada uma das imagens segmentadas na primeira etapa, sendo consideradas as localizações de cada píxel. Assim, na localização do píxel (m,n) da imagem I_{rp} estão somadas todas as intensidades dos píxeis de mesma localização (m,n) das imagens $I_{f,k}$, como representado pela expressão (4.1):

$$I_{rp}(m, n) = \sum_{k=1}^N I_{f,k}(m, n), \quad (4.1)$$

em que m e n representam, respectivamente, a quantidade de linhas e colunas na imagem e N representa o número total de *frames* (quadros) e depende do intervalo de tempo adotado.

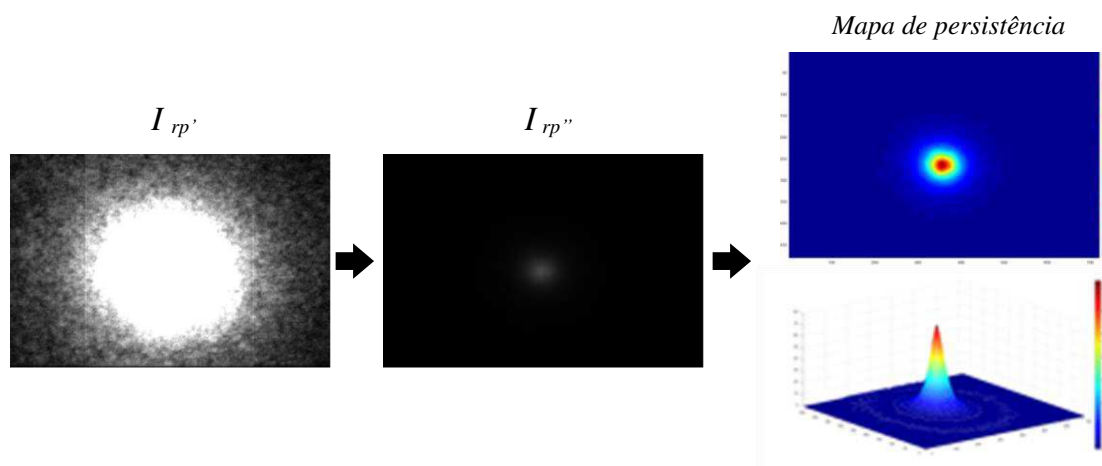
O resultado visual desta etapa de segmentação depende da quantidade de quadros adotada no processamento. Um cuidado foi tomado para evitar saturação, tendo em vista que a soma das intensidades que ultrapasse 255 satura no valor máximo de intensidade da imagem de 8 *bits*. Assim a matriz imagem I_{rp} sofre uma transformação para limitar a saturação dos píxeis, em intensidade 255, de acordo com a expressão em (4.2):

$$I''_{rp} = uint8\left(\frac{I_{rp}'}{(T) * 30} * 255\right), \quad (4.2)$$

em que I_{rp}' é a matriz original da imagem I_{rp} , obtida no processo de integração no intervalo T definido, I''_{rp} é a matriz imagem transformada, 30 é a taxa de amostragem do vídeo (30 *fps*) e a função *uint8* do Matlab serve para criar a matriz limitada a uma imagem de 8 *bits*.

Este processo cria uma imagem representativa da ocorrência de descargas ao longo tempo, pois considera a localização das descargas e a sua taxa de recorrência. Na Figura 4.5, o processo de transformação da imagem está representado. A primeira imagem é a representação da matriz I_{rp}' antes da transformação. Nesta imagem, ainda é possível ver as informações ruidosas a partir da textura em escala de cinza, que tende a possuir uma intensidade de píxel menor à medida que se afasta do centro da imagem, onde está localizada a região de recorrência das fâculas. A segunda imagem é a representação da matriz I_{rp}'' após o processo de transformação. As imagens seguintes, evidenciam a região de maior taxa de recorrência (ou seja, a persistência) das fâculas em cada localização de píxel. A estas imagens foram atribuídas a denominação de mapas de persistência.

Figura 4.5. Processo de segmentação para obtenção do mapa de persistência. (Fonte: próprio autor)



O segundo objetivo desta etapa da segmentação, após o processo de integração das fâculas, é segmentar a imagem da região principal de forma a limitar a região de análise de extração de atributos ao longo do tempo. Essa segmentação é feita em duas partes: segmentação dos planos da imagem por aplicação de limiar global pelo Método de Otsu e transformação morfológica para evidenciar a região principal sem ruídos. O Método de Otsu foi adotado aqui por permitir a segmentação automática, após o processo de integração, pela sua simplicidade para este tipo de imagem.

Entretanto, a aplicação do Método de Otsu não garante a separação completa da região principal dos ruídos da imagem. Assim, foi adotada uma transformação morfológica de abertura (erosão) e fechamento (preenchimento ou dilatação) da imagem. O processo de erosão remove as bordas dos objetos e, dessa maneira, objetos muito pequenos na imagem são excluídos. O sucesso da erosão de uma imagem é definido pelo elemento

estrutural utilizado e, neste caso, como os objetos (fáculas) têm uma tendência a apresentarem formatos circulares, foi escolhido como elemento estrutural um disco de vizinhança-4 e dimensão dinâmica, chamado a partir da função *strel* no Matlab. O processo de erosão ocorre até que se removam todos os objetos pequenos na imagem, segundo uma relação entre as áreas máxima e mínima dos objetos na imagem.

A dilatação é utilizada para devolver à estrutura da borda da fábula a quantidade de píxeis excluída na erosão. Assim, a mesma quantidade de iterações adotada na erosão é adotada na dilatação, e o resultado é a segmentação completa da região principal, que será utilizada como área de análise para extração dos atributos. Na Figura 4.6, está representado o processo desta etapa da segmentação. A entrada do processo de transformação morfológica é a matriz I_{rp}' obtida do processo de integração das fáculas. A saída é a matriz imagem I_{rp} que é a representação da fábula segmentada na região principal.

Figura 4.6. Processo de segmentação para se obter a região principal de análise e extração de atributos.
(Fonte: próprio autor)



4.2.2 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

A área da região principal (ou área F das fáculas integradas) é calculada sobre a imagem I_{rp} , resultante da integração das fáculas e do processo de transformação morfológica. O resultado da área é dado em quantidade de píxeis.

Um parâmetro correlacionado com a área da fábula e com a quantidade de fáculas no quadro da imagem é a contagem de fótons/minuto informada pela câmera UV no momento da captação (*blobcounter*). Esse parâmetro indica quantas fáculas ocorreriam em um minuto considerando que a quantidade instantânea de pontos no frame atual se mantivesse constante. O cálculo é realizado pela própria câmera e é atualizado a cada três segundos, durante a captação.

Um outro parâmetro considera a quantidade ou distribuição média de píxeis (D_m) em cada um dos quadros que formaram a área F da região principal. O cálculo é realizado usando a expressão em (4.3):

$$D_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k, \forall A_k \subset F, \quad (4.3)$$

em que k é o quadro atual, N é o número de quadros no intervalo considerado e A_k é a área da fâcula que integraliza a região principal F no quadro k . Como se trata de uma estimativa, deve ser indicada a variação desse parâmetro em formato de desvio padrão.

Outro parâmetro que pode ser extraído é persistência (P_p) da fâcula. Uma alternativa ao cálculo da persistência, proposta nesta tese, é a contagem da quantidade de camadas que podem ser formadas com píxeis dentro da área F . Ou seja, é medido o grau de sobreposição entre píxeis se forem colocados todos sobre a mesma área. Isso é realizado contando os píxeis das descargas que ocorreram, durante o intervalo de quadros, dentro da fâcula integrada de área F , conforme a expressão em (4.4):

$$P_p = \frac{1}{F} \sum_{k=1}^N A_k, \forall A_k \subset F. \quad (4.4)$$

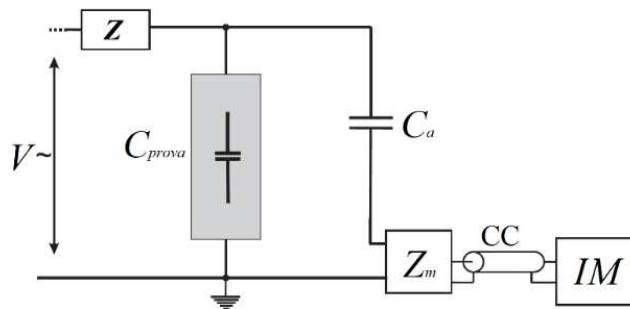
Por fim, mais um parâmetro que pode ser obtido no processamento de imagem é a quantidade de objetos (fâculas) que ocorreram em média ao longo do tempo em cada um dos quadros. Ele se correlaciona com a contagem de fótons/minuto apresentado pela câmera, tendo em vista que ele não leva em consideração o tamanho do objeto. Ou seja, quanto maior o tamanho das fâculas, menor o número de objetos apresentados em um quadro, porque as fâculas tendem a construir objetos na imagem sem fronteiras entre si.

4.3 MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

O método empregado para medição de descargas parciais foi baseado no método clássico da norma IEC 60270 (2000), como representado Figura 4.7. Os elementos que compõem os sistema apresentado são: a fonte de alta tensão alternada (V_{\sim}); a impedância (Z) para filtragem de eventuais ruídos oriundos do terminal de alta tensão; o corpo de prova (C_{prova}), que pode ser um arranjo de eletrodos, um isolador ou qualquer outro componente; o capacitor de acoplamento (C_a), que é isento de descargas parciais na tensão de ensaio e aumenta a sensibilidade da medição ao facilitar a circulação dos

impulsos de corrente de alta frequência; a impedância de medição Z_m , na qual os impulsos de corrente provocam uma queda de tensão proporcional ao pulso da descarga parcial; o instrumento de medição (IM) e o cabo coaxial (CC) (MACÊDO, 2014). Além de ser o método elétrico mais utilizado para medição de descargas parciais, a vantagem deste método é que, devido ao capacitor de acoplamento, tanto os instrumentos de medição quanto o operador estão eletricamente isolados do terminal de alta tensão.

Figura 4.7. Representação do arranjo experimental empregado na medição de DP. (Fonte: adaptado de IEC 60270, 2000)



O primeiro sistema utilizado nas medições de descargas parciais foi o LDS-6, fabricado pela Doble-Lemke®. De acordo com Macêdo (2014), o sistema possui dois canais independentes de aquisição de sinais, um para tensão e outro para pulsos de descargas. Os conversores analógico-digitais (A/D) são do tipo *flash* e sua taxa de amostragem é de até 10 MSa/s, permitindo medições em até 500 kHz. Além disso, os conversores A/D possuem resolução de 12 bits. A filtragem de ruídos externos emprega os sinais obtidos por uma antena específica. Os sinais são digitalizados por um canal independente para em seguida servirem como referência para a filtragem (MACÊDO, 2014).

O segundo sistema utilizado nas medições de descargas parciais foi um osciloscópio do modelo MDO4104B-3 da Tektronix®. O instrumento possui quatro (04) canais analógicos e largura de banda de 1 GHz. As medições foram realizadas a uma taxa de amostragem de 250 MSa/s, 5 MSa de memória por canal, capacidade de representação numérica de 16 bits por ponto e impedância de entrada de 1 M Ω (NÓBREGA, 2016). Esse segundo sistema foi empregado durante os períodos de manutenção do sistema LDS-6, como alternativa para as medições de descargas parciais.

A impedância de medição utilizada no sistema LDS-6, e aproveitada nas medições com o osciloscópio, é o impedor de medição LDM-5, também fabricado pela Doble Lemke®. O impedor possui uma largura de banda de 100 kHz a 20 MHz, um tempo de

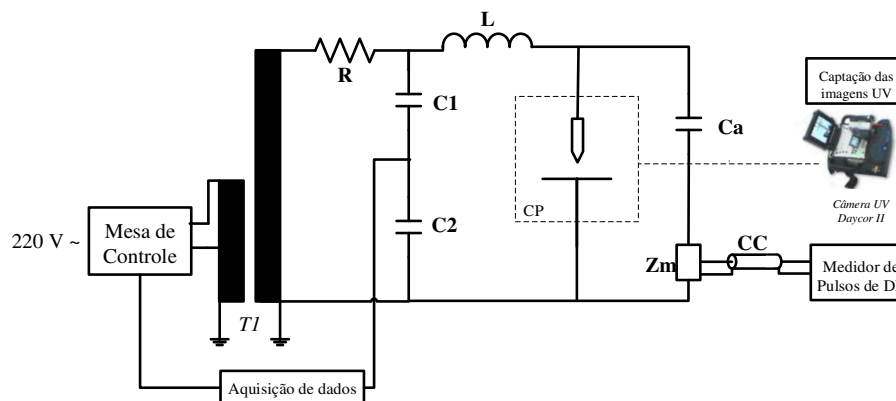
subida menor que 20 ns e uma corrente máxima permitida de 5 A (MACÊDO, 2014; NÓBREGA, 2016). O impedidor é um circuito ressonante, cuja função é prolongar os impulsos de corrente no domínio do tempo a fim de facilitar a sua detecção (METWALLY, 2004).

Como a medição realizada sobre a impedância Z_m é em volts, deve-se realizar previamente a calibração do sistema para determinar a relação entre a tensão medida e a carga efetivamente injetada no sistema. A calibração do sistema de medição, conforme orienta a IEC 60270, foi realizada por meio de um calibrador LDC-5, também fabricado pela Doble Lemke. Para a calibração, são utilizados os valores de 5, 20, 100 e 500 pC; tempo de subida menor que 60 ns; e trem de pulsos com frequência de 650 Hz (NÓBREGA, 2016). Segundo o fabricante, o erro no valor da amplitude é menor que ± 1 pC.

Além disso, a IEC 60270 estabelece que um pulso de carga conhecida seja aplicado paralelamente ao objeto de teste. Assim, a tensão medida (em mV) e a carga aplicada (em pC) podem ser comparadas. O processo consiste em determinar a relação entre o valor de pico da tensão adquirida, pelo sistema de medição, e a carga transferida pelo calibrador (NÓBREGA, 2016). Em seguida, obtém-se uma relação linear entre a tensão medida e a carga para efeito de medições futuras. A calibração do sistema deve ser realizada a cada alteração do arranjo em que os níveis de descargas parciais serão medidos, pois cada arranjo possui uma capacitância característica (IEC 60270, 2000).

O método de medição de descargas parciais aqui empregado foi utilizado na detecção de sinais de descargas parciais durante os procedimentos experimentais das Abordagens 1, 3 e 4, a serem apresentadas posteriormente. O diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado nestas abordagens está mostrado na Figura 4.8. A mesa de controle aciona o transformador TI , 100 kV/10 kVA. O resistor R (282 k Ω) limita a corrente de curto-circuito para proteção do transformador. O divisor capacitivo, composto pelos capacitores $C1$ e $C2$, permite a medição e controle seguro do nível de tensão de alimentação do circuito. O indutor L , de 15 mH, é utilizado para minimizar as interferências oriundas da fonte de tensão. Além disso, é utilizado um capacitor de acoplamento padrão Ca , de 1000 pF, e a impedância Z_m para medição do sinal de descargas parciais. O corpo de prova CP está representado dentro do retângulo com linhas pontilhadas. Os corpos de prova utilizados para a obtenção dos sinais de descargas parciais foram o arranjo ponta-plano e isoladores poliméricos.

Figura 4.8. Diagrama esquemático do arranjo experimental para parametrização da câmera *DAYCOR II*.
(Fonte: adaptado de IEC 60270)



4.4 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS DOS SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS

O método utilizado para processamento dos sinais das descargas parciais, quando o sistema de medição utilizado era o osciloscópio, foi baseado no trabalho de dissertação de Nóbrega (2016). O autor sugeriu o uso de filtragem *wavelet*. A identificação dos pulsos de descargas parciais utiliza a estratégia de detecção de cruzamento de nível, que, segundo o autor, consiste em estabelecer um limiar de ruído de fundo acima do qual o sinal é registrado como de descargas parciais. O limiar é necessário para evitar que resquícios do ruído, após o processo de filtragem, interfiram na identificação dos pulsos de descargas parciais (NÓBREGA, 2016).

Após a aquisição e filtragem dos sinais de descargas parciais, podem ser obtidos os parâmetros que descrevem as principais características dos sinais de descargas parciais. Em função do tempo de observação das descargas, os parâmetros obtidos podem ser subdivididos em três grupos: parâmetros básicos, parâmetros deduzidos e os operadores estatísticos.

Em resumo, os parâmetros básicos são observados em um ciclo da tensão, e são dados por: intensidade do pulso da descarga, tensão de inepção, que dá início ao aparecimento de descargas parciais, e a fase do pulso da descarga em relação à fase da tensão. Os parâmetros deduzidos consideram os vários ciclos da tensão aplicada, de acordo com o tempo de captação dos sinais, e são representados em termos de distribuições em função da fase da tensão. Dessa forma, para cada fase da tensão, dentre

vários ciclos, são obtidos os seguintes parâmetros: a soma das intensidades das descargas parciais, a quantidade de pulsos e os valores médio e máximo da intensidade dos pulsos. Assim, é possível obter distribuições das descargas em função da fase da tensão, quais sejam: a distribuição da contagem de pulsos, a distribuição da magnitude média dos pulsos e a distribuição dos valores de pico dos pulsos das descargas parciais. Essas distribuições descrevem as características intrínsecas do tipo de descarga parcial observado (GULSKI & KREUGER, 1992).

Por último, os operadores estatísticos podem ser obtidos. Dentre os principais operadores estatísticos utilizados na caracterização de descargas parciais, podem ser citados (GULSKI & KREUGER, 1992): o valor médio das descargas, a correlação cruzada, a assimetria da descarga, o desvio-padrão e a curtose. Normalmente, os operadores estatísticos são obtidos para cada semiciclo da tensão. Eles estão descritos sucintamente a seguir em função do número n de ciclos da tensão (HAUSCHILD e MOSCH, 1992; GIRIANTARI, 2006; MACÊDO, 2014):

- Valor médio: corresponde à média aritmética das intensidades dos pulsos de descargas parciais em cada semiciclo da tensão e seu cálculo é realizado a partir da expressão em (4.5):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; \quad (4.5)$$

- Desvio padrão (*standard deviation - std*): corresponde à dispersão ou grau de variabilidade da intensidade dos pulsos em função do valor médio e é calculado como em (4.6):

$$std = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ; \quad (4.6)$$

- Assimetria (*Skewness - S_k*): corresponde à simetria da distribuição em relação à distribuição normal. $S_k = 0$ indica uma distribuição simétrica, $S_k > 0$ indica uma assimetria para a esquerda e $S_k < 0$ indica uma assimetria para a direita. A assimetria é calculada como em (4.7):

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 f(x_i)}{\sigma^3 \sum_{i=1}^n f(x_i)} , \quad (4.7)$$

em que $f(x_i)$ é uma função distribuição de probabilidade, μ é calculado como em (4.8):

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)}, \quad (4.8)$$

e σ é calculado como em (4.9):

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)}; \quad (4.9)$$

- Curtose (*Kurtosis* - K_u): corresponde à medida de dispersão que caracteriza o formato do pico ou achatamento da distribuição em relação à distribuição normal. $K_u = 0$ indica uma distribuição normal, $K_u > 0$ indica uma distribuição mais arqueada e $K_u < 0$ indica uma distribuição mais planificada. A curtose é calculada como em (4.10):

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 f(x_i)}{\sigma^4 \sum_{i=1}^n f(x_i)}. \quad (4.10)$$

4.5 INSPEÇÃO VISUAL PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS

Os isoladores poliméricos utilizados neste estudo são de dois modelos, de fabricantes distintos, para linhas de transmissão de 230 kV. O modelo Rodurflex® CS3-096-SB-243-A (LAPP Insulators, 2017) e o modelo IPB 230/CB/160/EAP/73 (Balestro, 2019). Uma fotografia, bem como o esquemático dimensional do modelo de isolador Rodurflex® são mostrados na Figura 4.9(a) e (b), respectivamente. Na Tabela 4.1, são apresentadas as características mecânicas dos isoladores Rodurflex® e IPB.

Figura 4.9. (a) Fotografia do isolador polimérico Rodurflex® de 230 kV. (b) Características dimensionais do isolador polimérico. (Fonte: adaptado de FERREIRA, 2007)

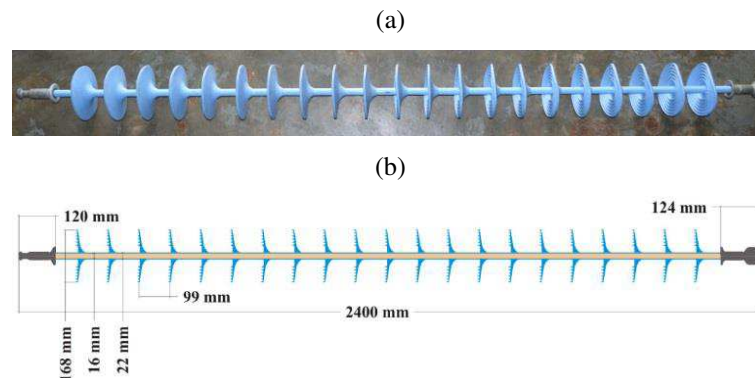


Tabela 4.1. Características mecânicas dos isoladores poliméricos utilizados nos ensaios. (Fonte: LAPP Insulators, 2017; Balestro, 2019)

Modelo de isolador	Número de aletas	Comprimento (mm)	Distância de escoamento (mm)	Distância de arco a seco (mm)
Rodurflex® CS3-096-SB-243-A	21	2400	6172	2210
IPB 230/CB/160/EAP/73	73	2340	8610	1975

Os isoladores Rodurflex® utilizados nos ensaios foram retirados de linha em condições de degradação e poluição distintas. Um total de 16 unidades de isoladores deste modelo foram cedidos pela CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco). Não há informações concretas do tempo de serviço em linha destes isoladores. Além dos isoladores Rodurflex®, a CHESF cedeu uma unidade do isolador IPB-Balestro em estado novo, que nunca entrou em serviço em linha.

Uma inspeção visual foi realizada com os 16 isoladores retirados de linha. Durante a inspeção visual, foram avaliadas as condições do revestimento do núcleo, das aletas, das ferragens e das emendas entre as ferragens e o núcleo, conforme os procedimentos de inspeção da norma IEC 61109 (2008), e as orientações formuladas por STRI (2003), EPRI (2006) e DOMINGUES (2012). Os critérios adotados na caracterização por inspeção visual estão mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Caracterização da inspeção visual. (Fonte: próprio autor)

Grau de caracterização	Núcleo e Revestimento	Aletas	Poluição	Ferragens	Emendas
1 – Verde	Revestido	Conservadas	Baixa	Sem corrosão	Fechadas
2 – Laranja	-	Com fraturas	Média	Corrosão leve	-
3 – Vermelho	Exposto	Danificadas	Alta	Corrosão alta	Danificadas

4.6 ABORDAGEM 1: DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CAPTAÇÃO DA CÂMERA UV

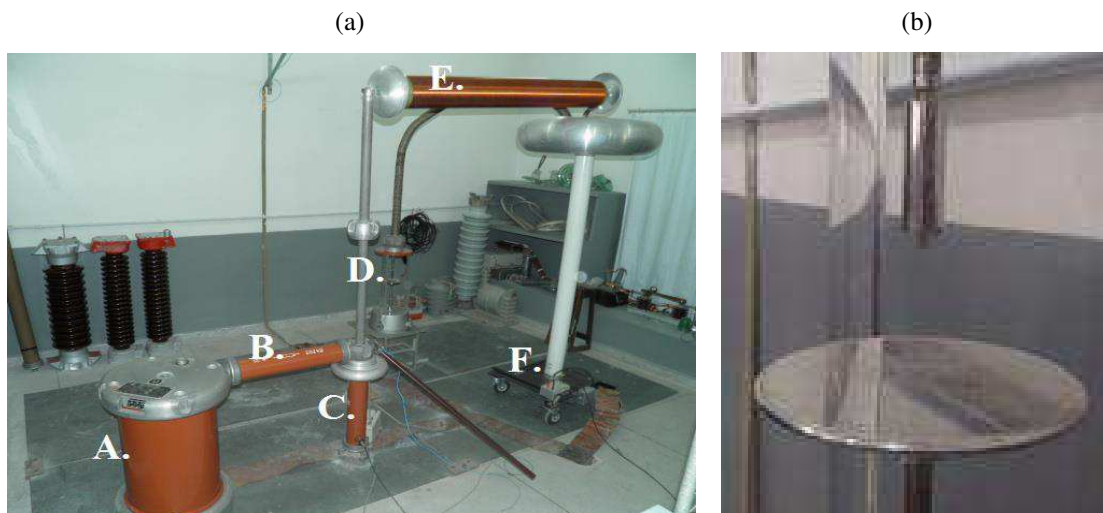
A Abordagem 1 tem o objetivo de estimar os valores ótimos dos parâmetros de ajuste da câmera UV necessários para a detecção adequada das descargas corona. Assim, o ganho UV e a distância de captação são avaliados, tendo em vista que são parâmetros de detecção que influenciam no resultado das imagens obtidas. Além disso, a sensibilidade dos atributos da imagem UV é avaliada em função das aproximações numéricas obtidas entre eles e as variações lineares do ganho UV e da distância de captação.

Dessa maneira, foram realizados ensaios em laboratório com o arranjo de eletrodos ponta-plano submetido à variação da tensão, em que os sinais das descargas parciais foram medidos e as imagens das descargas corona foram captadas. Os parâmetros de detecção da câmera UV obtidos na Abordagem 1 serviram de referência às Abordagens 2, 3 e 4, como garantia de condições controladas e reproduzíveis.

4.6.1 MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS

Com o intuito de parametrizar a câmera *Daycor II*, foram realizadas as medições em um arranjo com eletrodo ponta-plano. A fotografia do arranjo experimental montado em laboratório está mostrada na Figura 4.10(a). O transformador T1 está identificado na Figura 4.2 pela letra “A”, o resistor R pela letra “B”, o divisor capacitivo pela letra “C”, o arranjo ponta-plano em segundo plano na fotografia está representado pela letra “D”, o indutor pela letra “E” e o capacitor Ca pela letra “F”. O arranjo ponta-plano está mostrado em detalhe na fotografia apresentada na Figura 4.10(b).

Figura 4.10. (a) Fotografia do arranjo experimental e (b) fotografia do arranjo ponta-plano com gap de 30 mm. (Fonte: próprio autor)



Por questões práticas, a distância (*gap*) utilizada entre a ponta e o plano foi de 30 mm. A escolha dessa distância se deu por questões de controle da variação de tensão na mesa de controle. O sistema é manual, portanto, requer habilidade do operador para controlar o nível de tensão. Ao se utilizar distâncias menores, a tensão de ruptura é atingida rapidamente, o que não é conveniente para os propósitos do experimento. Na distância de 30 mm, foi encontrada, experimentalmente, uma tensão média de início de

corona (TIC) de 19 kV e uma tensão de ruptura (TR) de, aproximadamente, 27 kV nas condições atmosféricas do laboratório, detalhadas adiante. As tensões de início de corona e de ruptura foram obtidas da média de 5 leituras consecutivas. Considerou-se como tensão de início de corona a tensão no instante em que, conjuntamente, o corona tornou-se audível ao ouvido humano e visível pela câmera.

As condições de temperatura, umidade e pressão atmosférica no laboratório foram observadas durante toda a realização dos ensaios, que foram realizados em três dias, em horários intercalados entre manhã e tarde. Os equipamentos utilizados para medir pressão e temperatura foram dois termo-higrômetros analógicos e um digital. A temperatura ambiente durante os ensaios oscilou em uma faixa entre 25,2°C e 26,9°C, com uma média de 26,1°C. A umidade relativa do ar média oscilou entre 62,5% e 78,75%, com uma média de 70%. Para a medição de pressão atmosférica, foi utilizado um barômetro de mercúrio. A pressão atmosférica medida no laboratório foi de, aproximadamente, 955,2 mbar.

4.6.2 CAPTAÇÃO DAS IMAGENS UV

Na Figura 4.11 está mostrada a fotografia da configuração espacial de captação em que estão representados a câmera UV, marcada pela letra “G”, e o arranjo ponta-plano, marcado pela letra “D”. As marcações das distâncias entre a câmera e o arranjo foram fixadas no piso. A captura das imagens foi feita simultaneamente à medição das descargas parciais. Durante o procedimento de captura das imagens, foram considerados os seguintes fatores de ajuste:

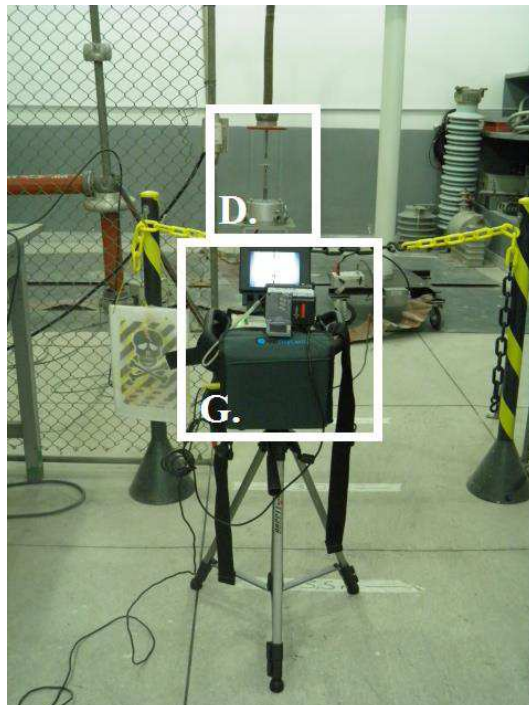
- Distância entre o arranjo ponta-plano e a câmera UV;
- Ganho UV de imagem;

Tensão de alimentação do circuito.

A distância entre o arranjo ponta-plano, onde ocorrem as descargas, e a câmera UV foi variada entre 3,50 m e 7,50 m em passos de 1,00 m. O ganho UV foi variado entre 10 e 250 em passos de 20, sendo que, em todas medições, a câmera UV só detectou as descargas corona a partir do ganho UV 50 e o processamento computacional foi satisfatório a partir do ganho 110. A tensão de alimentação do circuito foi variada entre a tensão de início de corona (TIC) e a tensão de ruptura. Entretanto, a tensão de ruptura não

foi utilizada para captação. No total, foram utilizados quatro valores de tensão: 19 kV (TIC), 21 kV; 23 kV e 25 kV.

Figura 4.11. Fotografia da câmera UV apontada para a o arranjo ponta-plano. (Fonte: próprio autor)



Para cada um dos valores de tensão, a distância de captação foi variada dentro dos limites apresentados. Para cada distância de captação, o ganho foi variado dentro dos limites apresentados. As imagens em formato de vídeo foram captadas durante, pelo menos, 10 segundos, correspondendo a cerca de 300 quadros, sendo que somente 5 segundos ou cerca de 150 quadros, de cada um dos vídeos captados, foram utilizados para o processamento digital de imagens. Considerando a variação dos parâmetros de captação, foram obtidos 40 vídeos para cada nível de tensão aplicado, totalizando 160 vídeos.

4.6.3 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Os atributos avaliados nesta abordagem foram: os atributos extraídos no processamento dos sinais das descargas parciais, conforme foi apresentado na seção 4.4, a contagem de fótons/minuto da câmera, a área F das descargas integradas, a distribuição média de píxeis ao longo dos quadros que formaram a área F e a persistência das

descargas. Todos esses parâmetros foram avaliados conforme a variação da distância de captação, do ganho UV, da tensão aplicada e, portanto, da magnitude das descargas em picocoulombs.

4.7 ABORDAGEM 2: CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DA IMAGEM E A CLASSIFICAÇÃO VISUAL

O objetivo da Abordagem 2 é analisar as correlações entre diferentes atributos da imagem UV e a classificação das condições operacionais dos isoladores obtida por meio da inspeção visual. Os isoladores utilizados neste ensaio foram as 16 unidades do modelo Lapp Rodurflex® CS3-096-SB-243-A. Eles foram ensaiados nas mesmas condições em que chegaram ao laboratório: secos, com defeitos específicos e poluição depositada durante o tempo em que estiveram na operação em linha. Não foi adotada nenhum tipo de lavagem ou limpeza, de forma que os ensaios pudessem ser feitos o mais próximo possível de suas condições em campo.

Os isoladores foram energizados no nível de tensão nominal de linha de 230 kV, equivalente a 132,8 kV entre a fase e a terra. Esse nível de tensão foi mantido durante todo o ensaio. Nesta abordagem, não foram realizadas as medições de descargas parciais. O objetivo foi obter o comportamento das descargas corona pela avaliação das imagens UV em função das condições físicas dos isoladores. Além disso, nesta abordagem, os isoladores foram ensaiados com os anéis equalizadores que os acompanharam e que estavam instalados em linha. Nas outras abordagens em que há ensaio com isoladores, os anéis equalizadores não foram utilizados, a fim de caracterizar a operação crítica dos isoladores. Na Figura 4.12, o diagrama esquemático do experimento realizado nesta abordagem é apresentado. A mísula simula o braço de uma torre autoportante. O sistema de energização é o mesmo apresentado na seção 4.3. Na Figura 4.13, o modelo e as dimensões do anel equalizador A158 adotado pela CHESF nos isoladores Lapp Rodurflex® CS3-096-SB-243-A.

Figura 4.12. Diagrama esquemático do circuito de energização para captação das imagens do isolador polimérico. (Fonte: próprio autor)

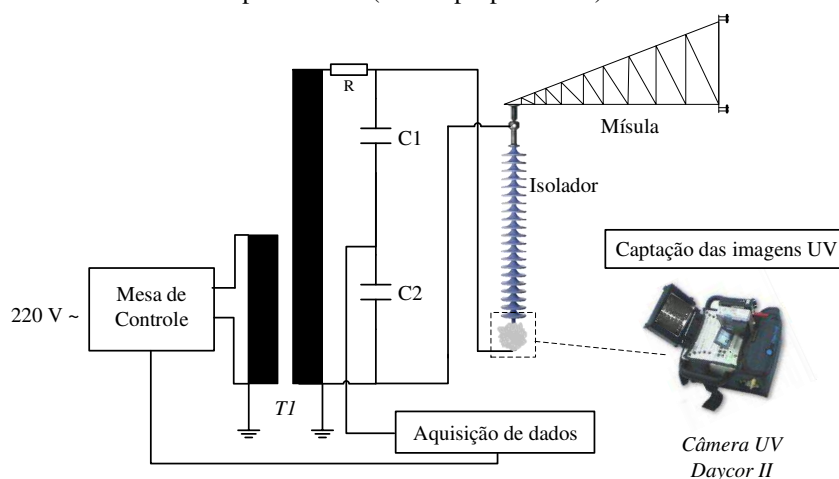
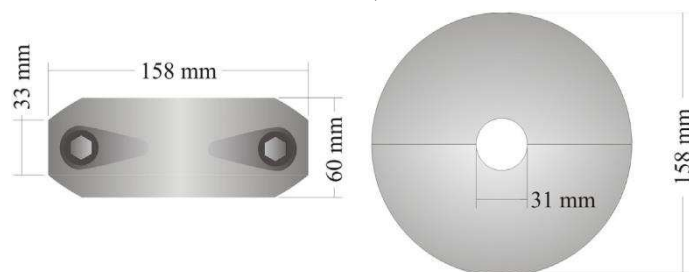


Figura 4.13. Diagrama do anel equalizador A158 e suas características dimensionais. (Fonte: FERREIRA, 2007)



4.7.1 CAPTAÇÃO DAS IMAGENS UV

A distância de captação utilizada foi de 7,5 metros entre a lente da câmera e as ferragens conectadas à alta tensão. O tempo de captação foi de 60 segundos, neste experimento. O ganho UV utilizado foi de 150.

4.7.2 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Os atributos extraídos durante esta abordagem foram: a contagem de fótons/minuto da câmera UV, a área F da região principal, a persistência e a distribuição média de píxeis. Estes parâmetros foram comparados com a classificação visual das condições operacionais de cada um dos isoladores ensaiados.

4.7.3 INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual adotada nesta abordagem seguiu os procedimentos apresentados na seção 4.5. Os resultados da inspeção visual estão apresentados na seção 5.1, junto com os demais resultados desta abordagem.

4.8 ABORDAGEM 3: CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DA IMAGEM E DAS DESCARGAS CORONA

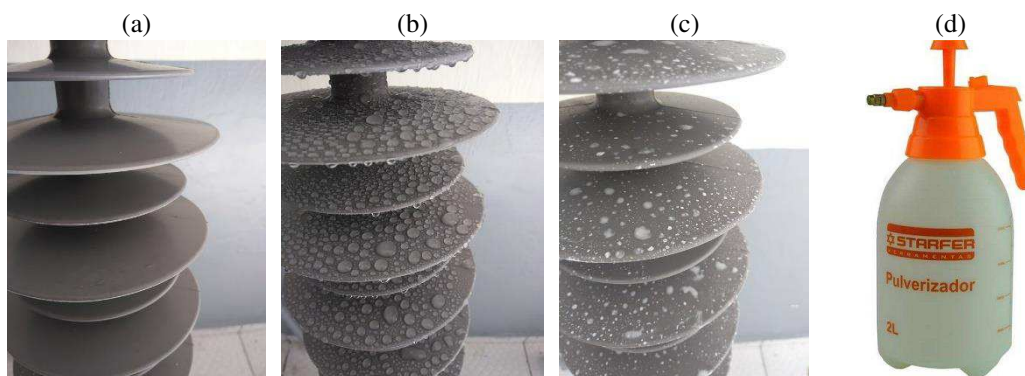
A Abordagem 3 tem como objetivo avaliar a correlação entre os atributos das imagens UV e os atributos das descargas corona, sendo estes últimos obtidos pela medição e extração de atributos das descargas parciais. Para tanto, foram realizados ensaios com o isolador Balestro IPB 230/CB/160/EAP/73 em diferentes condições de umidade e poluição. O isolador foi pulverizado com soluções caracterizadas por diferentes graus de ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*). Os níveis de ESDD e as condutividades volumétricas das soluções escolhidas para os ensaios em laboratório estão mostradas na Tabela 4.3 (IEC 60507, 1991). Para cada uma das condições onde houve inclusão de contaminação, o isolador permaneceu 24 horas em secagem antes de ser submetido aos ensaios. O isolador foi lavado ao fim de cada etapa do ensaio para retirada de poluição remanescente. A água utilizada nesses procedimentos era desmineralizada.

Tabela 4.3. Características de ESDD das soluções. (Fonte: adaptado de IEC 60507, 1991; FERREIRA, 2011)

Situação	Classes de poluição	Faixa de ESDD (mg/cm ²)	ESDD aplicada (mg/cm ²)	Condutividade da solução (mS/cm)
1	Límpo e seco	-	-	-
2	Molhado com água limpa	0,00 – 0,032	0,001	0,25
3	Contaminação muito leve	0,032 – 0,038	0,035	6,5
4	Contaminação pesada	0,056 – 0,123	0,1	40
5	Contaminação muito pesada	0,123	0,2	80

As condições físicas das superfícies do isolador quando submetidos aos testes, bem como o modelo de pulverizador utilizado estão representadas na Figura 4.14. O isolador molhado com água limpa obedeceu à condição estabelecida pela classe de hidrofobicidade HC 1 conforme o guia STRI (1992).

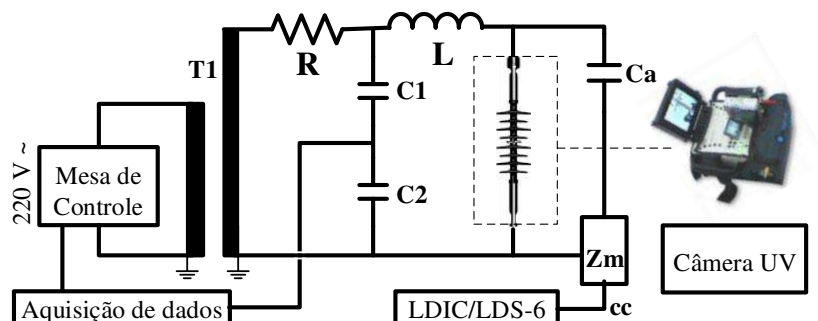
Figura 4.14. Condições do isolador para os ensaios em laboratório: (a) limpo e seco, (b) molhado com água limpa e (c) poluído e (d) modelo de pulverizador utilizado. (Fonte: próprio autor)



4.8.1 MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS E CAPTAÇÃO DAS IMAGENS UV

O diagrama do arranjo experimental adotado nesta abordagem está mostrado na Figura 4.15 e está conforme os procedimentos detalhados na seção 4.3. A captura das imagens foi feita em sincronismo com a medição das descargas parciais.

Figura 4.15. Arranjo experimental das medições com o isolador IPB 230/CB/160/EAP/73. (Fonte: adaptado de IEC60270, 2000)



Em cada uma das situações de ensaio, o isolador foi submetido a uma tensão de 132,8 kV alternada em regime permanente, equivalente à condição de operação em linha. As medições foram realizadas após 30 minutos da aplicação de alta tensão, para garantir a estabilização dos sinais. Durante 30 segundos os sinais de cada uma das situações de ensaio foram capturados, totalizando 900 quadros de imagem UV para cada situação. O ganho da câmera UV utilizado foi de 150. A distância de captação entre a lente da câmera UV e o isolador foi de 7,5 metros.

4.8.2 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS






Os parâmetros avaliados na Abordagem 3 foram: os atributos extraídos no processamento dos sinais das descargas parciais, conforme foi apresentado na seção 4.4, a área F das descargas integradas, a distribuição média de píxeis ao longo dos quadros que formaram a área F , a persistência das descargas e o número médio de objetos em cada quadro.

4.9 ABORDAGEM 4: CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DA IMAGEM E DAS DESCARGAS CORONA E OS DEFEITOS DE ISOLADORES

A Abordagem 4 tem como objetivo avaliar as correlações entre os parâmetros das imagens UV e os parâmetros das descargas corona, sendo os últimos obtidos pela medição e extração de atributos das descargas parciais, e as correlações entre estes parâmetros e as condições de degradação dos isoladores poliméricos, a fim de estabelecer estimativas de criticidade ou severidade das descargas.

Para tanto, a partir da inspeção visual realizada conforme os procedimentos da seção 4.5, cinco isoladores do modelo Lapp Rodurflex® CS3-096-SB-243-A com características de defeito bem definidas foram escolhidos para compor os resultados. Os defeitos característicos, bem como uma classificação baseada nas recomendações de EPRI (2006) estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Isoladores com e sem defeito e suas correspondentes classificações. (Fonte: próprio autor)

Isolador	Fotografia do defeito	Caracterização do defeito
01		Tipo de defeito: não apresenta defeito. Classificação: A
05		Tipo de defeito: Erosão e trilhamento. Classificação: D
06		Tipo de defeito: Corrosão da ferragem fase. Classificação: C
09		Tipo de defeito: Rachadura Classificação: D
10		Tipo de defeito: Erosão Classificação: D

4.9.1 MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS E CAPTAÇÃO DAS IMAGENS UV

A tensão fase-terra de operação normal de uma linha de 230 kV foi adotada como referencial para energização: 132,8 kV (tensão nominal). O diagrama esquemático da montagem realizada durante os ensaios para captação das imagens é o mesmo utilizado na Abordagem 3, que foi mostrado na Figura 4.15. Há, entretanto, diferenças nos

procedimentos de medição das descargas e captura das imagens. Na Abordagem 4, o tempo de captura foi significativamente maior, tendo em vista a necessidade de avaliar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo de acordo com a variação estatística das descargas.

As medições foram realizadas após 30 minutos da aplicação de alta tensão, para garantir a estabilização dos sinais. A captura das imagens foi feita em sincronismo com a medição das descargas parciais. Durante 600 segundos, os sinais de cada uma das situações de ensaio foram capturados, totalizando cerca de 18.000 quadros de imagem UV para cada situação. O ganho da câmera UV utilizado foi de 150. A distância de captura entre a lente da câmera UV e o isolador foi de 7,5 metros.

Além disso, em cada situação de ensaio apresentada conforme a Tabela 4.3 e para cada um dos isoladores, as medições foram realizadas em três turnos: um durante a manhã, um durante a tarde e um durante a noite, a fim de obter amostras do comportamento do isolador ao longo do dia e sob variação das condições atmosféricas de umidade e temperatura.

4.9.2 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Os parâmetros avaliados na Abordagem 4 foram: os atributos extraídos no processamento dos sinais das descargas parciais, conforme foi apresentado na seção 4.4, a área F das descargas integradas, a distribuição média de píxeis ao longo dos quadros que formaram a área F , a persistência das descargas, o número médio de objetos em cada quadro e o mapa de persistência.

4.10 SÍNTESE DOS PROCEDIMENTOS E ABORDAGENS PRÁTICAS

Neste Capítulo foram descritos os procedimentos computacionais e experimentais e as abordagens práticas realizados na pesquisa. Além disso, foram apresentados os atributos utilizados para quantificar as imagens das descargas corona. No próximo Capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da pesquisa em torno das abordagens realizadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada uma das abordagens, descritas no Capítulo 4, com enfoque para as suas particularidades e associações com os fenômenos físicos envolvidos. Ao final de cada abordagem, são apresentadas as considerações finais, enfatizando os principais resultados e contribuições para a tese.

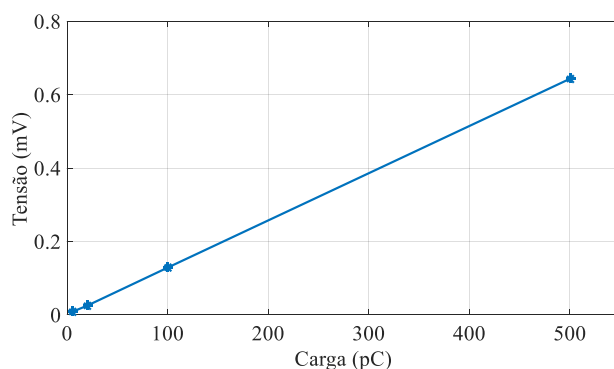
5.1 ABORDAGEM 1: DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CAPTAÇÃO DA CÂMERA UV

A Abordagem 1 tem o objetivo de estabelecer parâmetros de referência a serem utilizados durante a captação das imagens UV, além de avaliar a sensibilidade dos atributos da imagem à variação dos principais parâmetros de captação. Os atributos de imagem avaliados nesta abordagem foram: a contagem de fótons/minuto da câmera, a área F da região principal, a distribuição média de píxeis/quadro e a persistência. Os atributos foram avaliados conforme a variação da distância de captação, do ganho UV, da tensão aplicada e da magnitude das descargas em picocoulombs.

5.1.1 MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS

Conforme o resultado apresentado na Figura 5.1, a relação de calibração do medidor foi linear. De acordo com o que foi apresentado na metodologia, a curva serviu para obter os picos de descargas parciais durante a aplicação dos diferentes níveis de tensão no arranjo.

Figura 5.1. Relação de calibração para obtenção dos picos de DP. (Fonte: próprio autor)



5.1.2 EXTRAÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS SINAIS DAS DESCARGAS PARCIAIS

Na Tabela 5.1, estão mostrados os resultados obtidos para os parâmetros das descargas em cada nível de tensão aplicado. Existe uma diferença significativa entre os resultados obtidos para os semiciclos positivo e negativo da tensão aplicada ao arranjo. A maioria dos pulsos se concentraram no semiciclo negativo da tensão, próximos à fase 271° . A magnitude média das descargas no semiciclo negativo variou entre 146 pC e 437 pC entre a mínima e a máxima tensão aplicada. Os pulsos das descargas parciais obtidos para cada nível de tensão aplicado no arranjo estão mostrados nos gráficos da Figura 5.2.

Tabela 5.1. Parâmetros das descargas medidos em cada um dos níveis de tensão para o eletrodo pontaplano.

Tensão	Magnitude média das descargas (pC)		Fase média ($^\circ$)		Número de pulsos	
	Semiciclo (+)	Semiciclo (-)	Semiciclo (+)	Semiciclo (-)	Semiciclo (+)	Semiciclo (-)
19	471	146	95	272	11	520
21	1.512	217	92	271	58	2456
23	1.554	312	113	271	37	2928
25	2.741	437	104	272	80	2676

Figura 5.2. Pulsos das descargas parciais em função da fase da tensão aplicada de: (a) 19 kV; (b) 21 kV; (c) 23 kV e (d) 25 kV. (continua) (Fonte: próprio autor)

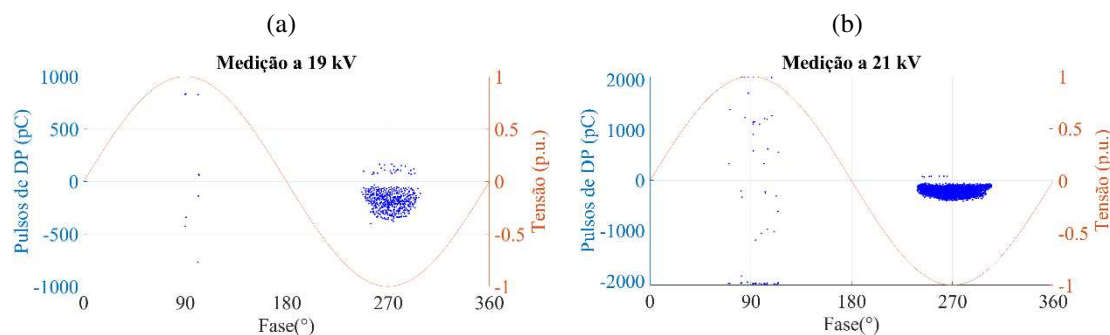
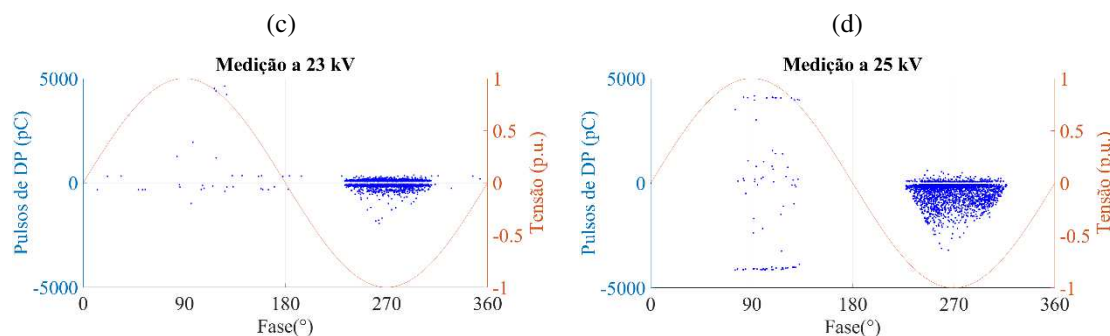


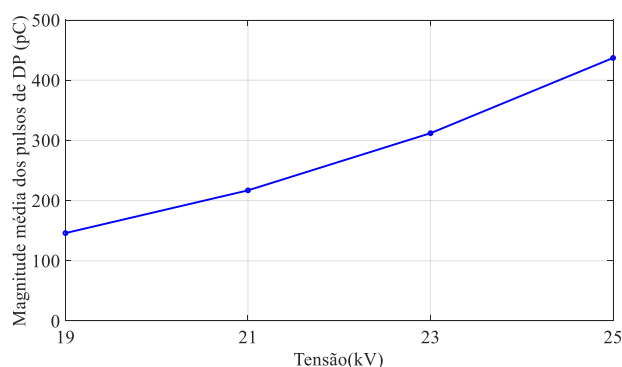
Figura 5.2. Pulsos das descargas parciais em função da fase da tensão aplicada de: (a) 19 kV; (b) 21 kV; (c) 23 kV e (d) 25 kV. (fim) (Fonte: próprio autor)



A concentração dos sinais de descargas no semiciclo positivo da tensão é um indício da presença do corona no lado do terra (eletrodo plano). Assim como, a concentração dos sinais de descargas no semiciclo negativo da tensão é um indício da presença do corona no lado da alta tensão (eletrodo ponta) (BARTNIKAS *et al.*, 1979; NATTRASS, 1988). A concentração de cargas positivas na região da ponta negativa ocorre devido à ionização das moléculas ou átomos e aumenta muito o campo elétrico nessa região, que diminui na direção dos elétrons. Além disso, devido à distribuição do campo, as primeiras descargas aparecem nos picos.

Uma vez que a concentração majoritária de descargas ocorreu no semiciclo negativo da tensão, o comportamento da descarga média neste semiciclo é comparado com a tensão aplicada ao arranjo. Na Figura 5.3, é mostrada a relação entre a magnitude da descarga em picocoulombs e a tensão aplicada em quilovolts. O comportamento da magnitude dos pulsos de descargas parciais evidencia sua relação diretamente proporcional com o nível da tensão aplicada ao arranjo. Esse resultado será útil na análise do comportamento dos atributos das imagens em relação à tensão aplicada e à magnitude das descargas parciais.

Figura 5.3. Comportamento médio da magnitude das descargas em função da tensão aplicada ao arranjo. (Fonte: próprio autor)

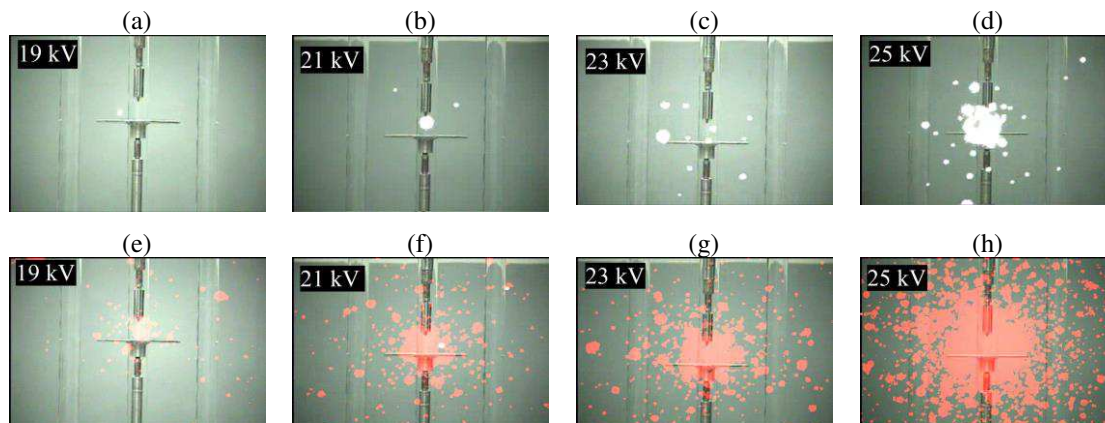


5.1.3 CAPTAÇÃO DAS DESCARGAS CORONA

Alguns exemplares das imagens utilizadas no processamento digital são mostrados a seguir. Na Figura 5.4(a), (b), (c) e (d), são mostrados exemplos dos quadros obtidos na captação das descargas corona no arranjo, sob as tensões de 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV, respectivamente. Nestas representações, a distância de captação utilizada foi de 4,5 m e o ganho UV foi de 170. As respectivas integrações de fâculas, em cada caso, são mostradas nas imagens compostas na Figura 5.4(e), (f), (g) e (h). Um total de 5 segundos de vídeo, equivalente a 150 quadros, foi utilizado para obter cada um dos resultados.

Constata-se um aumento gradual da área das fâculas conforme a tensão aumenta. Tendo em vista que o arranjo não se modificou em suas características geométricas e as condições de laboratório são conhecidas, o campo elétrico na região dos eletrodos se modifica e se torna menos uniforme conforme a tensão aumenta, dando origem a descargas mais intensas e com uma taxa de repetição maior, como se verificará na análise dos atributos das imagens.

Figura 5.4. Representações das imagens captadas no experimento do arranjo ponta-plano a: (a) 19 kV; (b) 21 kV; (c) 23 kV e (d) 25 kV; e os resultados da integração das fâculas sobreposto à imagem do arranjo em (e) 19 kV; (f) 21 kV; (g) 23 kV e (h) 25 kV. (Fonte: próprio autor)



Os resultados do processamento digital de imagens estão divididos a seguir por parâmetro, conforme determinado na subseção 4.2.2.

5.1.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

5.1.4.1 CONTAGEM DE FÓTONS/MINUTO

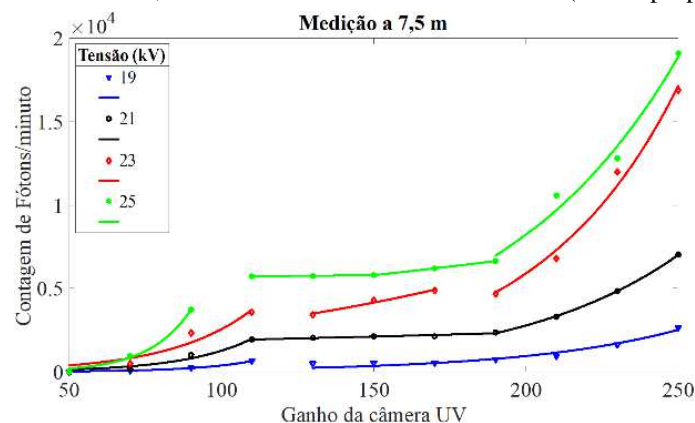
A contagem média de fótons/minuto que a câmera UV apresentou foi comparada com a variação do ganho UV e com a variação da distância (em metros). Os resultados do comportamento médio da contagem de fótons/minuto apresentada pela câmera, em função do ganho UV, para a distância de 7,5 m e as tensões de ensaio, estão mostrados na Figura 5.5. As curvas para as outras distâncias utilizadas (2,5 m, 3,5 m, 4,5 m, 5,5 m e 6,5 m) foram suprimidas e são apresentadas apenas as suas aproximações.

Pelo comportamento apresentado nas curvas conforme a Figura 5.5, verifica-se que a contagem de fótons/minuto da câmera varia exponencialmente com a variação linear do ganho UV. Portanto, o comportamento pode ser aproximado por uma função exponencial como a da forma em (5.1):

$$P_H(g) = a_1 \cdot e^{b_1 \cdot g}, \quad (5.1)$$

em que a_1 e b_1 são os coeficientes de aproximação, g é o ganho da imagem UV e P_H é a contagem de fótons por minuto da câmera. Os resultados das aproximações dos coeficientes de cada uma das curvas apresentadas na Figura 5.5 estão mostrados na Tabela 5.2. O coeficiente de determinação R^2 denota o quanto o modelo estimado se aproximou dos valores reais.

Figura 5.5. Curvas do comportamento da contagem de fótons/minuto da câmera em função do ganho (g) UV para distância de 7,5 m e as diferentes tensões de ensaio. (Fonte: próprio autor)



Nas curvas apresentadas na Figura 5.5, observa-se que o comportamento exponencial não pode ser satisfatoriamente aproximado pelos mesmos coeficientes para todo o intervalo de ganho avaliado. Existem descontinuidades que obrigaram a uma modelagem particionada, de forma que trechos distintos foram considerados.

De maneira geral, a contagem de fótons/minuto apresentou comportamentos exponenciais entre os ganhos 50 e 110 e entre os ganhos 190 e 250. O intervalo entre os ganhos 130 e 150 apresentou uma tendência de linearidade, embora esse comportamento não tenha sido geral. A modelagem particionada foi satisfatória uma vez que a avaliação dos coeficientes de determinação R^2 atingiu valores próximos de 1 na maioria dos casos.

Os coeficientes b_1 apresentados na Tabela 5.2 em negrito, normalmente entre o intervalo de ganho maior que 110 e menor que 170, confirmam essa tendência de linearidade das curvas, porque se aproximam de zero. Eles variam em uma faixa que vai de aproximadamente 0,0003 a 0,009. Portanto, uma variação de grau 10 no ganho UV (entre 150 e 160, por exemplo) provoca uma variação de até 9% no resultado da contagem de fótons/minuto, considerando uma mesma distância de captação e uma mesma tensão aplicada ao arranjo.

Tabela 5.2. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para a contagem de fótons/minuto. (continua) (Fonte: próprio autor)

Distância (m)	Tensão (kV)	Região do Ganho (g) UV	Função Exponencial Aproximada		R^2
			$P_H(g) = a_1 \cdot e^{b_1 \cdot g}$		
			$a_1 \times 10^3$	b_1	
2,5	19	≤ 130	0,07	0,02855	0,9281
		$130 < g \leq 170$	0,87	0,00828	0,9367
		> 170	0,17	0,01681	0,8561
	21	≤ 130	0,39	0,02825	0,9433
		$130 < g < 190$	4,45	0,00449	0,9969
		≥ 190	0,32	0,01825	0,9998
	23	≤ 110	0,61	0,37530	0,9176
		$110 < g \leq 170$	98,9	-0,00919	0,9853
		> 170	1,67	0,01258	0,9530
	25	≤ 110	0,98	0,03221	0,8701
		$110 < g \leq 170$	71,9	-0,00706	0,9883
		> 170	6,71	0,00681	0,9879
3,5	19	≤ 110	0,01	0,04334	0,9832
		> 110	0,07	0,01496	0,9619
	21	≤ 110	0,11	0,03614	0,9099
		> 110	0,63	0,01333	0,8563
		≤ 90	0,01	0,09808	0,9997
	23	$90 < g \leq 150$	8,85	0,00181	0,9783
		> 150	0,82	0,01421	0,9579
	25	≤ 90	0,02	0,07921	0,9976
		$90 < g \leq 150$	15,2	0,00222	0,9745
		> 150	0,01	0,00833	0,9621

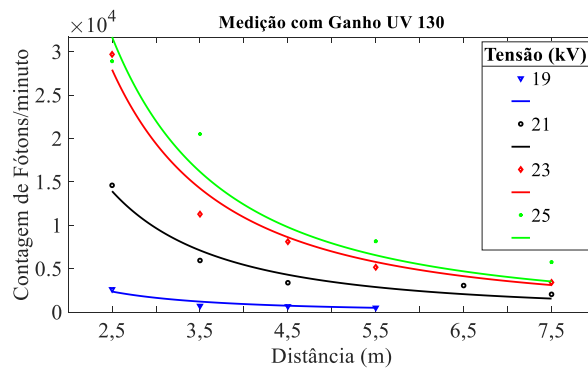
Tabela 5.2. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para a contagem de fótons/minuto. (fim) (Fonte: próprio autor)

Distância (m)	Tensão (kV)	Região do Ganho (g) UV	Função Exponencial Aproximada		R^2
			$P_H(g) = a_1 \cdot e^{b_1 \cdot g}$		
			$a_1 \times 10^3$	b_1	
4,5	19	≤ 110	0,01	0,04425	0,9391
		$110 < g \leq 170$	0,02	0,02533	0,9980
		> 170	0,02	0,02477	0,9787
	21	≤ 110	0,05	0,03863	0,9564
		$110 < g \leq 170$	0,34	0,01565	0,9942
		> 170	0,26	0,01682	0,9886
	23	≤ 90	0,01	0,09617	0,9996
		$90 < g \leq 170$	7,55	0,00051	0,9411
		> 170	0,53	0,01554	0,9922
	25	≤ 110	0,64	0,03542	0,9305
		$110 < g \leq 170$	132	-0,01114	0,8635
		> 170	4,73	0,00742	0,9399
5,5	19	≤ 110	0,02	0,02989	0,8304
		> 110	0,03	0,02014	0,9827
	21	≤ 110	0,05	0,04284	0,9741
		$110 < g \leq 170$	44,1	-0,01769	0,9997
		> 170	0,07	0,02043	0,9964
	23	≤ 110	0,13	0,03561	0,8883
		$110 < g \leq 170$	1,53	0,00941	0,9963
		> 170	0,15	0,01989	0,9989
	25	≤ 110	0,14	0,03878	0,9493
		$110 < g < 190$	6,32	0,00201	0,9784
		≥ 190	0,46	0,01568	0,9713
	6,5	19	≤ 110	0,01	0,05092
> 110			0,04	0,01838	0,9698
21		≤ 110	0,01	0,06426	0,9990
		$110 < g \leq 170$	5,77	-0,00497	0,9777
		> 170	0,04	0,02180	0,9826
23		≤ 110	0,09	0,04012	0,9362
		$110 < g \leq 170$	23,5	-0,00754	0,8742
		> 170	0,26	0,01732	0,9971
25		≤ 110	0,05	0,04888	0,9828
		$110 < g \leq 170$	21,5	-0,00385	0,9817
		> 170	6,49	0,00466	0,9459
7,5		19	≤ 110	0,01	0,05231
	> 110		0,02	0,01955	0,9525
	21	≤ 110	0,02	0,04478	0,9628
		$110 < g < 190$	1,52	0,00220	0,9069
		≥ 190	0,07	0,01849	0,9997
	23	≤ 110	0,06	0,03764	0,9254
		$110 < g \leq 170$	1,14	0,00859	0,9732
		> 170	0,08	0,02136	0,9891
	25	< 110	0,01	0,0733	0,9939
		$110 \leq g < 150$	5,52	0,00031	0,9833
		$150 \leq g \leq 170$	3,46	0,00343	0,9999
	> 170	0,29	0,01663	0,9821	

Em relação à variação linear da distância, os resultados do comportamento médio da contagem de fótons/minuto apresentada pela câmera para o ganho UV 130 e as

diferentes tensões de ensaio estão mostrados na Figura 5.6. Para os demais ganhos, as curvas foram suprimidas e são apresentadas as suas aproximações.

Figura 5.6. Comportamento da contagem de fótons/minuto da câmera em função da distância para o ganho UV 130 e as diferentes tensões de ensaio. (Fonte: próprio autor)



O comportamento apresentado nas curvas da Figura 5.6 demonstra que a contagem de fótons/ minuto da câmera decresce com o aumento da distância de captação. Esse decrescimento é não linear e se aproxima da razão inversa do quadrado da distância, devido à atenuação da luz no espaço. Portanto, esse comportamento pode ser aproximado por uma função como a da forma em (5.2):

$$P_H(d) = a_2 \cdot d^{-2}, \quad (5.2)$$

em que a_2 é o coeficiente de aproximação do modelo, d é a distância de captação e P_H é a contagem de fótons por minuto da câmera.

Os resultados das aproximações dos coeficientes de cada uma das curvas apresentadas na Figura 5.6 estão mostrados na Tabela 5.3. Os resultados dos coeficientes de determinação R^2 próximos a 1 demonstraram, na maioria dos casos, que as aproximações foram suficientes.

Tabela 5.3. Parâmetros de aproximação da distância de captação para a contagem de fótons/minuto. (continua) (Fonte: próprio autor)

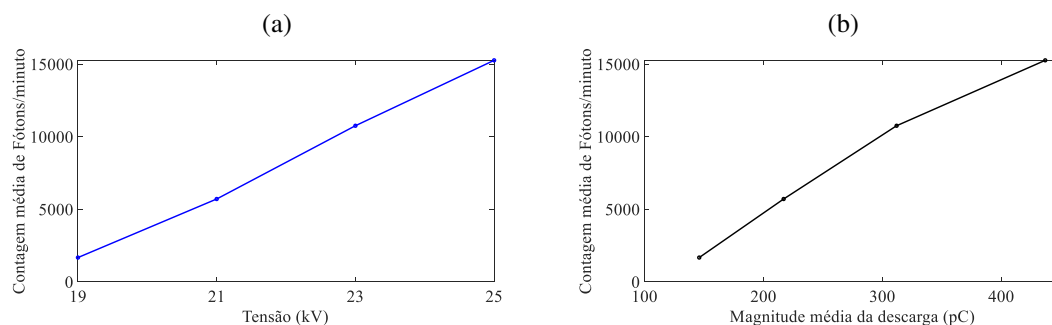
Ganho (g) UV	Tensão (kV)	Função Aproximada	R^2
		$P_H(d) = a_2 \cdot d^{-2}$ $a_2 \times 10^3$	
50	23	0,69	0,9467
	25	1,39	0,8920
70	21	8,66	0,9298
	23	27,25	0,9143
90	25	38,82	0,9916
	21	42,38	0,9023
	23	125,81	0,9881
	25	159,27	0,9893

Tabela 5.3. Parâmetros de aproximação da distância de captação para a contagem de fótons/minuto. (fim)
(Fonte: próprio autor)

Ganho (<i>g</i>) UV	Tensão (kV)	Função Aproximada	R ²
		$P_H(d) = a_2 \cdot d^{-2}$ $a_2 \times 10^3$	
110	21	63,11	0,9671
	23	173,79	0,9637
	25	210,43	0,9453
130	19	14,72	0,8942
	21	87,00	0,9629
	23	174,50	0,9717
150	25	198,01	0,9034
	19	18,51	0,9607
	23	158,55	0,9812
170	25	260,20	0,9901
	19	24,25	0,8967
	21	60,96	0,9693
190	23	132,26	0,9256
	25	218,79	0,8373
	19	24,30	0,9315
210	21	70,35	0,8787
	23	134,84	0,8972
	25	230,47	0,8408
230	19	54,46	0,9661
	21	98,86	0,9048
	23	160,72	0,9453
250	19	69,10	0,8548
	21	136,13	0,9564
	25	160,32	0,9329
	21	204,76	0,9116
	25	660,70	0,8794

O comportamento médio da contagem de fótons/minuto em função da variação da tensão e da magnitude das descargas está mostrado na Figura 5.7 (a) e (b). Estes comportamentos evidenciam a sensibilidade da contagem de fótons/minuto à variação da tensão aplicada e, portanto, da magnitude das descargas, e demonstra o indício de que este parâmetro pode ser utilizado para caracterizar o comportamento elétrico das descargas juntamente com os demais parâmetros das imagens.

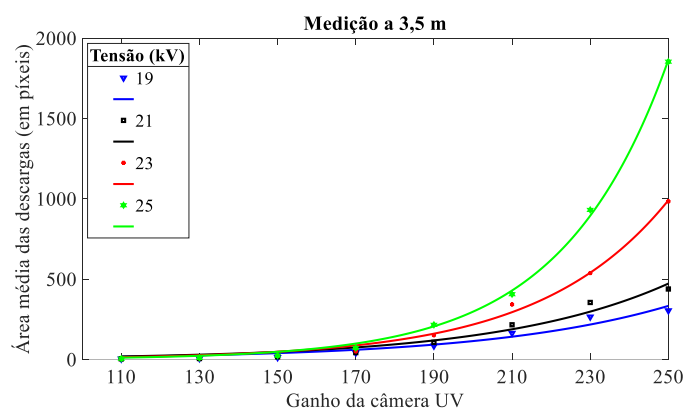
Figura 5.7. Comportamento médio da contagem de fótons por minuto em função da variação da (a) tensão e da (b) magnitude das descargas. (Fonte: próprio autor)



5.1.4.2 ÁREA DA FÁCULA (REGIÃO PRINCIPAL)

A área das descargas obtida pelo processamento digital de imagens, após a integração das fâculas e segmentação, foi comparada com a variação do ganho UV e com a variação da distância de captação (em metros). Os resultados do comportamento da área da fâcula, em função do ganho UV, para a distância de 3,5 m e tensões de ensaio estão mostrados na Figura 5.8. As curvas da Figura 5.8 apresentam comportamento não linear da área média das descargas com a variação linear do ganho. Para as outras distâncias de captação, as curvas apresentaram comportamento semelhante.

Figura 5.8. Comportamento médio da área das descargas captadas a 3,5 m, em função do ganho UV, para as tensões adotadas: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV. (Fonte: próprio autor)



O comportamento não linear pode ser aproximado por uma função exponencial da forma em (5.3):

$$F(g) = a_3 \cdot e^{b_3 \cdot g} \quad (5.3)$$

em que a_3 e b_3 são os coeficientes de aproximação, g é o ganho da imagem UV e F é a área média das descargas corona.

Os resultados dos coeficientes de aproximação para cada uma das curvas, bem como os correspondentes coeficientes de determinação R^2 estão apresentados na Tabela 5.4. Os resultados para o R^2 , acima de 0,9 para todos os casos estimados, demonstram que as aproximações foram consistentes e que o comportamento da área da fâcula varia exponencialmente com o ganho da imagem UV.

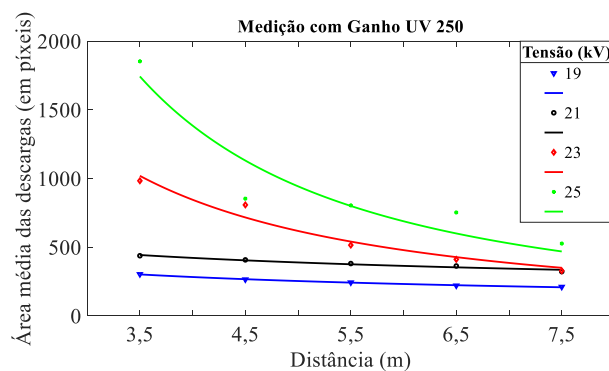
Os valores dos coeficientes b_3 variaram em uma faixa entre 0,02 e 0,03. Na faixa entre os ganhos 120 e 180, o incremento de grau 10 no ganho (4%), provoca um incremento na área de até 30%. Por outro lado, na faixa de ganhos acima de 200, o incremento de grau 10 (4%) no ganho provoca o incremento na área em 1,5 a 2 vezes (50 a 100 %).

Tabela 5.4. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para a formação da área da fâcula .

Distância (m)	Tensão (kV)	Função Exponencial Aproximada		R ²
		$F(g) = a_3 \cdot e^{b_3 \cdot g}$		
		a_3	b_3	
3,5	19	1,575	0,02142	0,9476
	21	1,478	0,02307	0,9601
	23	0,5014	0,03035	0,9942
	25	0,1916	0,03673	0,9988
4,5	19	1,147	0,02211	0,9536
	21	1,424	0,02289	0,963
	23	0,4998	0,02961	0,9949
	25	1,927	0,02456	0,9762
5,5	19	1,166	0,02175	0,9442
	21	1,042	0,02385	0,97
	23	1,772	0,02308	0,9384
	25	0,7974	0,02775	0,9898
6,5	19	0,898	0,02236	0,9522
	21	0,8805	0,02429	0,9775
	23	0,9759	0,02438	0,9771
	25	0,3867	0,03037	0,9952
7,5	19	0,5545	0,02396	0,9803
	21	0,5376	0,02580	0,973
	23	0,9183	0,02377	0,9598
	25	1,199	0,02467	0,9506

Os resultados do comportamento da área da fâcula, em função da distância de captação, para o ganho UV 250 e tensões de ensaio, estão mostrados na Figura 5.9. O comportamento apresentado nas curvas da Figura 5.9 demonstra que a área da fâcula, assim como aconteceu com a contagem de fótons/minuto, decresce com o aumento da distância de captação. Para os demais ganhos, o comportamento obtido foi muito similar.

Figura 5.9. Comportamento da área da fâcula em função da distância de captação para o ganho UV 250 e para cada uma das tensões aplicadas: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV. (Fonte: próprio autor)



O decréscimo não linear da área da fâcula se aproxima da razão inversa do quadrado da distância. Entretanto, ao adotar essa regra, as aproximações não foram suficientes. Assim, esse comportamento pode ser aproximado por (5.4):

$$F(d) = a_4 \cdot d^{b_4}, \quad (5.4)$$

em que a_4 e b_4 são os coeficientes de aproximação do modelo e $b_4 < 0$, d é a distância de captação e F é a área da fâcula integrada.

Os resultados das aproximações dos coeficientes de cada uma das curvas apresentadas na Figura 5.9 estão mostrados na Tabela 5.5. Os resultados dos coeficientes de determinação R^2 próximos a 1 demonstraram, na maioria dos casos, que as aproximações foram suficientes.

Os resultados apresentados pelos coeficientes b_4 , menores que 2, demonstram que a diminuição da área com o aumento da distância é menos acentuada que a diminuição da contagem de fótons, denotando que a área da fâcula é menos invariável à variação da distância. Entretanto, ainda que esses resultados sejam válidos, eles não corroboram com a lei do inverso do quadrado da distância, por duas razões: primeiro, o intervalo de verificação não foi suficiente para garantir essa aproximação e, segundo, a área da fâcula integrada tende à saturação, uma vez que a descarga é persistente e limitada à uma região no espaço.

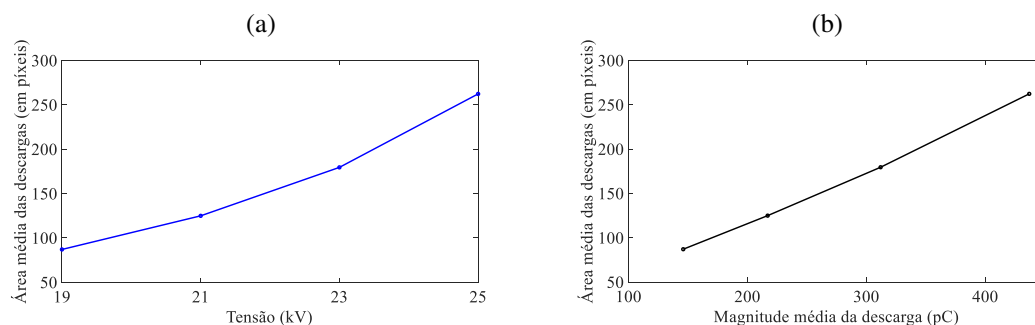
Portanto, durante as análises seguintes, será adotada a distância máxima de captação aqui avaliada, que foi de 7,5 metros. A distância é suficientemente segura e replicável para obter os parâmetros de imagem desejados.

O comportamento da área da fâcula em função da variação da tensão e em função da variação da magnitude das descargas está apresentado na Figura 5.10(a) e (b), respectivamente. Da mesma maneira que no comportamento da contagem de fótons/minuto, a área da fâcula variou linearmente com o aumento da tensão e com o aumento da magnitude das descargas parciais. Este comportamento também demonstra que a área pode ser utilizada para caracterizar o comportamento elétrico das descargas, juntamente com os demais parâmetros das imagens.

Tabela 5.5. Parâmetros de aproximação da distância de captação para a área da fâcula. (Fonte: próprio autor)

Ganho (<i>g</i>) UV	Tensão (kV)	Função Aproximada		R ²
		$F(d) = a_4 \cdot d^{b_4}$		
		a_4	b_4	
110	19	7,66	-0,70	0,9316
	21	5,87	-0,45	0,9387
	23	9,88	-0,78	0,9167
	25	5,67	-0,19	0,9734
130	19	18,41	-0,87	0,972
	23	14,87	-0,50	0,913
150	19	31,36	-0,75	0,9458
	21	22,92	-0,28	0,9677
	23	55,11	-0,71	0,9684
170	19	93,57	-0,69	0,9266
	25	153,77	-0,61	0,9911
190	21	209,59	-0,52	0,9438
	23	520,39	-0,96	0,9353
	25	712,97	-0,92	0,9027
210	19	401,98	-0,71	0,9494
	23	1,03 x 10 ³	-0,87	0,9424
230	19	575,78	-0,62	0,9344
	21	654,49	-0,49	0,9871
	25	3,59 x 10 ³	-1,12	0,9205
250	19	555,92	-0,49	0,9956
	21	701,16	-0,37	0,9565
	23	5,90 x 10 ³	-1,40	0,964
	25	15,06 x 10 ³	-1,72	0,8914

Figura 5.10. Comportamento médio da área da região principal em função da variação da tensão e da magnitude das descargas. (Fonte: próprio autor)



5.1.4.3 DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE PÍXEIS/QUADRO

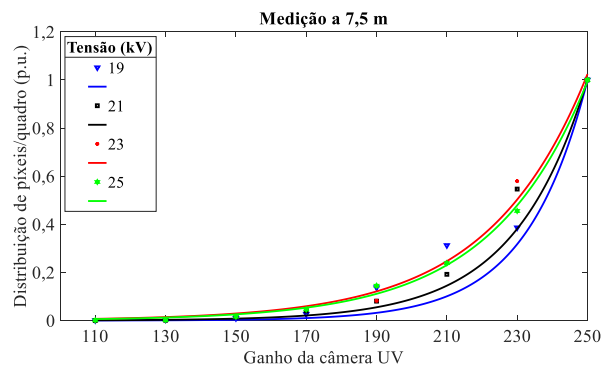
O cálculo da distribuição média de píxeis/quadro é realizado em função das áreas das fâculas, em cada quadro, que irão compor a fâcula integrada. Por esse motivo, o comportamento médio da distribuição média de píxeis/quadro é muito similar ao comportamento da área da fâcula. Os resultados aqui apresentados foram normalizados em função dos valores máximos em cada um dos casos.

Os resultados para a distribuição média de píxeis/quadro, em função do ganho UV, para uma distância de 7,5 m, são mostrados na Figura 5.11. Comportamentos similares foram obtidos para as outras distâncias verificadas. O comportamento não linear da distribuição média de píxeis/quadro em função do ganho UV, assim como ocorreu para a área da fâcula, pode ser aproximado pela função exponencial da forma (5.5):

$$D_m(g) = a_5 \cdot e^{b_5 \cdot g} \quad (5.5)$$

em que a_5 e b_5 são os coeficientes de aproximação, g é o ganho da imagem UV e D_m é a distribuição média de píxeis/quadro.

Figura 5.11. Comportamento da distribuição média de píxeis/quadro (em p.u.) em função do ganho UV para os níveis de tensão de 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV para a distância de 7,5 m. (Fonte: próprio autor)



Os resultados das aproximações dos coeficientes das curvas apresentadas na Figura 5.11 e para as demais distâncias de captação estão mostrados na Tabela 5.6. Os resultados dos coeficientes de determinação R^2 próximos a 1 demonstraram, na maioria dos casos, que as aproximações foram suficientes. Assim como ocorreu no comportamento da área da fâcula, os valores dos coeficientes b_5 variaram em uma faixa limitada, neste caso, entre 0,02 e 0,05.

Tabela 5.6. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para o comportamento da distribuição média de píxeis/quadro. (continua) (Fonte: próprio autor)

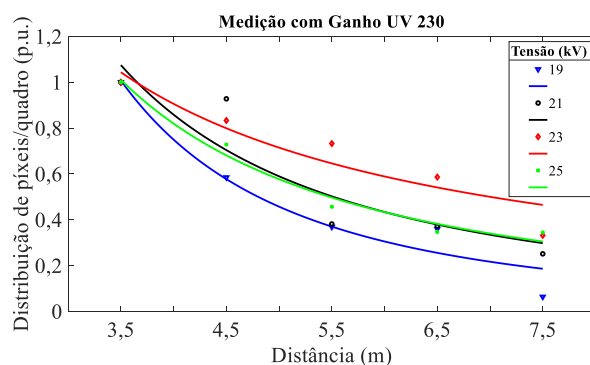
Distância (m)	Tensão (kV)	Função Exponencial Aproximada		R^2
		$D_m(g) = a_5 \cdot e^{b_5 \cdot g}$		
		a_5	b_5	
3,5	19	0,00068	0,0293	0,9891
	21	0,00086	0,0285	0,9551
	23	0,00790	0,0196	0,9381
	25	0,00823	0,0194	0,9704
4,5	19	0,00010	0,0366	0,9796
	21	0,00020	0,0343	0,9816
	23	0,00115	0,0272	0,9887
	25	0,00194	0,0251	0,9904

Tabela 5.6. Parâmetros de aproximação do ganho da imagem UV para o comportamento da distribuição média de píxeis/quadro. (fim) (Fonte: próprio autor)

Distância (m)	Tensão (kV)	Função Exponencial Aproximada		R ²
		$D_m(g) = a_5 \cdot e^{b_5 \cdot g}$		
		a_5	b_5	
5,5	19	0,00003	0,0414	0,9914
	21	0,00009	0,0373	0,9924
	23	0,00044	0,0310	0,9895
	25	0,00068	0,0292	0,9947
6,5	19	0,00001	0,0461	0,9989
	21	0,00006	0,0387	0,9934
	23	0,00018	0,0346	0,9911
	25	0,00019	0,0342	0,9991
7,5	19	0,00000	0,0574	0,9980
	21	0,00001	0,0483	0,9993
	23	0,00014	0,0356	0,9891
	25	0,00011	0,0365	0,9975

Os resultados para a distribuição média de píxeis/quadro, em função da distância de captação, para o ganho UV 230, são mostrados na Figura 5.12. Os comportamentos das curvas para os demais ganhos foram similares.

Figura 5.12. Comportamento da distribuição média de píxeis (em p.u.), em função da distância de captação, para as tensões 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV, para o ganho UV 230. (Fonte: próprio autor)



A tendência de decréscimo pode ser aproximada pela função (5.6):

$$D_m(d) = a_6 \cdot d^{b_6}, \quad (5.6)$$

em que a_6 e b_6 são os coeficientes de aproximação do modelo e $b_6 < 0$, d é a distância de captação e D_m é a distribuição média de píxeis/quadro.

Os resultados das aproximações das curvas apresentadas na Figura 5.12 e para os demais ganhos estão mostrados na Tabela 5.7. Os coeficientes b_6 se aproximaram do coeficiente quadrático, considerando uma faixa de erro, na maioria dos casos apresentados. Portanto, os resultados estão de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância para a aproximação da distribuição de píxeis/quadro. Dessa maneira, como a

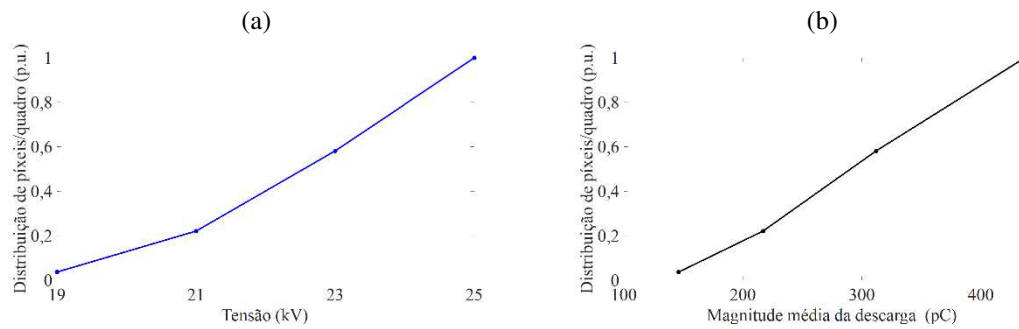
área por quadro não tende à saturação, ela é igualmente influenciada pela variação da distância, assim como ocorre com a contagem de fótons/minuto.

Tabela 5.7. Parâmetros de aproximação da distância de captação para o comportamento da distribuição média de píxeis/quadro. (Fonte: próprio autor)

Ganho (<i>g</i>) UV	Tensão (kV)	Função Aproximada		R ²
		$D_m(d) = a_6 \cdot d^{b_6}$		
		a_6	b_6	
110	19	11,42	-1,909	0,8515
	21	323,37	-4,611	0,9913
	23	3,30 x 10 ³	-6,469	0,9947
	25	17,73	-2,258	0,9471
130	19	1,85 x 10 ³	-6,008	0,9857
	21	60,29	-3,282	0,9863
	23	16,91	-2,179	0,8162
	25	21,69	-2,413	0,9251
150	19	11,44	-1,943	0,9579
	21	26,14	-2,610	0,9450
	23	22,37	-2,513	0,9391
	25	23,09	-2,443	0,8454
170	19	21,41	-2,433	0,9408
	21	19,14	-2,318	0,9241
	23	6,34	-1,411	0,7935
	25	41,82	-2,955	0,9475
190	19	24,16	-2,557	0,9870
	21	8,49	-1,695	0,9591
	23	17,42	-2,211	0,8474
	25	15,52	-2,107	0,7870
210	19	13,76	-2,031	0,8760
	21	8,65	-1,750	0,9611
	23	6,76	-1,460	0,8741
	25	9,08	-1,686	0,8152
230	19	16,19	-2,217	0,9463
	21	8,86	-1,684	0,8516
	23	3,95	-1,062	0,8824
	25	7,25	-1,572	0,9792
250	19	13,31	-2,072	0,9922
	21	11,13	-1,881	0,9199
	23	7,01	-1,527	0,9625
	25	10,55	-1,881	0,9782

Os comportamentos da distribuição média de píxeis/quadro em função da tensão aplicada ao arranjo e da magnitude das descargas estão mostrados na Figura 5.13(a) e (b), respectivamente. Assim como nos parâmetros anteriores, este comportamento demonstra que a distribuição média de píxeis/quadro pode ser utilizada para caracterizar o comportamento elétrico das descargas.

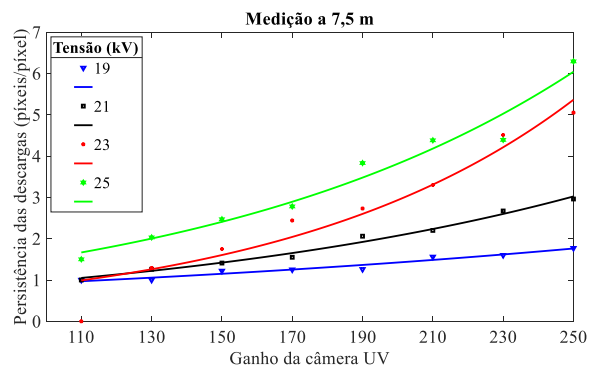
Figura 5.13. Comportamento da distribuição média de pixels/quadro em função da (a) tensão e da (b) magnitude das descargas. (Fonte: próprio autor)



5.1.4.4 PERSISTÊNCIA DA DESCARGA

Como nos demais parâmetros discutidos anteriormente, o comportamento da persistência da descarga também foi analisado segundo a variação linear do ganho UV e da distância de captação. Os resultados das curvas aproximadas do comportamento da persistência em função da variação do ganho UV estão mostrados na Figura 5.14. Neste caso, estão apresentadas as curvas obtidas na medição a 7,5 m de distância, com o ganho UV variando entre 110 e 250 e as tensões de ensaio: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV. Os demais casos apresentaram comportamentos similares.

Figura 5.14. Comportamento da persistência em função da variação linear do ganho UV para a medição a 7,5 m e para os diferentes níveis de tensão aplicados: 19 kV, 21 kV, 23 kV e 25 kV (Fonte: próprio autor)



O comportamento apresentado pela persistência em função da variação linear do ganho UV se aproxima de uma função exponencial da forma (5.7):

$$P_p(g) = a_7 \cdot e^{b_7 \cdot g} \quad (5.7)$$

em que a_7 e b_7 são os coeficientes de aproximação, g é o ganho da imagem UV e P_p é a persistência da fábula.

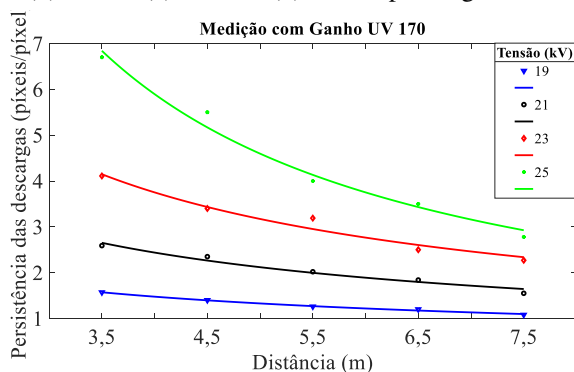
Os resultados do cálculo dos coeficientes de aproximação estão mostrados na Tabela 5.8. Na maioria dos casos, o coeficiente de determinação R^2 se aproximou de 1, e as aproximações foram suficientes. Além disso, o fato de que os coeficientes b_7 ficarem muito próximos ou abaixo de 0,01 denota um comportamento linearizado da persistência. Isso significa que a persistência sofre menor influência da variação do ganho UV do que os parâmetros analisados anteriormente. Este fato justifica o uso da persistência como parâmetro robusto a ser utilizado na caracterização da descarga. Aliado a isso, a persistência é um parâmetro de aproximação do comportamento da descarga no tempo. Ou seja, sua análise depende do tempo de captação, mas denota o grau de repetitividade da descarga e, portanto, sua criticidade.

Tabela 5.8. Parâmetros de aproximação do ganho UV para o cálculo da persistência. (Fonte: próprio autor)

Distância (m)	Tensão (kV)	Função Exponencial Aproximada		R^2
		$P_p(g) = a_7 \cdot e^{b_7 \cdot g}$		
		a_5	b_5	
3,5	19	0,51	0,0049	0,8728
	21	0,35	0,0109	0,9284
	23	0,61	0,0102	0,9408
	25	0,69	0,0114	0,9194
4,5	19	0,49	0,0072	0,9268
	21	0,31	0,0115	0,9785
	23	0,56	0,0099	0,9837
	25	1,46	0,0074	0,8645
5,5	19	0,18	0,0113	0,9065
	21	0,28	0,0103	0,8614
	23	0,27	0,0126	0,9606
	25	0,64	0,0098	0,9748
6,5	19	0,75	0,0034	0,9463
	21	0,18	0,0129	0,8607
	23	0,80	0,0087	0,9094
	25	0,55	0,0097	0,9862
7,5	19	0,61	0,0043	0,9541
	21	0,46	0,0075	0,9871
	23	0,26	0,0121	0,9296
	25	0,61	0,0092	0,9607

O comportamento da persistência em função da variação linear da distância de captação, para o ganho UV 170 e nas diferentes tensões de ensaio, está mostrado nas curvas da Figura 5.15. Para os demais ganhos UV, o comportamento foi similar.

Figura 5.15. Comportamento da persistência da descarga (em p.u.), em função da distância de captação, para as tensões: (a) 19 kV, (b) 21 kV, (c) 23 kV e (d) 25 kV, para o ganho UV 170. (Fonte: próprio autor)



O comportamento decrescente apresentado pela persistência em função da distância de captação também denota a influência da atenuação da luz no espaço e pode ser aproximado pela função em (5.8):

$$P_p(d) = a_8 \cdot d^{b_8}, \quad (5.8)$$

em que a_8 e b_8 são os coeficientes de aproximação do modelo e $b_8 < 0$, d é a distância de captação e P_p é a persistência da descarga.

Os resultados das aproximações dos coeficientes para este caso estão mostrados na Tabela 5.9. As aproximações foram suficientes, de acordo com os valores apresentados pelo coeficiente de determinação R^2 muito próximos de 1. Além disso, os coeficientes b_8 se limitaram a valores próximos ou menores que -1, que indica um decrescimento mais suavizado da persistência, em função da distância, em relação aos parâmetros avaliados anteriormente.

Tabela 5.9. Parâmetros de aproximação da distância para o cálculo da persistência. (continua) (Fonte: próprio autor)

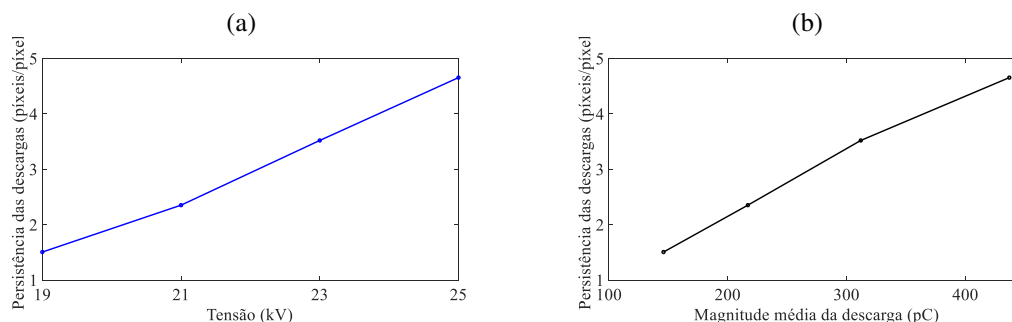
Ganho (g) UV	Tensão (kV)	Função Aproximada		R^2
		$P_p(d) = a_8 \cdot d^{b_8}$		
		a_8	b_8	
110	21	2,15	-0,4363	0,9307
	23	3,00	-0,4647	0,8930
	25	5,52	-0,6714	0,9828
130	19	1,51	-0,2143	0,9549
	21	2,42	-0,3872	0,9672
	23	3,91	-0,5021	0,8898
	25	7,49	-0,6892	0,9251
150	19	2,28	-0,3733	0,9859
	21	4,54	-0,5897	0,9862
	23	4,88	-0,4693	0,9088
	25	13,7	-0,8763	0,9479

Tabela 5.9. Parâmetros de aproximação da distância para o cálculo da persistência. (fim) (Fonte: próprio autor)

Ganho (g) UV	Tensão (kV)	Função Aproximada		R^2
		$P_p(d) = a_g \cdot d^{b_g}$		
		a_g	b_g	
170	19	2,84	-0,4722	0,9923
	21	5,82	-0,6277	0,9672
	23	10,64	-0,7523	0,9657
	25	27,64	-1,1145	0,9828
190	19	8,09	-0,9852	0,9931
	21	4,35	-0,3890	0,9593
	23	19,85	-1,0012	0,8884
	25	23,31	-0,9108	0,8959
210	19	4,90	-0,5965	0,9905
	21	7,04	-0,5714	0,9558
	23	13,93	-0,6954	0,925
	25	16,56	-0,6576	0,9595
230	19	5,15	-0,5882	0,9753
	21	14,90	-0,8434	0,9677
	23	11,40	-0,4591	0,9610
	25	20,65	-0,7600	0,976
250	19	9,41	-0,8691	0,9319
	21	14,47	-0,7348	0,8795
	23	12,28	-0,4004	0,8605
	25	51,04	-1,1032	0,9883

O comportamento da persistência em função da tensão aplicada e da magnitude média das descargas está mostrado na Figura 5.16. Assim como os parâmetros avaliados anteriormente, a persistência variou linearmente com o aumento da tensão e com o aumento da magnitude das descargas, o que condiciona este parâmetro à caracterização do comportamento elétrico das descargas.

Figura 5.16. Comportamento da persistência em função da (a) tensão aplicada e da (b) magnitude média das descargas. (Fonte: próprio autor)



5.1.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ABORDAGEM 1

Nesta abordagem, os parâmetros contagem de fótons/minuto, área da fâcula, distribuição média de píxeis/quadro e persistência foram avaliados para encontrar as

relações entre eles e a variação linear do ganho UV da câmera e da distância de captação. A análise dos parâmetros da imagem em função das variáveis de captação da câmera UV serve para validar o uso de determinados valores e configurações nos procedimentos de captação de descargas corona. Assim, o objetivo foi encontrar valores de referência do ganho UV e distância de captação a serem adotados nos procedimentos experimentais das abordagens 2, 3 e 4.

Durante as análises realizadas, observou-se que os parâmetros das imagens UV variam exponencialmente com o ganho UV, em uma relação diretamente proporcional, e variam com a distância de captação de acordo com lei do inverso do quadrado, que obedece à atenuação da luz no espaço. Entretanto, alguns parâmetros apresentaram menor variação do que outros em função do ganho UV e da distância.

De acordo com as aproximações obtidas, a contagem de fótons/minuto foi o parâmetro que se apresentou como o mais influenciável pela variação do ganho UV ou da distância de captação. Entretanto, para o intervalo de ganhos UV, principalmente, entre 120 e 170, a contagem de fótons/minuto apresentou um comportamento linearizado. Neste intervalo, variações de grau 10 (4%) no ganho UV provocam o aumento de até 9% no valor da contagem de fótons/minuto. Dessa maneira, por se encontrar na região linear e central desta faixa de ganhos, o ganho UV 150 foi escolhido como configuração preferencial para a captação das imagens utilizadas nas abordagens desta tese. O uso do ganho UV 150 tem as seguintes vantagens: facilita o processamento computacional, pois as fâculas geradas na imagem são facilmente identificáveis, ao mesmo tempo em que limita o ruído da imagem. Ganhos menores dificultam a identificação das fâculas e ganhos maiores aumentam consideravelmente o ruído, uma vez que os ganhos amplificam as fâculas e os ruídos ao mesmo tempo.

Os parâmetros obtidos pelo processamento computacional, quais sejam a área da fâcula, a distribuição média de píxeis/quadro e a persistência apresentaram-se menos suscetíveis à variação do ganho UV e da distância de captação, com destaque para a persistência, que apresentou comportamentos mais suavizados nas duas análises realizadas. Dessa maneira, esses parâmetros podem ser utilizados como caracterizadores do comportamento das descargas corona. Por fim, uma vez que o intervalo de distâncias de captação limitou-se à distância de 7,5 m, e os comportamentos dos parâmetros puderam ser avaliados, este valor foi utilizado no restante das análises como distância padrão de captação.

5.2 ABORDAGEM 2: CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DA IMAGEM E A CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A Abordagem 2 tem o objetivo de analisar as correlações entre diferentes atributos da imagem UV e a classificação das condições operacionais dos isoladores obtida por meio da inspeção visual. Assim, os isoladores do modelo Rodurflex® CS3-096-SB-243-A foram submetidos a uma inspeção visual usando as recomendações do guia EPRI (2006) e, em seguida, foram submetidos a ensaios em alta tensão para captação das imagens UV das descargas corona.

5.2.1 INSPEÇÃO VISUAL

Os resultados da inspeção visual com as 16 unidades de isoladores Lapp Rodurflex® CS3-096-SB-243-A estão resumidos na Tabela 5.10. Os isoladores podem ser distinguidos de acordo com a classificação adotada para cada um deles. O isolador 01 foi o único que pôde ser inserido no grupo A. Os isoladores 02 e 03, com condições muito semelhantes ao isolador 01, mas com indícios de corrosão nas ferragens foram classificados em no grupo B, juntamente com o isolador 15. Os isoladores 06, 07 e 14 foram classificados no grupo C e os isoladores 04, 05, 08, 09, 10, 11, 12, 13 e 16 foram classificados no grupo D, principalmente, porque apresentaram algum nível de exposição do núcleo, que é um dos fatores críticos para sugerir a remoção imediata do isolador da linha. Um outro aspecto que orientou a classificação dos isoladores no grupo D foi a condição das emendas, que também limitam a capacidade de isolação do núcleo. A corrosão das ferragens nem sempre foi fator limitante para a classificação no grupo D, de acordo com as recomendações do guia EPRI (2006). Assim, também, a degradação das aletas, bem como a poluição, não são fatores limitantes da operação do isolador.

Tabela 5.10. Resultados para a inspeção visual de defeitos. (Fonte: próprio autor)

Isolador	Núcleo e revestimento	Aletas	Polição	Ferragens	Emendas	Classificação EPRI
01	Revestido	Conservadas	Baixa	Sem corrosão	Fechadas	A
02	Revestido	Conservadas	Baixa	Corrosão média	Fechadas	B
03	Revestido	Conservadas	Baixa	Corrosão média	Fechadas	B
04	Exposto	Danificadas	Alta	Corrosão alta	Danificadas	D
05	Exposto	Danificadas	Alta	Corrosão alta	Fechadas	D
06	Revestido	Conservadas	Alta	Corrosão alta	Fechadas	C
07	Revestido	Com Fraturas	Média	Sem corrosão	Fechadas	C
08	Revestido	Com Fraturas	Média	Corrosão alta	Danificadas	D
09	Exposto	Com Fraturas	Alta	Corrosão alta	Danificadas	D
10	Exposto	Com Fraturas	Alta	Corrosão média	Fechadas	D
11	Exposto	Com Fraturas	Alta	Corrosão média	Danificadas	D
12	Exposto	Conservadas	Média	Corrosão alta	Fechadas	D
13	Revestido	Conservadas	Alta	Sem corrosão	Danificadas	D
14	Revestido	Com Fraturas	Alta	Sem corrosão	Fechadas	C
15	Revestido	Conservadas	Alta	Sem corrosão	Fechadas	B
16	Exposto	Com Fraturas	Alta	Corrosão média	Danificadas	D

5.2.2 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS DAS IMAGENS

Os atributos das imagens UV foram extraídos da câmera e pelo processamento digital e os resultados estão sumarizados na Tabela 5.11. A contagem média de fótons/minuto no intervalo de captação, a área F da fâcula integrada no intervalo de captação, a persistência calculada no intervalo de captação e a distribuição média de píxeis/quadro estão apresentados. Como a contagem de fótons/minuto e a distribuição média de píxeis/quadro são dados em seus valores médios, ao lado de cada um deles está apresentado o seu coeficiente de variação (C_V), que é a relação entre o desvio padrão obtido e a média. O coeficiente de variação é uma medida da dispersão das amostras. Por questões práticas, optou-se por não os apresentar aqui em termos percentuais.

Os coeficientes de variação dos dados da contagem de fótons/minuto revelam o grau de dispersão ou oscilação do cálculo obtido pela câmera para este parâmetro. A comparar o C_V com a contagem de fótons/minuto observa-se que há uma tendência a uma relação inversamente proporcional entre eles. Isso significa que a dispersão das amostras é tão menor quanto maior for a contagem de fótons/minuto e pode ser um dos indicativos do grau de repetitividade das descargas corona na imagem.

Um outro indicativo pode ser verificado ao observar o coeficiente de variação da distribuição média de píxeis/quadro. Neste caso, quanto maior o valor do C_V , maior a dispersão entre a quantidade de píxeis que apareceu em cada um dos quadros. Mas, a medida mais importante que esse parâmetro apresenta é que quanto maior é o seu valor, maior o número de quadros sem o aparecimento de descargas. Ou seja, o coeficiente de

variação da distribuição média de píxeis/quadro permite fazer uma estimativa do tempo decorrido entre descargas. Verifica-se na Tabela 5.11 que os isoladores 04, 09, 12 e 16 apresentaram os maiores valores dos coeficientes de variação das distribuições médias de píxeis/quadro ao mesmo tempo em que apresentaram os menores valores das contagens médias de fótons/minuto.

Tabela 5.11. Atributos extraídos das imagens UV. (Fonte: próprio autor)

Isolador	$\frac{\text{Fótons}}{\text{minuto}}$	C_V Fótons/min	Área (píxeis)	Persistência (píxeis/píxel)	Distribuição (píxeis/quadro)	C_V Píxeis/quadro
01	838	0,237	3.593	1,440	2,650	3,82
02	3.995	0,158	14.227	4,057	22,620	1,50
03	477	0,329	2.555	1,242	1,511	4,93
04	228	0,314	1.299	1,630	1,006	11,95
05	1.083	0,102	4.552	1,710	3,691	2,99
06	4.820	0,128	16.431	3,860	30,220	1,35
07	1.043	0,651	2.583	1,320	1,741	5,50
08	9.507	0,082	7.743	5,510	23,680	1,45
09	370	0,388	1.789	1,085	0,932	16,42
10	689	0,150	2.630	1,269	1,590	5,56
11	758	0,172	3.218	1,274	2,009	4,77
12	212	0,278	2.161	1,165	1,201	16,70
13	412	0,220	1.732	1,162	0,959	7,94
14	1.165	0,161	4.861	1,675	3,871	3,70
15	610	0,228	3.698	1,348	2,369	9,59
16	167	0,433	203	1,000	0,097	26,70

Analisando os parâmetros contagem de fótons/minuto, área da fâcula, persistência e distribuição média de píxeis/quadro é possível caracterizar o comportamento de cada um dos isoladores, a fim de compará-los com as suas condições operacionais de acordo com as classificações apresentadas na Tabela 5.10. Os resultados da contagem de fótons/minuto, da área da fâcula em píxeis, da persistência e da distribuição média de píxeis/quadro são comparados nos gráficos de barras mostrados nas Figura 5.17 (a), (b), (c) e (d), respectivamente. Verifica-se, na Figura 5.17 (b) e (d), que o comportamento da área é muito similar ao comportamento da distribuição média de píxeis/quadro, como esperado. Também é notável o comportamento distinto dos isoladores 02, 06 e 08 no comparativo entre todos os parâmetros.

Para facilitar a análise dos dados e comparar com as classificações visuais adotadas na Tabela 5.10, foram construídos os gráficos em barra normalizados e colocados em conjuntos de parâmetros para caracterização de cada um dos isoladores, como mostrado na Figura 5.18.

Figura 5.17. Parâmetros obtidos no processamento das imagens UV: (a) contagem de fótons/minuto, (b) área F em píxeis, (c) persistência da fâcula e (d) distribuição média de píxeis. (Fonte: próprio autor)

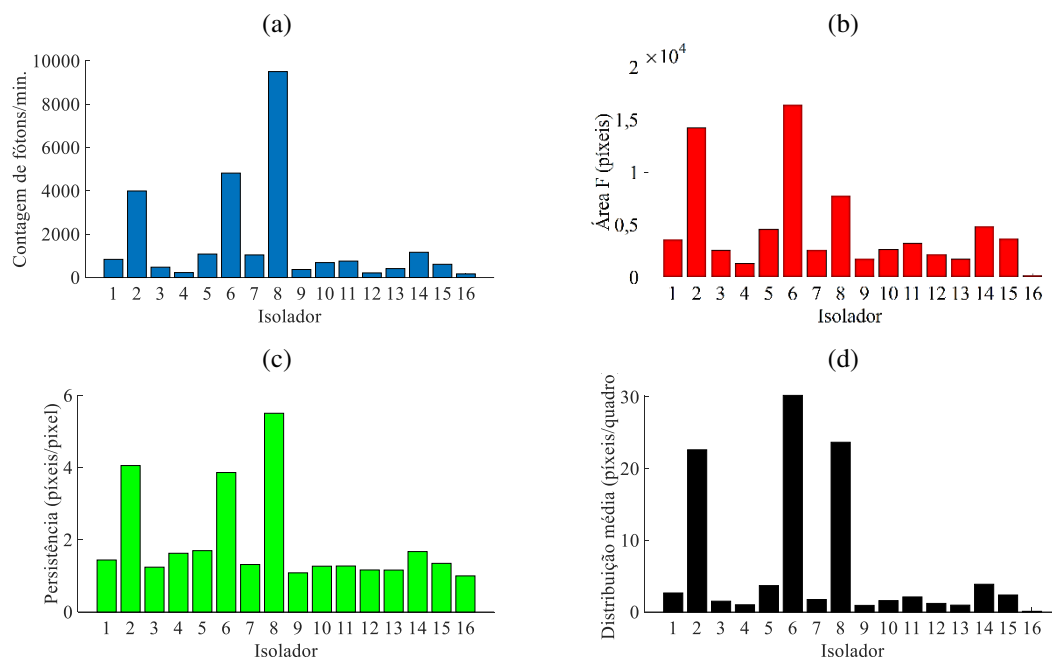
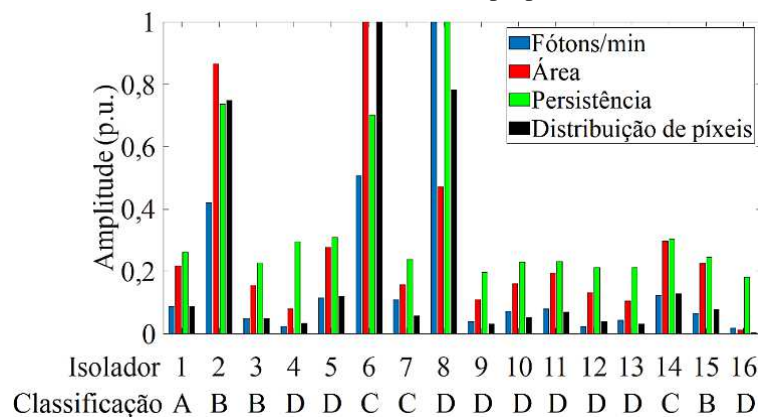


Figura 5.18. Parâmetros das imagens UV normalizados e agrupados para caracterizar o comportamento de cada um dos isoladores. (Fonte: próprio autor)



Como pode ser observado na Figura 5.18, o comportamento dos isoladores a partir da análise dos parâmetros das imagens UV não correspondeu completamente com as expectativas criadas pela classificação visual. Algumas unidades de isoladores tiveram, de fato, comportamentos opostos.

O isolador 02, por exemplo, apresentou características físicas que não condizem com o comportamento das descargas corona, uma vez que não possuía quaisquer sinais de degradação, a não ser indícios de corrosão nas ferragens. O isolador 16, por sua vez, apresentou núcleo exposto, corrosão nas ferragens, aletas degradadas, poluição severa no revestimento e emendas danificadas e seu comportamento elétrico, contudo, foi de um isolador em perfeitas condições operacionais. Os isoladores 06 e 08 apresentaram

comportamentos condizentes com suas condições físicas, obtendo os maiores valores de parâmetros, correspondendo à degradação severa destas unidades.

5.2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ABORDAGEM 2

Nesta abordagem, os atributos da imagem UV contagem de fótons/minuto, área F da região principal, distribuição média de píxeis/quadro e persistência foram comparados entre si e com as classificações visuais de um conjunto de 16 isoladores em diferentes condições de degradação e poluição.

Os comportamentos dos isoladores observados usando a extração e a análise dos atributos das imagens UV revelaram que nem sempre eles convergem com a classificação visual para detecção de defeitos físicos e poluição. Entretanto, isso não significa que a classificação visual está incorreta, mas evidencia que o comportamento dos parâmetros representa indicações de falsos positivos. Portanto, estes resultados indicam que a análise dos isoladores deve ser feita de forma global, apoiada em parâmetros robustos, de forma que o comportamento elétrico do isolador seja bem caracterizado.

Dessa maneira, devem ser adotadas métricas no sentido de se obter diferentes perspectivas do comportamento das descargas. Por exemplo, ao observar o comportamento da persistência das fâculas frente à sua respectiva área de incidência no isolador 08, constata-se um alto grau de persistência frente à região de fâcula. Isso significa que, em uma área reduzida, concentrou-se uma grande quantidade de descargas durante o intervalo de tempo considerado.

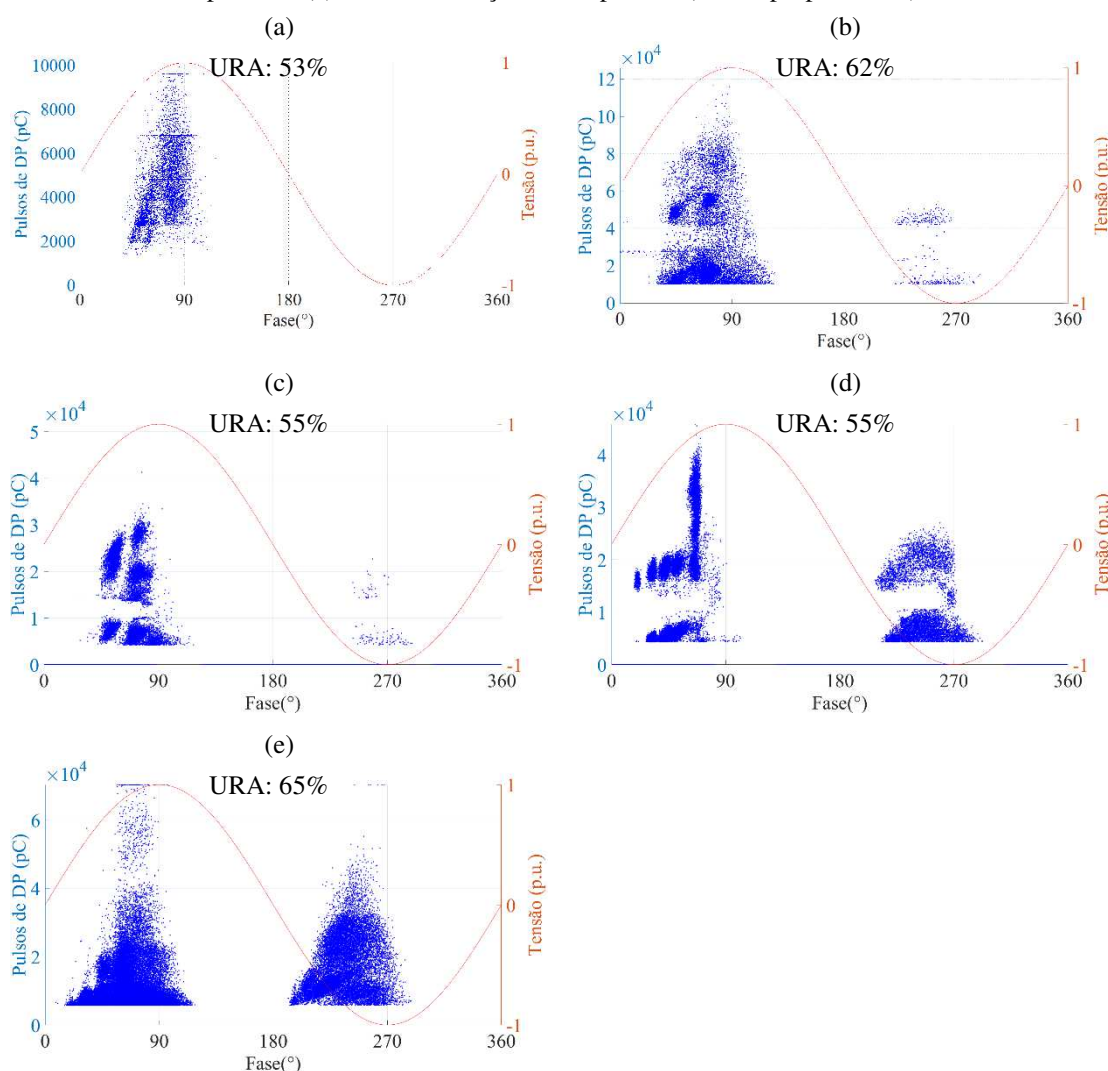
Essa comparação entre parâmetros é relevante, tendo em vista que uma fâcula grande e pouco persistente pode ser menos problemática que uma fâcula pequena persistente todo o tempo. Neste segundo caso, é comum a descarga persistente estar relacionada a defeito como um corte ou cavidade no revestimento, podendo levar à exposição do núcleo. Além disso, pode representar a presença de uma rebarba ou descamação de camada poluente. Em todos os casos, a persistência da fâcula ao longo do tempo indica concentração de campo elétrico localizada, sugerindo inspeção minuciosa no equipamento.

A fim de validar as observações formuladas nesta abordagem, nas seções seguintes deste capítulo serão abordados os comportamentos dos isoladores sob diferentes condições de poluição e defeitos, onde serão analisados os parâmetros das descargas corona a partir da captação das imagens UV e da medição das descargas parciais.

5.3 ABORDAGEM 3: CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DA IMAGEM E DAS DESCARGAS CORONA

Com o objetivo de obter as correlações entre os atributos das imagens e dos sinais de descargas parciais, um isolador polimérico do modelo IPB 230/CB/160/EAP/73 foi submetido a ensaios em alta tensão sob diferentes condições de poluição e umidade: 1 - limpo e seco, 2 - molhado com água limpa, 3 - contaminação muito leve, 4 - contaminação pesada e 5 - contaminação muito pesada. As medições das descargas parciais originaram os gráficos dos pulsos em função da fase da tensão, como mostrados na Figura 5.19. Para cada condição de ensaio, também é apresentada na Figura 5.19 a umidade relativa do ar (URA) medida no ambiente do laboratório.

Figura 5.19. Pulsos de descargas em função da fase da tensão em diferentes condições de ensaio: (a) 1 - limpo e seco; (b) 2 - molhado com água limpa; (c) 3 - contaminação muito leve; (d) 4 - contaminação pesada e (e) 5 - contaminação muito pesada. (Fonte: próprio autor)



Os atributos estatísticos extraídos dos sinais de descargas parciais foram: as magnitudes média e máxima das descargas (em picocoulombs), a fase média (em graus), o desvio padrão, a assimetria, a curtose e a quantidade de pulsos para cada semiciclo da tensão. Os resultados numéricos dos atributos estatísticos estão apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Atributos obtidos pela análise estatísticas dos pulsos de descargas parciais. (Fonte: próprio autor)

Condição de ensaio	1		2		3		4		5	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
Semiciclo										
Mag. média x10³ (pC)	4,55	0	28,9	28,7	14,4	8,42	14,9	10,5	10,5	17,2
Mag. máxima x10³ (pC)	10,1	0	126	54,3	51,6	22,7	45,9	27	70,3	70,3
Fase média (°)	73	0	65	249	68	263	49	245	60	235
Desvio padrão x10³	1,59	0	21,6	16,9	8,05	5,08	9,88	6,28	6,66	8,16
Assimetria	0,68	0	1,15	0,01	0,27	1,09	0,62	0,85	3,67	0,85
Curtose	3,05	0	3,11	1,07	1,59	2,59	2,28	2,11	23,4	3,51
Nº de pulsos x10³	6,98	0	15,9	0,32	11,5	0,12	19,3	6,56	54,8	17,1
U. R. A. (%)	53		62		55		55		65	

Durante o processamento digital de imagens foram calculadas: a área da fâcula, a distribuição média de píxeis/quadro, a persistência e número de descargas (objetos) detectadas por quadro no intervalo de captação. Os resultados do atributos extraídos durante o processamento digital de imagens para as cinco condições de ensaio estão apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13. Atributos obtidos pelo processamento digital de imagens. (Fonte: próprio autor)

Condição de ensaio	1	2	3	4	5
U. R. A. (%) durante os ensaios	53	62	55	55	65
Área da fâcula (píxeis)	7.839	91.358	17.313	14.680	81.825
Distribuição média de píxeis/quadro	49,6	139	9,02	8,1	106
Persistência	3,00	6,72	2,28	2,40	5,38
Número de objetos/quadro	4,00	24,53	3,35	2,87	22

Para facilitar a interpretação e a comparabilidade dos parâmetros estatísticos, bem como dos atributos de imagens, eles foram normalizados em função dos seus valores máximos e os gráficos de barras resultantes estão mostrados a seguir. Os resultados dos parâmetros estatísticos das descargas, no semiciclo positivo e no semiciclo negativo, estão mostrados na Figura 5.20 e na Figura 5.21, respectivamente. Os atributos das imagens obtidos para cada uma das condições de ensaio estão mostrados na Figura 5.22.

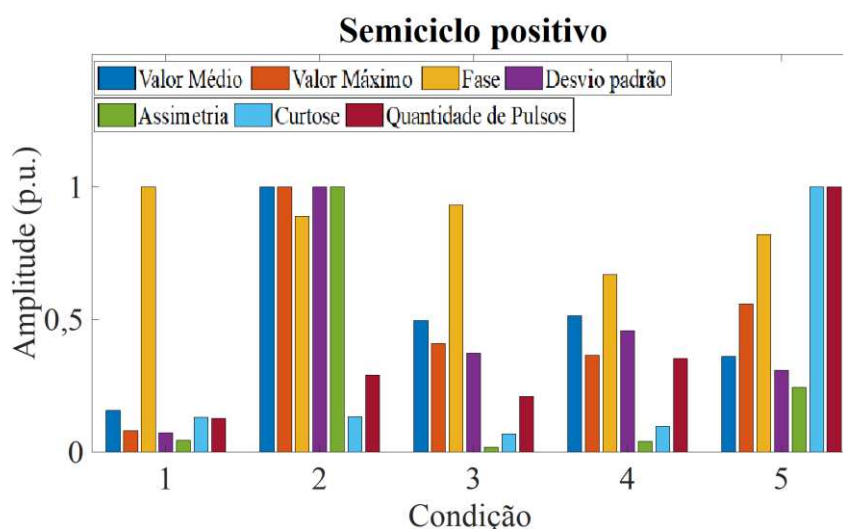
Comparando o comportamento das magnitudes média e máxima das descargas, no semiciclo positivo, apresentado na Figura 5.20, a condição que apresentou os maiores

valores foi a condição 2, em que o isolador foi molhado com água limpa. Como era esperado, a condição com maior distorção de campo elétrico na superfície do isolador, gerou descargas mais intensas devido ao formato e distanciamento entre as gotas.

A magnitude predominante da Assimetria na condição 2 corrobora com este fato. Como as gotas formam pequenas regiões de campo elétrico intenso junto às ferragens da fase da tensão aplicada, os picos das descargas no semiciclo positivo são consideravelmente mais intensos.

Nas condições 3, 4 e 5, o comportamento das descargas está mais associado à característica de condutividade da água. O aumento da salinidade provoca uma tendência de acentuação das descargas, como pode ser observado na condição 5, com maior condutividade, em comparação com as condições 3 e 4.

Figura 5.20. Comparativo entre os parâmetros estatísticos, no semiciclo positivo, para cada situação de ensaio. (Fonte: próprio autor)



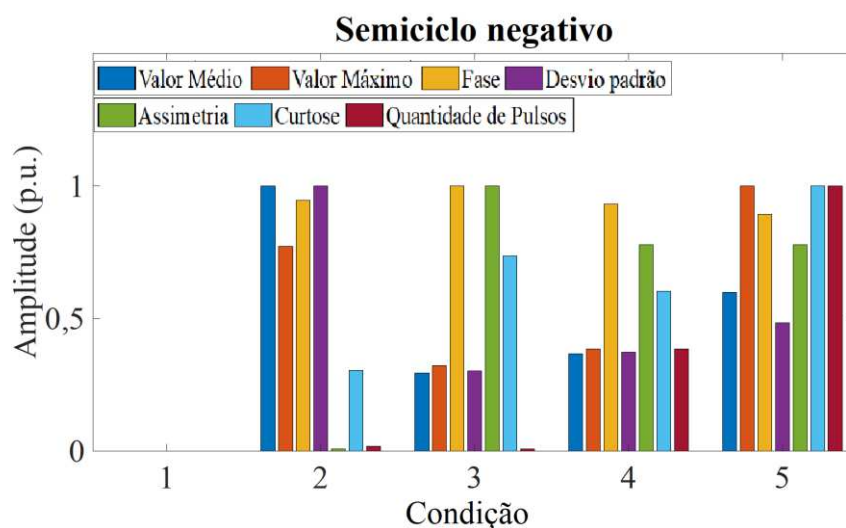
Observa-se, na Figura 5.20, que a magnitude das descargas manteve níveis semelhantes entre as diferentes condições com contaminação. Entretanto, na condição 5, com contaminação muito pesada, a quantidade de pulsos de descarga foi a maior entre todas as condições. O comportamento pode ser explicado pelo aumento da umidade relativa do ar, que nesta condição foi a maior (65%), e pelo aumento da condutividade, que será discutido na análise dos parâmetros da imagem.

Também pode ser notado na Figura 5.20 que o comportamento das condições 3 e 4, com contaminação muito leve e pesada, respectivamente, foi muito similar. Ambas foram obtidas sob a mesma condição de umidade relativa do ar. Essas condições corroboram com o fato de que o aumento da condutividade dos contaminantes, por si só,

não interfere no aumento da descarga corona, a não ser que esteja associado ao aumento da umidade.

Ao observar o comportamento das descargas no semiciclo negativo, apresentado na Figura 5.21, o panorama é muito parecido com o do semiciclo positivo, com exceção de que não foram detectados pulsos de descarga na condição 1 e que a quantidade de pulsos, de uma forma geral é bem menor que no semiciclo positivo. A condição 2, com o isolador molhado com água limpa, apresentou a magnitude média mais elevada. Neste caso, também, a condição 5 apresentou valores elevados de magnitude da descarga e a maior quantidade de pulsos.

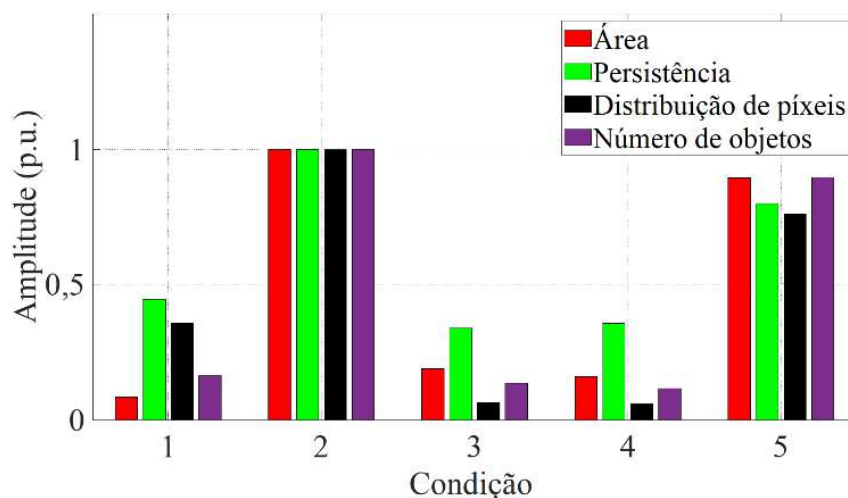
Figura 5.21. Comparativo entre os parâmetros estatísticos, no semiciclo negativo, para cada situação de ensaio. (Fonte: próprio autor)



Com base nas observações anteriores, podem ser feitas comparações com os comportamentos dos atributos das imagens UV das descargas corona, como será mostrado a seguir.

Ao comparar os atributos das imagens UV entre si para cada uma das condições de ensaio, observa-se uma caracterização muito similar à obtida pela avaliação estatística das descargas corona. Como pode ser visto na Figura 5.22, a condição 2, com o isolador molhado com água limpa, apresentou os maiores valores dos atributos da imagem UV. O comportamento era esperado, tendo em vista que o campo elétrico na superfície dos isoladores sofre distorções na presença de gotas de água, conforme demonstrado por Souza (2016b).

Figura 5.22. Comparativo entre os atributos da imagem UV para cada situação de ensaio. (Fonte: próprio autor)



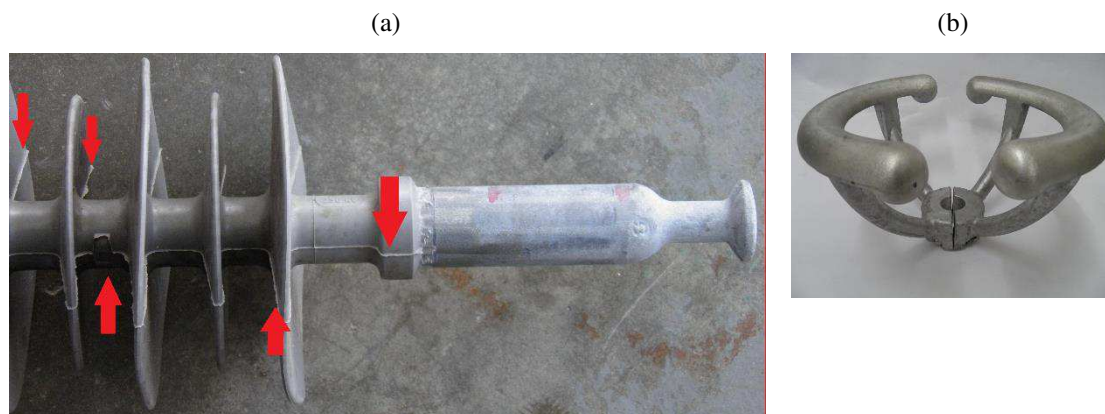
A condição 5, com contaminação muito pesada, apresentou um comportamento semelhante à condição 2. Esse comportamento tem explicação nas seguintes razões: a primeira, e mais óbvia, está relacionada à umidade relativa do ar, que foi a maior dentre todas as condições ensaiadas; a segunda é menos óbvia e só pode ser entendida se forem observadas as quantidades de pulsos de descarga ocorridos na condição 5. De acordo com Souza (2016b), o aumento da condutividade, que representa o aumento no grau de poluição, causa a diminuição da tensão de início do corona. Como o fenômeno das descargas corona é cíclico com a frequência, a recorrência das descargas aumenta com o aumento da poluição, embora sua magnitude não seja afetada.

Portanto, observa-se que a persistência representa o aumento da recorrência das descargas quando seu comportamento é observado para os diferentes níveis de contaminação. Por fim, ao observar as condições 1, 3 e 4, com o isolador limpo e seco, com contaminação muito leve e com contaminação muito pesada, respectivamente, pode-se notar que seus comportamentos foram muito similares. Entretanto, na condição 1, a área da fâcula foi cerca de 50% menor que as áreas das fâculas das condições 3 e 4. Por essa razão, a persistência foi levemente superior, devido à concentração das descargas em uma área limitada.

Uma das razões para o aparecimento de descargas persistentes em isoladores na condição à seco é o formato ou perfil do isolador. Assim, a presença de rebarbas na superfície ou perfis distorcidos provoca a criação de campos elétricos locais e o aparecimento das descargas corona. Os fabricantes, geralmente, recomendam o uso de anéis equalizadores para equalizar o campo elétrico e atenuar o efeito das descargas

corona. Na Figura 5.23, pode-se observar regiões com rebarbas no revestimento do isolador do modelo IPB 230/CB/160/EAP/73. Na Figura, está mostrado a fotografia do modelo do anel equalizador do mesmo fabricante e recomendado para este modelo de isolador.

Figura 5.23. Fotografias do (a) isolador modelo IPB 230/CB/160/EAP/73 e (b) anel equalizador 230 kV recomendado pelo fabricante. (Fonte: adaptado de BALESTRO, 2019)



5.3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ABORDAGEM 3

Nesta abordagem, o comportamento dos atributos das imagens foi comparado com o comportamento dos atributos dos sinais de descargas parciais, de acordo com a variação da poluição e umidade sobre o isolador polimérico IPB 230/CB/160/EAP/73.

De acordo com os resultados obtidos, as variações entre os atributos da imagem UV apresentaram relações de similaridade com as variações entre as magnitudes médias das descargas e as quantidades de pulsos de descargas.

Os atributos das imagens UV avaliados caracterizaram suficientemente as condições operacionais do isolador, uma vez que os comportamentos das descargas corona tinham correlação com os fenômenos físicos envolvidos. Isto significa que a análise entre diferentes estados operativos do isolador pode ser feita com base na análise dos atributos da imagem UV.

Entretanto, nem sempre o comportamento das descargas corona condiz pontualmente com o esperado, uma vez que o fenômeno do corona está suscetível às variações estatísticas. As diferenças entre os atributos das descargas e os atributos da imagem, bem como entre as próprias condições operacionais e atmosféricas que podem ser notadas no instante da medição, reforçam a importância da realização de inspeções com câmeras UV em condições climáticas bem definidas ou, de preferência, iguais em

todas as inspeções que venham a gerar dados que serão comparados entre si ao longo do tempo.

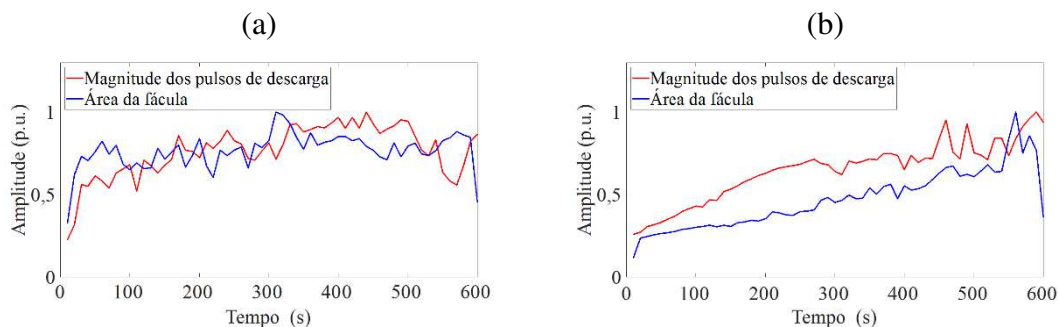
5.4 ABORDAGEM 4: CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DA IMAGEM E DAS DESCARGAS CORONA E OS DEFEITOS DE ISOLADORES

Esta abordagem tem o objetivo de avaliar como os atributos da imagem UV e os atributos da descarga corona, obtidos pela análise estatística se comportam ao longo do tempo e se há alguma correlação entre eles nos intervalos de captação. Além disso, uma vez estabelecidas as correlações entre os atributos da imagem e os atributos da descarga corona, busca-se avaliar como eles podem caracterizar as condições operacionais dos isoladores. Os isoladores foram ensaiados na condição de limpos e secos. Durante os ensaios, a umidade relativa do ar variou entre 53% e 60% e a temperatura média foi de 27°C.

Os atributos obtidos ao longo do tempo puderam ser comparados entre si, para os diferentes casos. A variação estatística das descargas, bem como das condições atmosféricas no ambiente de medição, não permitiram estabelecer, em todos os casos, uma correlação completa entre os atributos da imagem UV e dos pulsos de descarga. Entretanto, em alguns casos, pôde-se observar uma dependência entre determinados parâmetros ao longo do tempo, de forma que podem ser feitas estimativas entre eles.

Na Figura 5.24, por exemplo, estão mostradas as variações da magnitude dos pulsos de descarga e da área da fâcula, normalizados nos seus valores máximos. O intervalo de captação foi de 10 minutos. Estes valores foram calculados a cada 10 segundos, de forma que são mostrados 60 pontos para cada curva. Nas Figura 5.24 (a) e (b) são apresentadas as variações da magnitude dos pulsos de descarga e da área da fâcula ao longo do tempo, para os isoladores 06 e 10, respectivamente.

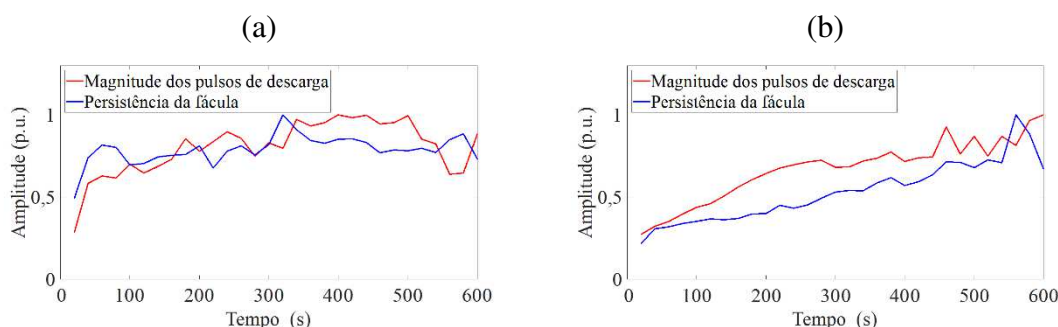
Figura 5.24. Correlação entre o comportamento da magnitude dos pulsos de descarga e a área da fâcula ao longo do tempo para o (a) isolador 06 e (b) isolador 10, na condição de limpos e secos. (Fonte: próprio autor)



Verifica-se, na Figura 5.24 (a) e (b), que o comportamento da área da fâcula se associa ao comportamento da magnitude dos pulsos da descarga. Entretanto, essa associação nem sempre é perceptível. Dessa maneira, como a magnitude dos pulsos varia no tempo, uma estimativa segura baseada em um atributo da imagem (como a área, neste exemplo) não pode ser realizada considerando um período insuficientemente curto de tempo. Isto justifica porque a análise do comportamento da descarga corona deve ser baseada no tempo de observação do fenômeno.

Da mesma maneira que foi mostrado anteriormente, na Figura 5.25, estão mostradas as variações ao longo do tempo da magnitude dos pulsos de descarga e da persistência da fâcula para os isoladores 06 e 10, normalizados nos seus valores máximos. Os resultados foram obtidos a cada 20 segundos, de forma que 30 pontos estão amostrados para cada curva.

Figura 5.25. Correlação entre o comportamento da magnitude dos pulsos de descarga e a persistência ao longo do tempo para o (a) isolador 06 e (b) isolador 10, na condição de limpos e secos. (Fonte: próprio autor)



Verifica-se, na Figura 5.25 (a) e (b), que o comportamento da persistência, assim como a área, também se associa ao comportamento da magnitude dos pulsos da descarga.

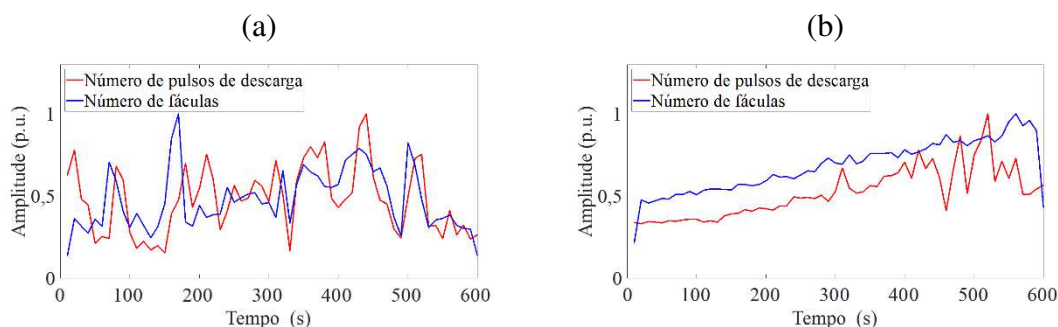
Ao comparar o comportamento da área da fâcula e da persistência, no tempo, percebe-se a correlação que os dois parâmetros guardam entre si. Portanto, se é possível

caracterizar uma imagem de uma descarga corona usando a área da fábula, também é possível fazê-lo utilizando a persistência. Como observado na Abordagem 1, a persistência tem a vantagem de ser menos suscetível à variação do ganho UV e da distância de captação sendo, portanto, um atributo seguro para quantificação da imagem UV.

Além disso, a persistência se relaciona com a taxa de recorrência da descarga, que pode ser medido em função da quantidade de pulsos de descarga ou com o número de fábula que aparecem na imagem. No tempo, os dois parâmetros também podem ser correlacionados.

Em alguns casos observados, a variação do número de fábula na imagem correspondeu à variação da quantidade de pulsos de descarga no tempo. Na Figura 5.26, está mostrada a variação da quantidade de pulsos e do número de fábula no intervalo de 600 segundos. Neste caso, 60 pontos são amostrados para representar cada curva.

Figura 5.26. Correlação entre o comportamento do número de pulsos de descarga e do número de fábula ao longo do tempo para o (a) isolador 05 e (b) isolador 10, na condição de limpos e secos. (Fonte: próprio autor)



Verifica-se, na Figura 5.26 (a) e (b), que o comportamento do número de fábula na imagem, se associa ao comportamento da quantidade de pulsos da descarga. Entretanto, esta associação não é perceptível durante todo o intervalo de captação. Há indícios de descargas que não se manifestaram como fábula. Assim, a comparação entre esses dois atributos, para efeito de estimação, também deve ser baseada na observação ao longo do tempo.

Conforme discutido anteriormente, a variação dos atributos da imagem associada à variação estatística dos atributos da descarga corona não permitem estabelecer modelos de estimação seguros que não levem em consideração o tempo de observação do fenômeno. O diagnóstico deve ser apoiado em estimativas baseadas em eventos que foram

observados ao longo do tempo. Mesmo assim, tais estimativas ainda são aproximações do valor real.

Na Figura 5.27, estão amostrados os eventos de descarga, para cada um dos isoladores ensaiados na condição de limpos e secos, comparando a magnitude dos pulsos de descarga com a área da fâcula. Os eventos tendem a formar regiões de probabilidade, ou aglomerações (*clusters*), que dependem da relação entre a magnitude da descarga e a área da fâcula. Portanto, são aproximações que diferenciam o comportamento dos isoladores. A aproximação dos centroides de cada um dos *clusters* foi obtida pelo algoritmo das k-médias. O detalhe dos *clusters* que ficaram limitados à região próxima ao retângulo vermelho, mostrado na Figura 5.27, está mostrado na Figura 5.28.

Figura 5.27. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela área da fâcula. (Fonte: próprio autor)

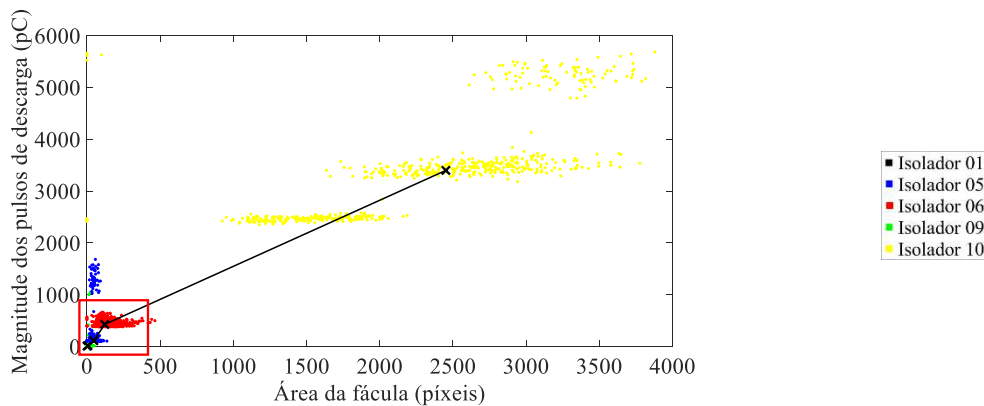
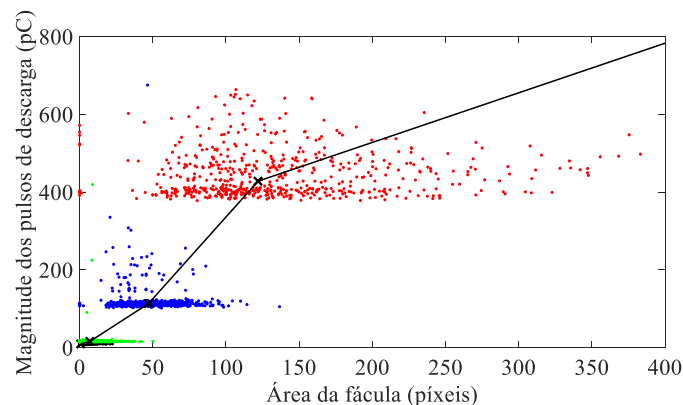


Figura 5.28. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela área da fâcula visto em detalhe. (Fonte: próprio autor)



Os procedimentos anteriores foram repetidos comparando a magnitude dos pulsos de descarga com a persistência e o resultado está mostrado na Figura 5.29. O detalhe dos *clusters* que ficaram limitados à região próxima ao retângulo vermelho, mostrado na Figura 5.29, está mostrado na Figura 5.30.

Figura 5.29. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela persistência. (Fonte: próprio autor)

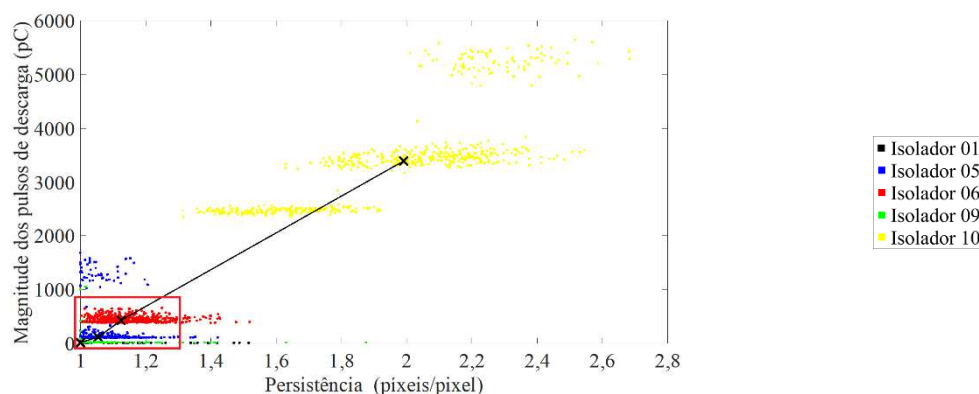
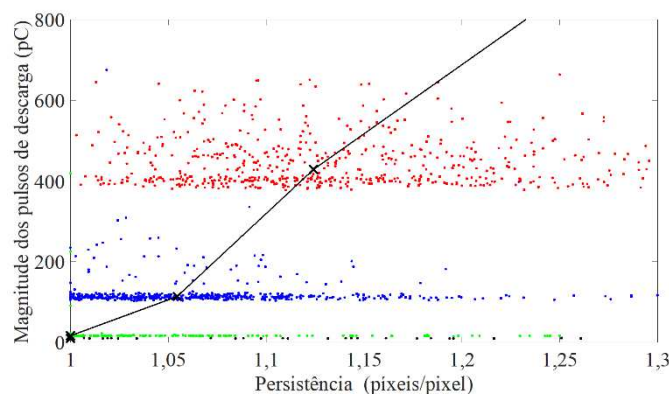


Figura 5.30. Comportamento da magnitude das descargas aproximado pela persistência visto em detalhe. (Fonte: próprio autor)



Verifica-se, na Figura 5.27 e Figura 5.28, e na Figura 5.29 e Figura 5.30, que as relações entre as magnitudes dos pulsos de descarga para os diferentes isoladores são bem definidas. Mas, as relações entre as áreas das fâculas, assim como, entre as persistências, observadas ao longo do tempo, possuem sobreposições entre si. Este fato também justifica que a avaliação dos atributos da imagem UV deve ser feita ao longo do tempo. Dessa maneira, considerando a variação das áreas das fâculas e das persistências ao longo do tempo, as aproximações forma obtidas de forma que o comportamento da magnitude dos pulsos de descarga pode ser aproximado por um comportamento linear com a área da fâcula e com a persistência.

A partir das aproximações, os isoladores podem ser classificados na seguinte sequência, do menor para o maior grau de severidade: isolador 01, isolador 09, isolador 05, isolador 06 e isolador 10. Essa classificação se aproxima da classificação visual, de acordo com os defeitos detectados em cada um dos isoladores.

O comportamento disruptivo do isolador 10 demonstra o grau de severidade em que ele se encontra em relação aos seus pares. Uma alternativa à estimação da severidade das descargas corona, que leva em consideração o tempo de captação, é feita usando a obtenção do mapa de persistência da descarga corona. O mapa de persistência da descarga corona permite identificar as regiões de maior incidência de descargas apresentando informações da localização das descargas em regiões limitadas em relação ao isolador e a taxa de recorrência da descarga em função do tempo de captação.

Na Figura 5.31 estão apresentados os mapas de persistência obtidos para cada um dos isoladores com as respectivas projeções dos graus de recorrência. O isolador 10 notabiliza-se por uma alta taxa de recorrência. As descargas corona foram detectadas em 78,43% do intervalo de captação. Além disso, a partir do mapa de persistência é possível ver a concentração de descargas no ponto exato do defeito do isolador 10: núcleo exposto.

O isolador 06 apresentou uma característica que o distingue dos demais. O mapa de persistência apresentou dois picos de recorrência. Esses picos ocorrem devido à alta rugosidade provocada pela corrosão nas ferragens. A concentração de campo elétrico é intensa neste local e provoca o aparecimento de descargas corona de forma acentuada. Por essa razão, a corrosão das ferragens é um problema grave à operação dos isoladores poliméricos.

O isolador 05, por sua vez, apesar de possuir um defeito característico de trilhamento e erosão no revestimento, apresentou descargas nas ferragens. Estas descargas também se originaram devido a uma pequena região onde há corrosão. O isolador 09, bem como o isolador 01, não apresentaram comportamento relevante de descargas corona, com taxas de recorrência menores que 1.

As taxas de recorrência indicam o percentual de aparecimento das descargas dentro do intervalo de captação considerando um valor base igual a 255. Dessa maneira, os percentuais de aparecimento obtidos para cada um dos casos estão mostrados na Tabela 5.14.

Figura 5.31. Mapas de persistência representando a intensidade, a recorrência e a localização das descargas corona na imagem UV para o (a,b) Isolador 01, (c,d) Isolador 09, (e,f) Isolador 05, (g,h) Isolador 06 e (i,j) Isolador 10. (continua) (Fonte: próprio autor).

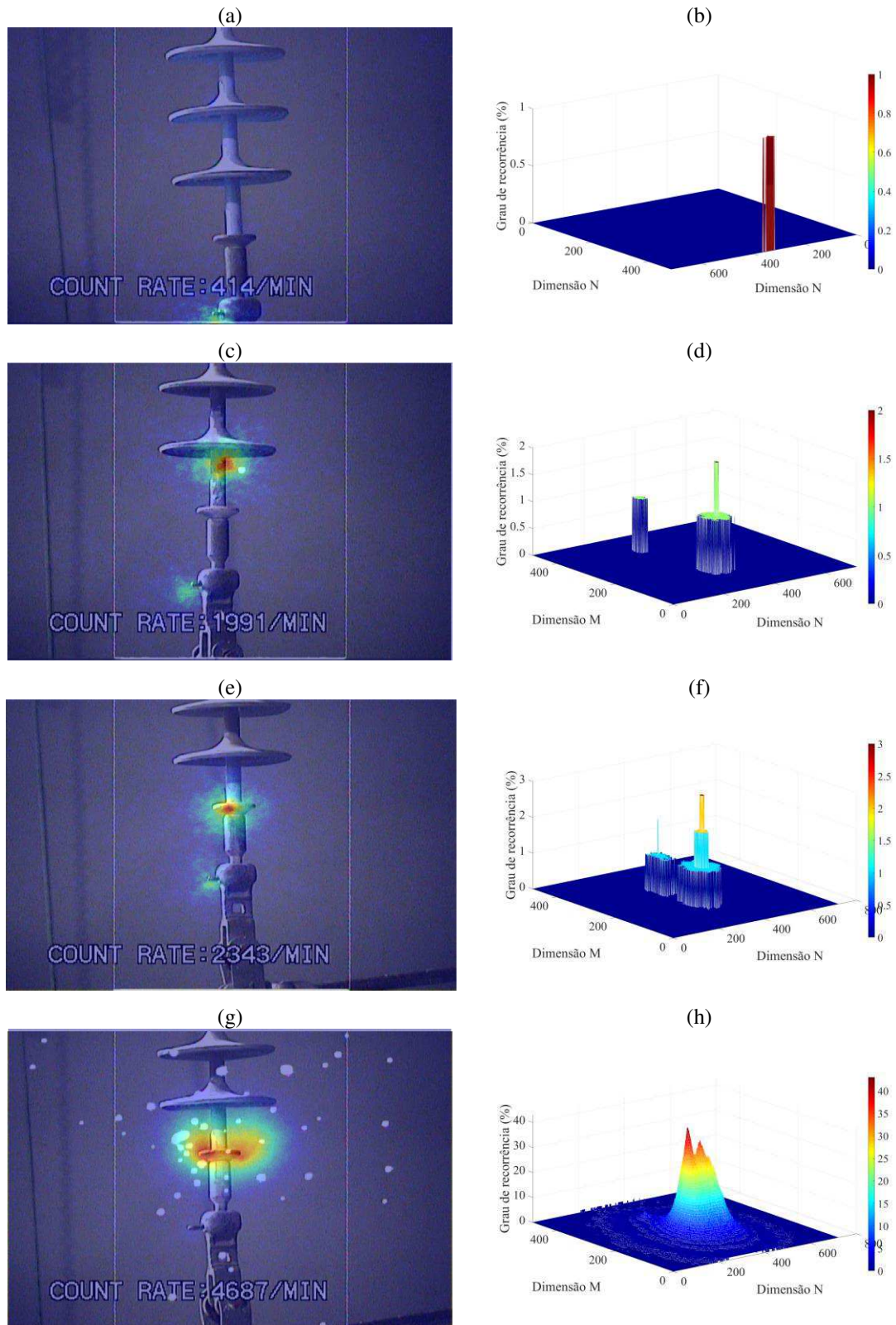


Figura 5.31. Mapas de persistência representando a intensidade, a recorrência e a localização das descargas corona na imagem UV para o (a,b) Isolador 01, (c,d) Isolador 09, (e,f) Isolador 05, (g,h) Isolador 06 e (i,j) Isolador 10. (fim) (Fonte: próprio autor).

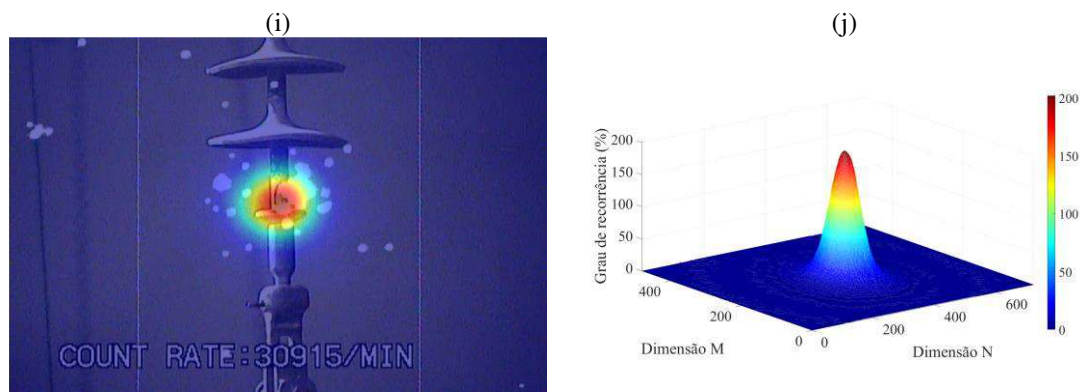


Tabela 5.14. Resultados dos cálculos dos graus de recorrência dos isoladores. (Fonte: próprio autor)

Isolador	01	09	05	06	10
Taxa de recorrência (%)	0,39	0,78	1,17	18,82	78,43

5.4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ABORDAGEM 4

Nesta abordagem, o comportamento da área das fâculas, da persistência e do número de fâculas foram correlacionados à magnitude dos pulsos de descarga e à quantidade de pulsos de descarga ao longo do tempo. Além disso, foram obtidos os mapas de persistência e as taxas de recorrência das descargas corona dos isoladores com defeitos distintos.

Ao observar o comportamento dos atributos da imagem UV e dos atributos dos pulsos de descarga ao longo do tempo, verificou-se que, em alguns casos, eles se associam e apresentam ampla correlação. Dessa maneira, de acordo com os resultados obtidos, esta tese propõe a observação do fenômeno ao longo do tempo, para que a estimação dos atributos da descarga corona baseada nos atributos da imagem UV considere a variação estatística da descarga.

Assim, foi proposta a análise da severidade das descargas, para determinação do seu grau de criticidade, a partir da observação do mapa de persistência. O mapa de persistência representa a caracterização das descargas corona na imagem UV ao apresentar de forma conjunta a área da fâcula acumulada ao longo do tempo, a localização em relação ao defeito do isolador e a persistência medida em termos da taxa de recorrência normalizada.

Dessa maneira, observando os mapas de persistência dos cinco isoladores ensaiados, verificou-se que sua caracterização foi similar à caracterização realizada pela avaliação dos atributos da magnitude dos pulsos, a área da fábula e a persistência observados ao longo do tempo.

Por fim, com estes resultados, esta tese espera contribuir com o aprimoramento das técnicas de caracterização da imagem UV que, até então de acordo com a Revisão Bibliográfica, não consideravam o tempo de captação das imagens como fator determinante para extração de atributos.

5.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa para cada uma das abordagens apresentadas no Capítulo 4. No próximo Capítulo são apresentadas as conclusões, como forma de identificar os objetivos alcançados e as contribuições que esta tese apresenta ao estado da arte. Além disso, são apresentadas as perspectivas de trabalhos futuros e a lista dos artigos científicos correlatos à pesquisa publicados ou submetidos para congressos e revistas.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método de avaliação e caracterização das condições operacionais de isoladores poliméricos usando atributos extraídos no processamento digital de imagens UV. Para tanto, os atributos da imagem UV foram correlacionados com os atributos estatísticos das descargas corona, obtidos na medição e extração de atributos dos sinais de descargas parciais, e com as condições de degradação e poluição de isoladores poliméricos.

De acordo com os objetivos propostos, diferentes abordagens práticas foram realizadas com o intuito de estabelecer os parâmetros de captação e avaliar a sensibilidade dos atributos da imagem à variação dos parâmetros de captação, e estabelecer as correlações entre os atributos da imagem e da descarga e as condições operacionais dos isoladores, como forma de estimar o grau de criticidade das descargas corona.

Assim, com o intuito de facilitar o entendimento, as abordagens práticas foram divididas nas seguintes atividades, correspondentes aos objetivos propostos:

- Na Abordagem 1, foram encontradas aproximações para estabelecer os principais parâmetros de captação da câmera UV (ganho UV e distância de captação) e avaliar a sensibilidade dos atributos da imagem UV à variação dos parâmetros de captação;
- Na Abordagem 2, os atributos da imagem UV foram correlacionados com as classificações visuais de isoladores poliméricos baseadas nas suas condições operacionais;
- Na Abordagem 3, os atributos da imagem UV e os atributos estatísticos das descargas corona foram correlacionados com as condições de poluição e umidade de um isolador polimérico;
- Na Abordagem 4, os atributos da imagem UV e os atributos estatísticos das descargas corona foram correlacionados com as condições operacionais de isoladores com defeitos distintos considerando a variação estatística das descargas corona analisada ao longo do tempo.

De acordo com os resultados da Abordagem 1, os parâmetros de captação da câmera UV foram estabelecidos para o ganho UV 150 e uma distância de captação de

7,5 m. Os atributos da imagem UV apresentaram sensibilidades distintas sob a variação dos parâmetros de captação, de forma que se verificou uma menor sensibilidade da persistência em comparação com a área da fâcula e a distribuição média de píxeis/quadro. Além disso, a contagem de fótons/minuto foi o atributo que apresentou maior sensibilidade à variação dos parâmetros de captação. O uso dos parâmetros de captação adequados depende das condições no ambiente de captação. Os resultados obtidos nesta tese não representam uma padronização para a inspeção com câmera UV, mas, as aproximações dos comportamentos dos parâmetros de captação obtidas podem ser utilizadas para estabelecer os valores adequados a cada caso.

Na Abordagem 2, o comportamento dos isoladores poliméricos em diferentes condições de degradação e poluição depositada baseado nos atributos da imagem UV foi analisado. Os resultados obtidos demonstraram que nem sempre a classificação obtida pela inspeção visual caracteriza o comportamento elétrico do isolador. Por exemplo, o caso do isolador 02, classificado como B, em boa condição operacional, apresentou valores elevados de área da fâcula e persistência, caracterizando-o como degradado e se distinguindo dos demais isoladores com classificações similares. Isto demonstrou que tanto a classificação visual como a inspeção por câmera UV e a parametrização da imagem são necessários para caracterizar o comportamento do isolador e atenuar a indicação de falsos positivos ou falsos negativos.

Na Abordagem 3, os atributos das imagens UV foram correlacionados aos atributos estatísticos das descargas corona obtidos dos ensaios com um isolador em diferentes condições de umidade e poluição. Pelos resultados obtidos, os atributos da imagem avaliados possibilitaram a caracterização das condições operacionais do isolador. Os fenômenos físicos envolvidos, quais sejam a distorção do campo elétrico e o aumento da condutividade elétrica, em cada uma das condições, puderam ser observados e comparados entre si. Assim, a caracterização do isolador em diferentes estados operativos pôde ser feita com base na extração dos atributos da imagem UV. Além disso, as observações realizadas nesta abordagem reforçaram a importância da realização de inspeções com câmeras UV em condições climáticas bem definidas, uma vez que a variação da umidade provou ser um fator determinante na obtenção dos atributos da imagem UV.

Na Abordagem 4, os atributos da imagem UV e das descargas corona foram correlacionados ao longo do tempo, de forma que pôde-se estabelecer estimativas entre eles com base em aproximações estatísticas. Entretanto, pôde-se observar que, no tempo, nem sempre os atributos se associam. Dessa maneira, a análise do fenômeno das descargas

corona com base na imagem não pode ser feita em intervalos de tempo limitados e deve prever a variação estatística da ocorrência das descargas. Assim, foi proposto o uso do mapa de persistência como forma de caracterizar a criticidade das descargas corona nos isoladores. O uso do mapa de persistência possibilitou estimar a área da fâcula da região principal, a partir da segmentação no processamento digital de imagens proposto, localizar as regiões de maior ocorrência de descargas e estimar a persistência baseada no cálculo da taxa de recorrência normalizada.

Por fim, baseando-se nos resultados obtidos, verifica-se que o método de extração de atributos das descargas corona proposto por esta tese, e que se baseia no processamento digital de imagens ao longo do tempo, permitiu caracterizar as condições operacionais dos isoladores poliméricos e estabelecer estimativas de criticidade das descargas corona. Dentre os principais resultados, destacam-se que a área da fâcula e a persistência podem ser representadas em uma única imagem ou matriz, denominada de mapa de persistência. Na prática, o mapa de persistência funciona como uma indicação visual da intensidade do campo elétrico junto ao isolador, permitindo a localização da estrutura que origina a intensificação de campo. Além disso, as técnicas de integração das imagens e de segmentação das fâculas demonstrou que são aplicáveis para a obtenção correta dos atributos, de forma que permitiram a caracterização segura do fenômeno das descargas corona.

6.1 PERSPECTIVAS PARA CONTINUAÇÃO DA PESQUISA

Como perspectivas à continuação dos trabalhos desta tese, vislumbra-se:

- Adoção de estratégias de parametrização da imagem UV automatizada no instante da captação, permitidas pelo uso da placa de captura e por softwares dedicados, com o objetivo de possibilitar o diagnóstico por imagem de isoladores em campo;
- Desenvolvimento de estudos sobre a evolução da degradação de isoladores e superfícies poliméricas observada usando os parâmetros da imagem UV, com o objetivo de estimar a vida útil dos isoladores;
- Avaliação do uso de classificadores inteligentes nas abordagens da caracterização das condições operacionais de isoladores poliméricos por imagem UV, com o objetivo de auxiliar o diagnóstico;

- Extração de atributos da imagem UV a partir da vetorização do mapa de persistência como parâmetros de entrada para redes neurais artificiais.

6.2 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, alguns artigos relacionados ao escopo da pesquisa foram publicados em eventos científicos. A lista dos artigos está apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Publicações do autor correlatas à pesquisa.

Artigos	Autores	Título	Evento/REVISTA	Ano
Publicados	FLORENTINO, M. T. B. COSTA, E. G. FERREIRA, T. V. GERMANO, A. D.	Spectral Subband Centroid Energy Vectors Algorithm and Artificial Neural Networks for Acoustic Emission Pattern Classification	Advances in Electrical and Computer Engineering	2019
	FLORENTINO, M. T. B. COSTA, E. G. FERREIRA, T. V.	Processamento de Imagem Ultravioleta e Visível de Isoladores Poliméricos	XVII ERIAC	2017
	FLORENTINO, M. T. B. BRITO, K. B. COSTA, E. G. NETO, A. B. O. DIAS, B. A. FERREIRA, T. V.	Attribute Extraction and Sensitivity Analysis for Classification of Polymeric Insulators Ultraviolet Images	20th ISH	2017
	FLORENTINO, M. T. B. OLIVEIRA, R. G. D. COSTA, E. G. LOPES, W. T. A. NETO, A. B. O. RIBEIRO, G. L.	Enhancement of the Inspection of Polymeric Insulators by Digital Infrared Image Processing	20th ISH	2017
	FLORENTINO, M. T. B. COSTA, E. G. FERREIRA, T. V. BRITO, K. B. DIAS, B. A. OLIVEIRA, R. G. D. GERMANO, A. D.	Proposal and Evaluation of a Technique Based on Ultrasound for Composite Insulator Monitoring	20th ISH	2017
	FLORENTINO, M. T. B. NETO, A. B. O. DIAS, B. A. FERREIRA, T. V.	Uma Métrica de Análise da Duração de Vídeos UV de Isoladores Poliméricos	ALTAE	2017
	FLORENTINO, M. T. B. COSTA, E. G. FERREIRA, T. V. GERMANO, A. D. BARBOSA, L. A.	Diagnóstico de Isoladores Poliméricos empregando Ruído Ultrassônico: uma Análise de Sensibilidade de Redes Neurais Artificiais	SBSE	2016

REFERÊNCIAS

ABIDIN, N. Q. Z.; ABDULLAH, A. R.; RAHIM, N. H.; NORDDIN, N.; AMAN, A. Online Surface Condition Monitoring System using Time-Frequency Analysis Technique on High Voltage Insulators. In: IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, 2013, Malaysia. **Proceedings...** Malaysia: PEOCO, 2013.

ABNT NBR 15255:2005 - Unidades de isolador composto para cadeia, para linhas aéreas com tensão acima de 1 000 V - Classes de resistência mecânica e ferragens integrantes padronizadas. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. páginas: 19. 2005.

AI, J.; JIN, L.; ZHANG, Y.; TIAN, Z.; DUAN, W. Detecting Partial Discharge of Polluted Insulators Based on Ultraviolet Imaging. In: IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2015, Australia. **Proceedings...** Australia: ICPADM, 2015.

ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de Imagens: Métodos e Análises.** Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT. Rio de Janeiro - Brasil. Disponível em: <<http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF>>. Acesso em: 09 março 2016.

AMIN, M. **Aging Investigation of Polymeric Insulators.** Universidade de Engenharia e Tecnologia. Tese de Doutorado. Paquistão, 2007.

ANEEL. Resolução Normativa N° 729 de 28 de Junho de 2016. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf>>. Acesso em 27 de março de 2019.

ANSI C29 - American National Standard for Composite Insulators - Transmission Suspension Type. American National Standard Institute. pages: 18. 2013.

BACKES, A. R.; SÁ JÚNIOR, J. J. de M. **Introdução à visão computacional usando matlab.** Rio de Janeiro: Alta Books, 2016

BALESTRO. **Isoladores Poliméricos para Alta Tensão.** Disponível em: <<http://www.balestro.com.br/wp-content/uploads/2015/05/Isoladores-Polim%C3%A9ricos-para-Alta-Tensao.pdf>>. Acesso em 27 março 2019.

BARROS, W. P. P. **Análise do efeito corona para diagnóstico de isoladores poliméricos.** 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

BARROS, W. P. P.; COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; ARAÚJO, D. B. Quantification of Corona in Polymeric Insulators Diagnosis with Ultraviolet Camera. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 2011, Germany. **Proceedings...** Germany: ISH, 2011.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. **Engineering Dielectrics – Corona Measurement and Interpretation.** v. 1, Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, SPT 669, 1979.

BERG, M.; THOTTAPPILLIL, R.; SCUKA, V. A Digital Image Processing Method for Estimating the Level of Hydrophobicity of High Voltage Polymeric Insulating Materials. In: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999, USA. **Annual Report...** USA: CEIDP, 1999.

BERNOULLI, D. **Hydrodynamica**. Sive Vivibus et Motibus Fluidorum Commentarii, 1738.

BEZERRA, J. M. B.; AQUINO, R. R. B.; OLIVEIRA, J. B.; SILVEIRA, T. M. A.; COSTA, E. G.; NERI, M. G. G.; FERREIRA, T. V.; DANTAS, J. L. P.; MENDONÇA, P. L. Application of Pattern Recognition Techniques to non Invasive Insulation Monitoring. In: IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008, Canada. **Conference Record...** Canada: ISEI, 2008.

BRADWELL, A. **Importance of preventing moisture ingress to polymeric insulators**. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, v.131, n.6., 1984.

BRITO, K. B. **Extração de Atributos de Fáculas de Imagens Ultravioletas de Isoladores Poliméricos**. 2017. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

BRITO, K. B.; COSTA, E. G.; OLIVEIRA NETO, A. B.; FLORENTINO, M. T. B.; DIAS, B. A.; FERREIRA, T. V. Attribute Extraction and Sensitivity Analysis for Classification of Polymeric Insulators Ultraviolet Images. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 2017, Argentina. **Proceedings...** Argentina: ISH, 2017.

BUONTEMPO, R. C. **Curso de Isoladores: isoladores poliméricos**. CIGRÈ BRASIL - CE D1/B2. Rio de Janeiro: Cia Brasileira de Polímeros e CEPEL, 2017. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/59440305-Curso-de-isoladores-isoladores-polimericos-ces-d1-e-b2-me-rodolfo-cardoso-buontempo-rio-de-janeiro-20-e-21-de-junho-de-cepel.html>>. Acesso em: 18 Agosto 2019.

BURNHAM, J. T.; WAIDELICH, R. J. Gunshot damage to ceramic and nonceramic insulators. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 12, n. 4, p. 1651-1656, 1997.

CARDOSO, J. A. A.; OLIVEIRA FILHO, O.; MELLO, D. R. de. Use of UV cameras for corona tests in high voltage laboratory. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 2009, South Africa. **Proceedings...** South Africa, 2009.

CIGRÉ Working Group 22.03. Composite insulators handling guide. **Electra**, v. 195, pp. 50-53, April, 2001.

CLAUSIUS, R. **On the Moving Force of Heat, and the Laws regarding the Nature of Heat itself which are deducible therefrom**. London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1851.

DOMINGUES, E. da S. **Improved Condition Monitoring of Composite Insulators**. 2012. 307 f. Tese (PhD em Engenharia Elétrica) - University of Manchester, Manchester, 2012.

EPRI - Electric Power Research Institute. **Field Guide: Visual Inspection of Polymer Insulators**. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. 1013283.

FERREIRA, T. V. **Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

FERREIRA, T. V. **Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico**. 2011. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

FERREIRA, T. V.; GERMANO, A. D.; COSTA, E. G. Ultrasound and Artificial Intelligence Applied to the Pollution Estimation in Insulations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 2, 2012.

GIRIANTARI, I. A. D. Condition Monitoring of Composite Insulators using Partial Discharge Analysis. In: IEEE International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials, 2006, Indonesia. **Proceedings...** Indonesia: ICPDM, 2006.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor insulators**. 1st ed. Phoenix: Ravi S. Gorur Inc., 1999.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 3. ed. New Jersey: Pearson, 2008.

GUBANSKI, S. M.; DERNFALK, A.; ANDERSON, J.; HILLBORG, H. Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 14, n. 5, p. 1065–1080, 2007.

GUEDES, C. P. G. **Classificação do Estado de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV (Corona) e Lógica Fuzzy**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

GUEDES, C. P. G.; COSTA, E. G.; RIBEIRO, G. L.; GERMANO, A. D. Classification of the Degradation Condition of Polymeric Insulators by UV Radiation Levels (Corona) and Fuzzy Logic. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 2015, Czech Republic. **Proceedings...** Czech Republic: ISH, 2015.

GULSKI, E.; KREUGER, F. H. Computer-aided recognition of discharge sources. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 27, n. 1, p. 82–92, 1992.

HALL, J. F. History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 1, p. 376-385, 1993.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009, vol. 2.

HAN, X.; YANG, N.; YUAN, S.; BI, J. An Analysis on Effecting Factors of Ultra-violet Imaging Appliance in Corona Discharge. In: International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2014, China. **Proceedings...** China: SPIE, 2014.

HAUSCHILD, W.; MOSCH, W. **Statistical Techniques for High-voltage Engineering**. IEE POWER ENGINEERING SERIES 13. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992.

HUBBELL Power Systems, Inc. Insulators - Suspension - Quadri*Sil - End Fittings, 2017. Disponível em: <<http://www.hubbellpowersystems.com/insulators/trans/suspension/quadrisil/end.asp>>. Acesso em: 20 novembro 2017.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 60120 - Dimensions of ball and socket couplings of string insulator units**. pages: 34. 1984.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 60270: High-voltage test techniques: partial discharge measurements.** Geneva, Switzerland, 2000.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 60507 - Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems.** pages: 30. 1991.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61109 - D Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria.** pages: 62. 2008.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 62217 - Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use – General definitions, test methods and acceptance criteria.** pages: 56. 2012.

KIKUCHI T.; NISHIMURA, S.; NAGAO, M.; IZUMI, K.; KUBOTA, Y.; SAKATA, M. Survey on the use of non-ceramic composite insulators. **IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 6, n. 5, p. 548-556, 1999.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High voltage engineering fundamentals.** 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Newnes, 2000.

LAPP INSULATORS. **Rodurflex Production Methods**, 2017. Disponível em: <<https://www.lappinsulators.com/products/production-methods/rodurflex/?L=2>>. Acesso em: 12 novembro 2017.

LEE, E. S.; FOUST, C. M. **Measurement of Surge Voltage on Transmission Lines Due to Lightning.** General Electric Review, v. 30, n. 3, p. 135-145, 1927. Disponível em: <<http://scienceservice.si.edu/pages/044138.pdf>>. Acesso em: 07 dezembro 2017.

LI, M.; CAI, W.; TAN, Z. Application of Image Monitoring Technique in Remote Monitoring System for Insulators. World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004, China. **Proceedings...** China: WCICA, 2004.

LI, Y.; WANG, T.; GUO, L.; WANG, Z.; GUO, T.; CHENG, X. Detection and Analysis of High Voltage Electrical Equipment Corona Discharge Based on Ultraviolet Imaging Technology. In: Chinese Control And Decision Conference, 2017, China. **Proceedings...** China: CCDC, 2017.

LI, Z.; LI, L.; JIANG, X.; HU, J.; ZHANG, Z.; ZHANG, W. Effects of Different Factors on Electrical Equipment UV Corona Discharge Detection. **Energies**, v. 9, n. 5, 369, 2016.

LICHTENBERG, G. C. **New Method of Investigating the Nature and Motion of the Electric Fluid.** Novi commentarii societatis regiae scientiarum Gottingensis, v. 8. Royal Society of Sciences, Gottingen, 1778. Disponível em: <<https://play.google.com/store/books/details?id=jLdZAAAACAAJ&rdid=book-jLdZAAAACAAJ&rdot=1>>. Acesso em: 07 dezembro 2017.

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J.M.; PHILLIPS, A.J. Daylight Corona Discharge Imager. In: Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999, UK. **Proceedings...** UK: ISH, 1999. (Conf. Publ. No. 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.

LIU, Y.; WANG, H.; CHEN, W.; YANG, Y.; JIAN, T. Test Study on Corona Onset Voltage of UHV Transmission Lines Based on UV Detection. In: International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008, China. **Proceedings...** China: ICHVE, 2008.

LOEB, L. B. **Electrical coronas: their basic physical mechanisms.** Berkeley: University of California Press, 1965.

LU, F.; WANG, F.; LIU, H. Insulator pollution grade evaluation based on ultraviolet imaging and fuzzy logic inference. In: IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010, China. **Proceedings...** China: APPEEC, 2010.

LU, J.; ZHAO, C.; JIANG, Z.; GUAN, S.; QIAN, Y.; XIA, D. Research on Infrared Thermal On-line Detection Technology of Zero Resistance Insulator. In: Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, 2011, China. **Proceedings...** China: CSQRWC, 2011.

LU, F.; RIJUN, D.; HAIDE, L.; HU, J. Comparison of two UV imaging parameters's in the insulator fault diagnosis. In: International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Application, 2012, China. **Proceedings...** China: ISDA, 2012a.

LU, F.; HU, J.; WANG, S.; HAIDE, L. Fault Diagnosis Based on Ultraviolet Imaging Method on Insulators. In: International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Application, 2012, China. **Proceedings...** China: ISDA, 2012b.

LUO, Y.; WU, Y.; HU, J.; DUAN, L.; CHANG, W.; BI, J. Research on Detection Method for Spatial Discharge of High Voltage Electrical Equipment based on Ultraviolet Monitoring Video. In: International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2017, China. **Proceedings...** China: EMC, 2017.

MA, B.; ZHOU, W.; WANG, T.; DING, Y. Study on Corona Discharge Test under the Power Frequency Voltage of the Severe Non-uniform Electric Field Based on the UV-light Imaging Technology. In: Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2004, China. **Proceedings...** China: APCEE, 2004.

MACÊDO, E. C. T. de. **Metodologia Para a Classificação de Descargas Parciais Utilizando Redes Neurais Artificiais.** 2014. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

METWALLY, I. **Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines.** Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 69, n. 1, p. 25–36, 2004.

MEYER, O. E. **Kinect Theory of Gases.** 2. ed. Londres: LONGMANS, GREEN and Co., 1899.

MOORE, P. J.; HOUSE, H. Corona detection using image processing techniques in a high voltage environment. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 1991, Germany. **Proceedings...** Germany: ISH, 1991.

MOORE, P. J.; HICKERY, D. L.; URBANEJA, M. G. G. Remote Sensing of Voltage Using Optical Assessment of Corona. In: Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, USA. **Proceedings...** USA: PESSM, 2000.

MORENO, V. M.; GORUR, R. S. Corona-Induced Degradation of Nonceramic Insulator Housing Materials. In: Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, Canada. **Proceedings...** Canada: CEIDP, 2001.

MORENO, V. M.; GORUR, R. S.; KROESE, A. Impact of corona on the long-term performance of nonceramic insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 10, n. 1, p. 80–95, 2003.

MUNIRAJ, C.; CHANDRASEKAR, S. Condition Monitoring of Outdoor Polymeric Insulators using Wavelets and ANFIS. In: IEEE International Conference on Power and Energy, 2010, Malaysia. **Proceedings...** Malaysia: PECon, 2010.

MURTHY, V. S.; GUPTA, S.; MOHANTA, D. K. Digital Image Processing Approach using Combined Wavelet Hidden Markov Model for Well-being Analysis of Insulators. **IET Image Processing**, v. 5, n. 2, p. 171-183, 2011.

NATRASS, D. A. Partial Discharge Measurement and Interpretation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 4, n. 3, 1988.

NÓBREGA, L. A. M. M. **Parametrização de HFCT para medição de descargas parciais em para-raios de ZnO**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

NR 10. BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Brasília, 2004.

OESTERHELD, J. **The Dielectric Behaviour of Silicone Elastomer Insulation under High Electrical Field Strength TU-Dresden, 1995 (in German)**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) TU Dresden, Dresden, 1996.

OFIL LTD. **Daycor® II**, 2003 catalogue. Disponível em: <<http://yik.co.kr/kkk/ofil-catalogue.pdf>>. Acesso em: 22 julho 2019.

OFIL SYSTEMS. **UV Technology**. Disponível em: <<http://www.ofilsystems.com/technology/index.html>> Acesso em: 08 dezembro 2017.

OLIVEIRA NETO, A. B. de; BRITO, K. B.; DIAS, B. A.; COSTA, E. G. da; FERREIRA, T. V. Attribute extraction for automatic classification of polymeric insulators based on ultraviolet imaging. In: 19th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 2015, República Tcheca. **Proceedings...** República Tcheca: ISH, 2015.

ORIENT POWER, 2015. Structure Advantage of using V-string. Disponível em: <<http://www.powerinsulator.com/list1.asp?id=650>>. Acesso em: 20 novembro 2017.

ORIENT POWER, 2017. Long-rod insulators and surge arresters. Disponível em: <<http://www.suspensioninsulator.com/model/>>. Acesso em: 20 novembro 2017.

OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 9, p. 62-66, 1979.

PEEK Jr., F. W. **Dielectric phenomena in high voltage engineering**. New York: McGraw-Hill, 1920.

PEI, C. M.; SHU, N. Q.; LI, L.; WANG, D.; LI, Z. P. An Acoustic Emission Method for On-line Monitoring the Contamination-causing Flashover of Insulator. In: International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, China. **Proceedings...** China: ICEMS, 2008

PINNANGUDI, B.; GORUR, R. S.; KROESE, A. J. Quantification of Corona Discharges on Nonceramic Insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 12, n. 3, p. 513-523, 2005.

PRASAD, D. S.; REDDY, B. S. Digital image processing techniques for estimating power released from the corona discharges. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 1, p. 75-82, 2017.

PREWITT, J. M. S. **Object Enhancement and Extraction**. In "Picture Processing and Psychopictorics". New York: Academic Press, 1970.

RAMESH, M.; CUI, L.; GORUR, R. S. Impact of superficial and internal defects on electric field of composite insulators. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 106, p. 327-334, 2019.

REBOSIO. **Rebosio Industria Elettrotecnica**, 2013. Disponível em: <<http://www.ebrebosio.com.tr/en/about-us/rebosio-industria-elettrotecnica/>>. Acesso em: 12 novembro 2017.

RIBEIRO, G. L. **Aprimoramento da Classificação de Isoladores Poliméricos por Medições Termográficas e Radiação UV usando Processamento de Imagens e RNA**. 2017. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

ROCHA, P. H. V.; ALBERT, B. B.; COSTA, E. G.; PEIXOTO, J. E. B.; SERRES, A. J. R. Analysis in Time and Frequency Domain of the RF Signal in High Voltage Insulators. In: The 20th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH, 2017, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires, 2017. v. 1.

ROCHA, P. H. V.; COSTA, E. G.; SERRES, A. J. R.; G. V. R. XAVIER; PEIXOTO, J. E. B.; LINS, R. L. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF spectrum. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v.113, p. 355-361, 2019.

SHONG, K. M.; KIM, Y. S.; KIM, S. G. Images Detection and Diagnosis of Corona Discharge on Porcelain Insulators at 22.9kV D/L. In: IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007, Poland. **Proceedings...** Poland: DEMPED, 2007.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentos de Processamento Digital de Imagens**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SOUZA, B. A. **Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas**. 2016a. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016a.

SOUZA, A. L. **Efeito Corona em Isoladores Poliméricos Sob Condições Adversas**. 2016b. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016b.

STRI - Sweden Transmission Research Institute. **Guide 1 92/1 - Hydrophobicity Classification Guide**. Estocolmo, 1992.

STRI - Sweden Transmission Research Institute. **Guide for Visual Identification of Deterioration and Damages on Suspension Composite Insulators**. Estocolmo, 2003.

THOMAZINI, D.; GELFUSO, M. V.; ALTAFIM, R. A. C. Analysis of Entropy and Fractal Dimensions to Classify the Hydrophobicity in Polymeric Insulators. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATING MATERIALS, 2008, Japan. **Proceedings...** Japan: ISEIM, 2008.

THOMSON, J. J. **Conduction of electricity through gases**. 2 ed. London: Cambridge University Press, 1906. 678 p.

TIAN, Z.; KAWASAKI, H.; HIKITA, M. Degradation Effects and Insulation Diagnosis of HV Polymeric Insulating Materials under Accelerated Aging Conditions. In: International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1998, Japan. **Proceedings...** JAPAN: ISEIM, 1998.

TOURREIL, C. de. Some recommendations on the handling of composite insulators. In: Insulator 2000 World Congress, 1999, Spain. **Proceedings...** SPAIN: I2KWC, pp. 278-287, 1999.

TOWNSEND, J. S. **Electricity in gases**. London: Oxford University Press, 1915.

TZIMAS, A.; DOMINGUES, E. da S.; ROWLAND, S. M. Framework for Aging of Composite Insulators to Assist Asset Management. In: IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2010, EUA. **Proceedings...** USA: ISEI, 2010.

UVIRCO TECHNOLOGIES. **CoroCAM Technology**: how it's done. Disponível em: <<https://www.uvirco.com/technology/>>. Acesso em: 08 dezembro 2017.

VAZQUEZ, I. R.; CHAVEZ, J. L. F. Criteria for the Diagnostic of Polluted Ceramic Insulators based on the Leakage Current Monitoring Technique. In: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999, USA. **Annual Report...** USA: CEIDP, 1999.

VOSE, F. C. **Field Service Trials of Polymer Insulators for High Voltage transmission Lines** Paper No. 31, CP 65-6633, IEEE T&D Summer Meeting. Detroit, 1965.

VOSLOO, W. L.; MACEY, R. E.; TOURREIL, C. **The Practical Guide to High Voltage Insulators**. South Africa: Crown Publications cc, v.3, p. 220, 2006.

WALKER, J. S. **A primer on Wavelets and their Scientific Applications**. New York: CRC Press, 1999.

WANG, S.; LU, F.; LIU, Y. Estimation of Discharge Magnitude of Composite Insulator Surface Corona Discharge Based on Ultraviolet Imaging Method. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 21, n. 4, p. 1697-1704, 2014.

WHITEHEAD, J. B. **The High Voltage Corona in Air**. In: Proceedings of American Philosophy Society, v. 59, 1920

XU, R.; MA, L.; HU, B.; MA, H.; TAO, B. Intelligent High-voltage Discharge Fault Detection and Its Diagnosis Methods Based On ANN. In: International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing, 2011, China. **Proceedings...** China: IIPTC, 2011.

ZANG, C.; LEI, H.; JIANG, Z.; YE, H.; HE, S.; ZHAO, X.; JIANG, Z. Study on Application of Ultra-Violet Instrument in External Insulation Detection of Electric Device. In: International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2008, China. **Proceedings...** China: ICHVE, 2008.

ZHANG, Z.; ZHANG, W.; ZHANG, D.; XIAO, Y.; DENG, J.; XIA, G. Comparison of Different Characteristic Parameters Acquired by UV Imager in Detecting Corona Discharge. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 3, p. 1597-1604, 2016.

ZHOU, W.; WU, J.; MAO, M.; MA, B.; Y, J. Research on Quantification of AC Corona Discharge Intensity of Rod-plane Gap Based on UV Digital Image Processing. In: Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, China. **Proceedings...** China: APPEEC, 2009.