



Universidade Federal
de Campina Grande

CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KAL-EL BASÍLIO BRITO

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PDI
PARA A EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS DE DESCARGAS
CORONA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Abril de 2021

KAL-EL BASÍLIO BRITO

TESE DE DOUTORADO:
DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PDI
PARA A EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS DE DESCARGAS
CORONA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

Trabalho de Tese de Doutorado 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 GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D. SC.

ORIENTADOR

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Abril de 2021

B862d

Brito, Kal-El Basílio.

Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI para a extração de atributos de descargas corona em isoladores poliméricos / Kal-El Basílio Brito. – Campina Grande, 2021.

127 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. George Rossany Soares de Lira".

Referências.

1. Processamento Digital de Imagens. 2. Processamento de Energia. 3. Algoritmo de Extração de Atributos. 4. Efeito Corona. 5. Isoladores Poliméricos. 6. Monitoramento Ultravioleta. I. Costa, Edson Guedes da. II. Lira, George Rossany Soares de. III. Título.

CDU 621.31:004.932(043)

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PDI
PARA A EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS DE DESCARGAS CORONA
EM ISOLADORES POLIMÉRICOS**

KAL-EL BASÍLIO BRITO

Tese Aprovada em 21.04.2021

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

GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Orientador

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D, UFCG
Componente da Banca

BRUNO BARBOSA ALBERT, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

FABIANO FRAGOSO COSTA, D.Sc., UFBA
Componente da Banca

EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA, Dr., USP
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE – PB
ABRIL - 2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 21 DE ABRIL DE 2021
(Nº 326)

CANDIDATO(A): **KAL-EL BASÍLIO BRITO**. COMISSÃO EXAMINADORA: WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG, Presidente da Comissão, EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG, GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG, Orientadores, BRUNO BARBOSA ALBERT, D.Sc., UFCG, EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA, Dr., USP, FABIANO FRAGOSO COSTA, D.Sc., UFBA. TÍTULO DA TESE: DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO BASEADO EM PDI PARA A EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS DE DESCARGAS CORONA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia. HORA DE INÍCIO: **08h00** – LOCAL: **Sala Virtual, em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do coronavírus e de conformidade com o Art. 8º da PORTARIA PRPG/GPR Nº 003, DE 18 DE MARÇO DE 2020**.. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o(a) presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado(a) a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, ÂNGELA DE LOURDES RIBEIRO MATIAS, e os membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande, 21 de Abril de 2021.

ÂNGELA DE LOURDES RIBEIRO MATIAS
Secretária

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

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

GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG

Orientador

BRUNO BARBOSA ALBERT, D.Sc., UFCG
Examinador Interno

EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA, Dr., USP
Examinador Externo

FABIANO FRAGOSO COSTA, D.Sc., UFBA
Examinador Externo

KAL-EL BASÍLIO BRITO
Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado do candidato **KAL-EL BASÍLIO BRITO**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **ANGELA DE LOURDES RIBEIRO MATIAS, SECRETÁRIO (A)**, em 23/04/2021, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **EDSON GUEDES DA COSTA, ASSESSOR**, em 23/04/2021, às 09:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/04/2021, às 10:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/04/2021, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **BRUNO BARBOSA ALBERT, PROFESSOR 3 GRAU**, em 30/04/2021, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kal-El Basílio Brito, Usuário Externo**, em 07/10/2021, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1416852** e o código CRC **8883D4D9**.

Referência: Processo nº 23096.021800/2021-81

SEI nº 1416852

Caro Professor
Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa
Coordenador do PPgEE/UFCG

Eu, **Eduardo Coelho Marques da Costa, Dr., USP**, na qualidade de membro da comissão examinadora da defesa de tese intitulada Desenvolvimento de um Algoritmo Baseado Em PDI para a Extração de Atributos De Descargas Corona em Isoladores Poliméricos, de **KAL-EL BASÍLIO BRITO**, da qual participei por videoconferência, no dia 21 de abril de 2021, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo nº [23096.021800/2021-81](#) como documento nº (1416852), a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.



Eduardo Coelho Marques da Costa, Dr., USP

Caro Professor
Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa
Coordenador do PPgEE/UFCEG

Eu, **Fabiano Fragoso Costa, D.Sc., UFBA**, na qualidade de membro da comissão examinadora da defesa de tese intitulada Desenvolvimento de um Algoritmo Baseado Em PDI para a Extração de Atributos De Descargas Corona em Isoladores Poliméricos, de **KAL-EL BASÍLIO BRITO**, da qual participei por videoconferência, no dia 21 de abril de 2021, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo n° [23096.021800/2021-81](#) como documento n° (1416852), a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.

Fabiano Fragoso Costa, D.Sc., UFBA



AGRADECIMENTOS

À minha mãe Rosa Maria Basílio Brito e ao meu pai Ben-Hur de Oliveira Brito pela vida, pelo amor e pelo suporte durante toda minha existência.

À minha companheira Thaís dos Santos Morais pelo amor e atenção dedicados a nossa família.

À minha filhinha Júlia Morais Brito que, mesmo sem ainda saber, me motiva a ser uma pessoa melhor.

À minha sogra Noeli Morais e ao meu sogro José Morais por toda a ajuda e atenção.

Aos meus orientadores professores Edson Guedes da Costa e George Rossany Soares de Lira. Em especial àquele que tive mais contato, Prof. Edson, pela paciência e pelo zelo com o trabalho.

Aos amigos do LAT Bruno Dias, Marconni Freitas, Marcus Tullius Florentino, Filipe Lucena, Lidja Tavares, Antonio Neto, Antonio Leite, Hugerles Silva, George Xavier, Raphael Borges, pelo apoio no desenvolvimento das atividades e pelos momentos agradáveis.

Aos demais amigos e colegas pela parceria, pela disposição em ajudar e pelas boas risadas.

Aos gestores do IFMA campus Pedreiras, do IFCE campus Cedro e do IFPE campus Pesqueira pela solicitude e compreensão que ajudaram na concretização deste doutorado.

Ao corpo técnico do LAT que auxiliou a execução as atividades no laboratório.

A CHESF, na pessoa do Engenheiro Thierry, pelos cessão dos isoladores poliméricos e diligência em auxiliar a pesquisa.

À COPELE, à CAPES e ao CNPq pelos auxílios financeiros.

Ao Contribuinte Brasileiro que financia todas as Políticas Públicas realizadas nas instituições de educação, ciência e tecnologia do Brasil.

“Enquanto os sonhos forem mais importantes que as memórias, se é jovem.”

RESUMO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um algoritmo baseado em processamento digital de imagens para a extração de atributos relacionados à manifestação ultravioleta da descarga corona em componentes de alta tensão. As amostras utilizadas no desenvolvimento do trabalho são vídeos obtidos por uma câmera sensível às emissões de radiação ultravioleta (UV). A metodologia empregada consistiu na captação de vídeos UV, no desenvolvimento do algoritmo de extração de atributos e na proposta de análise dos atributos. A captação dos vídeos UV foi realizada durante ensaios de aplicação de tensão em isoladores poliméricos de 230 kV em diferentes estados operacionais. Os vídeos captados serviram de entrada para o algoritmo desenvolvido. O algoritmo foi responsável pela adequação de imagem dos quadros do vídeo e pela quantificação e análise dos atributos extraídos. Os atributos extraídos do vídeo foram estimativa de área, área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma, persistência relativa e as distâncias às regiões de interesse do isolador polimérico. Os resultados foram apresentados em duas abordagens, uma apresentando os atributos de forma normalizada em gráfico de radar e outra apresentando as distâncias da manifestação UV às regiões de interesse do isolador. Os isoladores foram caracterizados por imagens, por gráficos de radar e pelas distâncias às regiões de interesse. Os isoladores poliméricos com trilhamento e erosão, corrosão na ferragem fase e com erosão e exposição do núcleo, por apresentarem descargas corona mais intensas, foram mais explicitamente caracterizados com relação ao isolador novo de referência. Para o caso do isolador com rachaduras, por apresentar manifestação UV de modo similar ao do isolador novo de referência, não foi possível caracterizá-lo explicitamente. De modo geral, foi estabelecida uma proposta para avaliar a manifestação UV relativa às descargas corona a partir dos vídeos UV captados de componentes de alta tensão.

Palavras-chaves: Algoritmo de Extração de Atributos, Efeito Corona, Isoladores Poliméricos, Monitoramento Ultravioleta, Processamento Digital de Imagens.

ABSTRACT

This work presented the development of an algorithm based on digital image processing for the extraction of attributes related to the ultraviolet manifestation of corona discharge in high voltage components. The samples used in the development of the work were videos obtained by a camera sensitive to emissions of ultraviolet radiation (UV). The methodology employed consisted of capturing UV videos, developing the attribute extraction algorithm and proposing the analysis of attributes. The capture of UV videos was performed during voltage application tests on 230 kV polymeric insulators in different operational states. The captured videos served as input for the developed algorithm. The algorithm was responsible for the image enhancement of the video frames and for the quantification and analysis of the extracted attributes. The attributes extracted from the video were area estimative, integrated area, integrated perimeter, form factor, relative persistence and the distances to the regions of interest of the polymeric insulator. The results are presented in two approaches, one presenting the attributes in a normalized way on a radar chart and the other presenting the distances of the UV manifestation to the regions of interest of the insulator. The insulators were characterized by images, radar charts and distances to the regions of interest. The polymeric insulators with tracking and erosion, corrosion in the phase endfitting and with erosion and exposure of the core, as they present more intense corona discharges, they were more explicitly characterized in relation to the new reference insulator. For the case of the cracked insulator, as it presents a UV manifestation similar to that of the new reference insulator, it was not possible to characterize it explicitly. In general, a proposal was established to evaluate the UV manifestation related to corona discharges from the UV videos captured from high voltage components.

Keyword: Attribution Extraction Algorithm, Corona Effect, Digital Image Processing, Polymeric Isolators, Ultraviolet Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fotografias de isoladores (a) cerâmico e (b) polimérico.....	1
Figura 1.2. Exemplo de imagem da manifestação UV conjuntamente com o isolador polimérico.....	5
Figura 1.3. Exemplificação de atributos de uma imagem UV genérica.....	5
Figura 2.1. Partes constituintes de um isolador polimérico.....	11
Figura 2.2. Espectro de interesse versus comprimento de onda.....	13
Figura 2.3. Princípio de funcionamento da câmera UV.....	14
Figura 2.4. Camadas R (red), G green e B (blue) que compõe a imagem RGB “Tapete da Júlia”.....	16
Figura 2.5. Vizinhança para píxel endereçado em (x,y) em (a) conectividade n-4 e (b) conectividade n-8.....	16
Figura 2.6. Distância euclidiana do píxel central em uma imagem genérica 5 × 5.....	16
Figura 2.7. Representação da resolução espacial de uma imagem.....	17
Figura 2.8. Representação da resolução temporal para (a) 15 fps e (b) 30 fps.....	18
Figura 2.9. Limiarização da (a) imagem “Tapete da Júlia” em escala de cinza para três valores: (b) 100 (c) 127 e (d) 150.....	19
Figura 2.10. Detecção de bordas da (a) imagem “Mancha Escura” para (b) conectividade n-4 e (c) conectividade n-8.....	20
Figura 2.11. Operação de erosão.....	21
Figura 2.12. Operação de dilatação.....	21
Figura 2.13. Exemplo de gráfico do radar para quatro variáveis.....	22
Figura 2.14. Diagrama de Árvore da Fundamentação Teórica.....	25
Figura 3.1. Relação entre atributos de (a) intensidade luminosa e de (b) área da manifestação UV com a magnitude de descargas parciais.....	27
Figura 3.2. Fluxograma do algoritmo de Pinnangudi <i>et al.</i> (2005).....	28
Figura 3.3. Imagens UV registradas (a) antes e (b) depois da aplicação do algoritmo de Pinnangudi <i>et al.</i> (2005).....	28
Figura 3.4. Imagens captadas por Shong <i>et al.</i> (2007) com câmera UV com ganho UV de 60 para as tensões de: (a) 10 kV, (b) 30 kV, (c) 50 kV e (d) 70 kV.....	29
Figura 3.5. Relação proposta por Shong <i>et al.</i> (2007) entre diâmetro da manifestação UV e risco de ruptura.....	30
Figura 3.6. Segmentação da imagem do isolador em partes de interesse proposta por Bruce <i>et al.</i> (2008).....	30
Figura 3.7. Exemplificação das etapas de aplicação do algoritmo de de Zhou <i>et al.</i> (2009).....	31
Figura 3.8. Imagem (a) captada com CoroCAM 504 e (b) resultado após processamento pelo algoritmo de Fangcheng <i>et al.</i> (2010).....	32
Figura 3.9. Manifestação UV em isoladores submetidos a diversos níveis de tensão.....	32
Figura 3.10. Exemplificação das etapas do algoritmo de Barros (2011) em experimento de aplicação de tensão em eletrodos haste-plano.....	33
Figura 3.11. Exemplificação das etapas do algoritmo de Li <i>et al.</i> (2011).....	34
Figura 3.12. Exemplificação das etapas do algoritmo de Wang <i>et al.</i> (2014).....	35
Figura 3.13. Exemplificação das etapas do algoritmo usado em Guedes (2015).....	35
Figura 3.14. Exemplificação das etapas do algoritmo de Zhang <i>et al.</i> (2016).....	36

Figura 3.15. Exemplificação das etapas do algoritmo de Ribeiro (2017).....	37
Figura 3.16. Fluxograma das etapas do algoritmo de Prasad & Reddy (2017).....	38
Figura 3.17. Mapa de persistência apresentado por Florentino (2019).....	38
Figura 4.1. Quadros de um vídeo UV captado durante ensaio de aplicação de tensão	43
Figura 4.2. Fotografia da câmera Daycor II fabricada pela Ofil Systems.....	44
Figura 4.3. Configuração do arranjo experimental para o ensaio de aplicação de tensão e captção com câmera UV.....	45
Figura 4.4. Fluxograma dos procedimentos adotados em laboratório para capturaçõ de vídeos UV em ensaios de aplicação tensão.....	46
Figura 4.5. Regiões dos isoladores utilizados (a) novo e com os defeitos de (b) de rachaduras, (c) trilhamento e erosão, (d) de corrosão da ferragem terminal e (e) de erosão com exposição do núcleo.....	47
Figura 4.6. Quadro do vídeo do isolador polimérico (a) original e (b) após a segmentaçã de seu formato.....	48
Figura 4.7. Quadro da manifestaçã UV (a) original e (b) após a sua segmentaçã.....	49
Figura 4.8. Representaçã da integralizaçã dos quadros de um vídeo UV.....	50
Figura 4.9. Exemplificaçã da eliminaçã de ruído a partir da (a) imagem integralizada, seguida da (b) limiarizaçã e de (c) operações de morfologia matemática.....	51
Figura 4.10. Representaçã da (a) manifestaçã UV integralizada e sem ruído e das (b) bordas detectadas na vizinhança de conectividade n-8.....	52
Figura 4.11. Segmentaçã das partes de interesse do isolador polimérico em regiões.....	54
Figura 4.12. Endereçamento das partes de interesse.....	54
Figura 4.13. Região de maior intensidade de manifestaçã UV e região de interesse do isolador polimérico.....	55
Figura 4.14. Diagrama esquemático das etapas do algoritmo desenvolvido.....	56
Figura 4.15. Fluxograma simplificado da metodologia desenvolvida.....	58
Figura 5.1. Imagens relativas (a) ao isolador IL01 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestaçã UV com uma seta vermelha.....	60
Figura 5.2. Gráfico de radar com atributos normalizados IL01.....	61
Figura 5.3. Imagens relativas (a) ao isolador IL02 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestaçã UV com uma seta vermelha.....	62
Figura 5.4. Gráfico de radar com atributos normalizados IL02.....	63
Figura 5.5. Imagens relativas (a) ao isolador IL03 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestaçã UV com duas setas vermelhas.	63
Figura 5.6. Gráfico de radar com atributos normalizados IL03.....	64
Figura 5.7. Imagens relativas (a) ao isolador IL04 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestaçã UV com duas setas vermelhas.....	65
Figura 5.8. Gráfico de radar com atributos normalizados IL04.....	66
Figura 5.9. Imagens relativas (a) ao isolador IL05 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestaçã UV com uma seta vermelha.....	66
Figura 5.10. Gráfico de radar com atributos normalizados IL05.....	67
Figura 5.11. Gráfico de radar com todos os atributos normalizados dos isoladores.....	68

Figura 5.12. formato segmentado dos isoladores (a) IL01, (b) IL02, (c) IL03, (d) IL04 e (e) IL05.....	69
Figura 5.13. Distância euclidiana (em número de píxeis) da manifestação UV às regiões de interesse nos isoladores IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05.....	70
Figura 5.14. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL01 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha.....	71
Figura 5.15. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL02 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha.....	71
Figura 5.16. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL03 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas.....	72
Figura 5.17. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL04 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas.....	73
Figura 5.18. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL05 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propostas de normalização de atributos.....	24
Tabela 3.1. Diferenciações científicas das pesquisas da revisão bibliográfica.....	41
Tabela 5.1. Distância euclidiana (em número de píxeis) da manifestação UV às regiões de interesse nos isoladores IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05.....	70
Tabela 6.1. Artigos relacionados ao trabalho.....	79

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

C1	Capacitor 1 no arranjo experimental de aplicação de tensão
C2	Capacitor 2 no arranjo experimental de aplicação de tensão
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
d_e	Distância euclidiana
DP	Descargas parciais
fps	quadros por segundo, do inglês <i>frames per second</i>
I	Imagem com integralização de descargas
I_B	Componente da intensidade de azul na imagem digital RGB
I_{cinza}	Intensidade de píxel para imagem digital em escala de cinza
I_G	Componente da intensidade de verde na imagem digital RGB
IL0 α	Código dos isoladores ensaiados (α pode assumir valores de 1 a 5)
Ip	Isolador polimérico no arranjo experimental para realização de
ensaio	
$I_{p\&b}$	Intensidade de píxel para imagem digital em preto e branco
IR	Infravermelho, do inglês <i>infrared</i>
I_R	Componente da intensidade de vermelho na imagem digital RGB
I_{RGB}	Intensidade de píxel para imagem digital no sistema RGB
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LT	Linha de transmissão
m	dimensões de coluna de uma imagem digital
n	dimensões de linha de uma imagem digital
n	número de quadros utilizados na integralização da imagem I
PDI	Processamento Digital de Imagem
Qn	é o n -ésimo quadro do vídeo
R	Resistor limitador de corrente no arranjo experimental de aplicação
de tensão	
RF	Rádio frequência
RGB	Camadas Vermelha (<i>Red</i>), Verde (<i>Green</i>) e Azul (<i>Blue</i>)
RU	Ruído ultrassônico
T1	Transformador no arranjo experimental para realização de ensaio

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UV	Ultravioleta
X	conjunto com os valores dos dados (ou atributos)
x	valor de um dado (ou atributo) antes da normalização
(x, y)	Endereço genérico para um píxel de uma imagem digital, podendo ser indexado como em (x_1, y_1) ou (x_2, y_2) para indicar endereços de píxeis distintos
x_n	valor de um dado (ou atributo) já normalizado

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Relevância	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos	6
1.4	Contribuições da Pesquisa	7
1.5	Estrutura Organizacional do Texto	7
2	Fundamentação Teórica	9
2.1	Isoladores Poliméricos	9
2.2	Efeito Corona	12
2.3	Captção da Radiação Ultravioleta	13
2.4	Processamento Digital de Imagens	15
2.5	Tratamento de Dados	22
2.6	Síntese do Capítulo	24
3	Revisão Bibliográfica	26
3.1	Pesquisas Pioneiras e o Estado da Arte	26
3.2	Considerações sobre a Pesquisa no Tema	39
3.3	Quadro Sinóptico das Pesquisas no Tema	40
3.4	Síntese do Capítulo	42
4	Metodologia	43
4.1	Material	43
4.2	Métodos	44
4.3	Síntese do Capítulo	57
5	Resultados	59
5.1	Abordagem 1 – Gráficos de Radar para Isoladores Poliméricos de 230 kV ...	59
5.2	Abordagem 2 – Distância da manifestação UV às Regiões de interesse nos Isoladores Poliméricos de 230 kV	69
5.3	Síntese do Capítulo	74
6	Conclusão	76
6.1	Contribuições e Alcance da Pesquisa	77
6.2	Publicações	79
	Referências	80
	Anexos	88

Anexo I..... 89
Anexo II..... 90

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo Introdução são apresentadas a **contextualização**, **relevância** e a **motivação** do trabalho, em seguida os **objetivos** gerais e específicos e as **contribuições da pesquisa**. Além disso, a **estrutura organizacional do texto** também é apresentada.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E REVELÂNCIA

O desempenho dos sistemas elétricos de alta tensão, em especial das linhas de transmissão (LT), está diretamente relacionado ao funcionamento de seus isoladores elétricos. Os isoladores são os componentes responsáveis pela sustentação mecânica dos cabos das LT e pela separação de regiões de diferentes potenciais elétricos. Os principais tipos de isoladores utilizados no setor elétrico são os cerâmicos (de porcelana e de vidro) e os não cerâmicos (poliméricos), sendo a utilização de isoladores poliméricos em LT mais recente nas últimas décadas. Na Figura 1.1, fotografias de isoladores elétricos de alta tensão do tipo (a) cerâmico e do tipo (b) polimérico são apresentados.

Figura 1.1. Fotografias de isoladores (a) cerâmico e (b) polimérico. (Fonte: LAPP, 2019)



Os isoladores poliméricos têm características mecânicas e elétricas que propiciam uma maior economia durante seu período de vida útil, na sua instalação e na sua manutenção. Os isoladores, que são aplicados aos milhares em todo o sistema elétrico, devem apresentar boas condições de operação ao longo do tempo. Logo, o uso de tecnologias confiáveis de monitoramento, que possibilitem alertar às equipes de manutenção quanto ao seu estado operacional, representa uma ação estratégica para a gestão das linhas de transmissão e do sistema elétrico como um todo. As concessionárias de energia elétrica buscam determinar o estado operacional dos isoladores elétricos por

meio de diversas técnicas de monitoramento, estabelecendo ações que podem ou devem ser realizadas no componente da linha, seja de substituição, de limpeza ou mesmo o monitoramento. As técnicas de monitoramento de isoladores elétricos podem ser elencadas em dois tipos: **invasivas** ou **não invasivas**.

As técnicas invasivas são aquelas que necessitam da intervenção do operador na LT energizada para instalação de instrumento de medição ou para a retirada do isolador da LT para realização de medições. O contato direto no componente torna a aplicação mais complexa, acarretando em um maior tempo de inspeção dos isoladores e aumentando os riscos para os operadores, que necessitam atuar mais próximos de potenciais elétricos elevados. Por conta destes fatores, os custos para medições invasivas em larga escala são consideravelmente altos. A principal técnica invasiva é a aquisição da **corrente de fuga**, em que a intensidade da corrente elétrica e a sua forma de onda podem ser correlacionadas ao estado operacional dos isoladores, conforme apresentado por Fernando & Gubanski (1996), Vosloo *et al.* (2002), Elkhodary & Nasrat (2006) e Ramirez *et al.* (2012).

As técnicas não invasivas são aquelas realizadas a uma distância segura do componente energizado, sem intervenção direta no componente testado. As técnicas não invasivas são empregadas com o uso de instrumentos de captação de sinais especializados que têm potencial de reduzir o nível de subjetividade do analista humano. Destacam-se as técnicas baseadas em monitoramento de isoladores elétricos que captam as emissões nas faixas de frequência do ruído ultrassônico (RU), do sinal de rádio frequência (RF), da radiação infravermelha (IR) e da radiação ultravioleta (UV). As técnicas listadas são baseadas na captação de sinais a partir de antenas ou câmeras especializadas.

O monitoramento baseado na detecção de emissão de **ruído ultrassônico** é realizado com instrumento que registra ondas sonoras inaudíveis (nas frequências acima de 20 kHz) emitidas pelas descargas no isolador, conforme apresentado nas pesquisas de Lundgaard (1992), Ferreira *et al.* (2012) e Florentino (2015). Como desvantagem, a captação de ruído ultrassônico está sujeita a emissões de natureza desconhecida, descaracterizando o sinal captado pelo instrumento, potencialmente tornando medições em ambientes não controlados inadequadas para o diagnóstico de isoladores.

O monitoramento baseado na detecção de emissão de **rádio frequência** baseia-se no fato de que os isoladores, quando submetidos à alta tensão, tornam-se elementos irradiadores de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas se manifestam nas frequências correspondentes aos sinais de RF (entre 3 kHz a 300 GHz) e podem ter suas

intensidades medidas a partir de antenas, conforme apresentado Anjum *et al.* (2015), Jiang *et al.* (2016) e Rocha *et al.* (2019). Apesar de ser uma técnica de monitoramento promissora, ela necessita do uso de um instrumento de amostragem digital rápido para a aquisição de dados em alta frequência, o que pode ser um fator limitador para aplicação da técnica.

O monitoramento baseado na detecção da **radiação infravermelha** é realizado utilizando um termovisor, que é uma câmera que converte as ondas eletromagnéticas na faixa infravermelha, proveniente das fontes de calor, em escala de cores, na qual a ocorrência de aumento de temperatura é um indicativo de anomalia no componente, conforme apresentado nas pesquisas de Vitelli *et al.* (2000), Neri (2005), Costa *et al.* (2009), Albano *et al.* (2014), Krzma *et al.* (2015), Souza (2016) e Ribeiro (2017). Entretanto, os defeitos que não acarretam em aumento de temperatura, como aqueles relacionados às descargas corona, não podem ser identificados por esta técnica.

O monitoramento baseado na detecção da **radiação ultravioleta** é realizado utilizando uma câmera sensível à emissão UV, que fornece informações do local no componente onde estão concentradas as descargas corona, conforme estudado nas pesquisas de Zhou *et al.* (2011), Barros (2011), Fangcheng *et al.* (2012), Wang *et al.* (2014), Guedes (2015), Ribeiro (2017), Li *et al.* (2017), Brito (2017) e Florentino (2019). De modo geral, as pesquisas não apresentam de forma clara ou detalhada o modo de processamento dos dados das imagens obtidas com este componente ou, ainda, como analisar os dados obtidos para caracterizar ou mesmo classificar os isoladores com relação ao seu estado operacional.

Destaca-se também, como uma das técnicas mais relevante e assertiva para monitoramento de isoladores elétricos de alta tensão, a **inspeção visual**. A técnica pode ser realizada tanto de forma invasiva quanto de forma não invasiva (utilizando binóculos ou varreduras aéreas com helicóptero ou drones) e, para obter sucesso em sua aplicação, necessita do conhecimento especializado de um analista humano. Logo, a inspeção visual apresenta um elevado grau de subjetividade, além de não ser capaz de considerar aspectos técnico objetivos relativos aos níveis de efeito corona (STRI, 2005; EPRI, 2006).

Neste trabalho de Tese, a técnica de monitoramento baseada na detecção de radiação ultravioleta foi utilizada para monitoramento de isoladores poliméricos. A técnica é **não invasiva** e possui um **nível de subjetividade reduzido** (por aplicar um instrumento de monitoramento especializado). Além disso, tem potencial para

determinar o estado operacional dos isoladores poliméricos baseado nas descargas coronas existentes.

A partir da revisão da literatura foi constatado que desde os trabalhos pioneiros, como os de Bologna *et al.* (2002), de Pinnagudi *et al.* (2002) e de Neri (2005) até os mais recentes, como o de Florentino (2019), a captação de radiação UV usando uma câmera sensível a estas emissões pode, de certo modo, caracterizar as condições operacionais de isoladores poliméricos com relação às descargas corona. Os trabalhos sugerem que as imagens registradas e as informações fornecidas pelo instrumento especializado servem como indicativo do estado operacional do componente inspecionado. Logo, pesquisar quais informações são relevantes em imagens UV e como elas podem servir para caracterizar o isolador polimérico torna a avaliação do componente mais assertiva e, conseqüentemente, contribuindo para tornar o sistema elétrico de potência mais eficiente e seguro.

1.2 MOTIVAÇÃO

O tratamento das informações relacionadas à manifestação ultravioleta provocada pelas descargas corona ainda não é um tópico consolidado na literatura especializada, constatando-se então a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que potencialmente contribuam com a caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.

As informações obtidas com um instrumento sensível às emissões na faixa de frequência do ultravioleta são imagens contendo a representação no espectro visível da radiação ultravioleta proveniente das descargas corona. Denomina-se o instrumento como “**câmera UV**” e a representação na imagem como “**manifestação UV**”.

As imagens da manifestação UV são registradas em vídeos, conjuntamente com o vídeo do isolador polimérico na faixa da luz visível, identificando o local, no isolador, onde a manifestação UV e, conseqüentemente, as descargas corona estão concentradas. Na Figura 1.2, uma imagem contendo a representação da manifestação UV (manchas de cor branca) e do isolador polimérico é apresentada para um registro efetuado com a câmera UV.

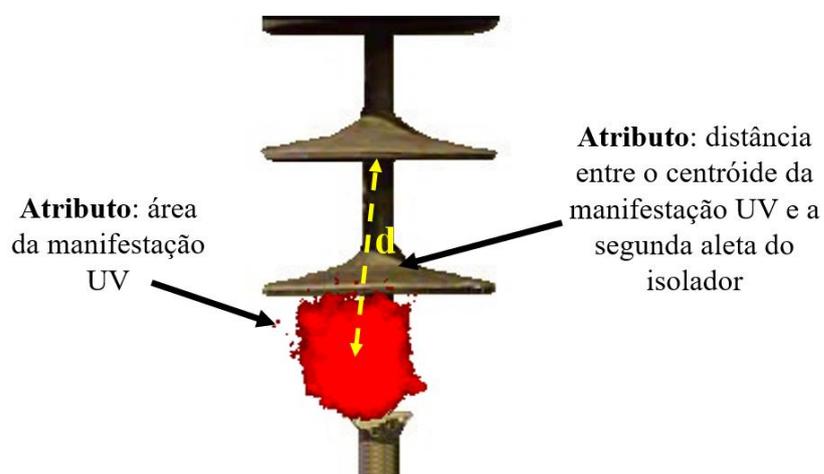
Figura 1.2. Exemplo de imagem da manifestação UV conjuntamente com o isolador polimérico. (Fonte: autoria própria)



A câmera UV é dotada de um sistema de *count rate*, do inglês taxa de contagem, que é apresentado em número de fótons por minuto. O *count rate* contabiliza os pontos luminosos correspondente a manifestação UV na imagem. O valor do *count rate* pode ser consultado diretamente na interface da câmera UV, logo, por esta facilidade, a informação pode ser utilizada como principal atributo da imagem, e, por conseguinte, do isolador filmado. Embora o *count rate* seja relevante na estimação de descargas disruptivas, ele é um dado instantâneo e não é suficientemente conclusivo para uma estimação segura das possíveis falhas no isolador polimérico (OFIL LTD, 2003).

De forma mais abrangente, a partir das filmagens da câmera UV, outras informações podem ser identificadas e utilizadas para caracterizar o estado operacional do isolador. Estas informações são chamadas, nesta Tese, de atributos. O atributo é qualquer informação extraída da imagem com algum conteúdo significativo ou relevante. Exemplifica-se em uma imagem genérica, na Figura 1.3, um atributo como uma área da manifestação UV e outro atributo como a distância entre partes de interesse da imagem.

Figura 1.3. Exemplificação de atributos de uma imagem UV genérica. (Fonte: autoria própria)



A obtenção de atributos é realizada por meio de uma sequência lógica de procedimentos, ou seja, um algoritmo. Para os vídeos captados com a câmera UV, os algoritmos são desenvolvidos baseados em ferramentas de processamento digital de imagens (PDI). Algoritmos baseados em PDI são notáveis ferramentas para enfatizar aspectos visuais relevantes em imagens, permitindo a extração e o cálculo de atributos das descargas corona nos vídeos. Os atributos obtidos, por sua vez, têm potencial de reduzir o nível de subjetividade, contribuindo para a determinação do estado operacional de isoladores poliméricos.

Diante do exposto, nesta Tese, o desenvolvimento de um algoritmo inovador voltado para a adequação de imagens e extração de atributos para vídeos UV das descargas corona em isoladores poliméricos é apresentado em detalhes. Nesta perspectiva, isoladores poliméricos em diferentes estados operacionais foram filmados por uma câmera sensível à radiação UV e tratados a partir do algoritmo desenvolvido e apresentado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um algoritmo baseado em PDI inovador para adequação de imagens e extração de atributos da manifestação ultravioleta de descargas corona, apresentando, assim, uma proposta eficiente para contribuir com a caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma análise crítica dos algoritmos existentes para extração de atributos referentes ao efeito corona em sistemas de alta tensão.
- Desenvolver um procedimento experimental apropriado para a aquisição de vídeos UV de componentes de alta tensão energizados.
- Desenvolver ferramentas eficientes de adequação de imagens e extração de atributos para vídeos UV de isoladores poliméricos.

- Analisar a influência o conjunto dos atributos da manifestação UV na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A principal contribuição da pesquisa consiste no desenvolvimento de um algoritmo que caracterize as descargas corona e auxilie a tomada de decisão com relação ao estado operacional dos isoladores poliméricos, conseqüentemente contribuindo para tornar o sistema elétrico de potência mais eficiente e seguro.

Outras contribuições da pesquisa também podem ser obtidas, destacando-se:

- A proposição de uma metodologia eficaz para aquisição de vídeos UV em ambiente de laboratório e de campo, possibilitando ensaios e medições de forma padronizada em monitoramento ultravioleta.
- A determinação dos atributos de vídeos UV que influenciam na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos de alta tensão.
- A caracterização do estado operacional dos isoladores poliméricos por meio de técnicas de análise multivariáveis.

1.5 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO TEXTO

O presente texto está organizado em seis capítulos, incluindo este capítulo Introdução.

No Capítulo 2, Fundamentação Teórica, é apresentada com base nos principais temas envolvidos na Tese: isoladores poliméricos, efeito corona, captação da radiação ultravioleta, processamento digital de imagens e tratamento de dados.

No Capítulo 3, Revisão Bibliográfica, é realizada, versando sobre as contribuições na área de monitoramento UV usando algoritmos para a caracterização de isoladores poliméricos usando atributos de vídeos UV.

No Capítulo 4, Metodologia, são apresentados material e métodos empregados a fim de atingir os objetivos propostos, bem como o procedimento experimental, a aplicação do algoritmo e a análise proposta.

No Capítulo 5, tem-se a apresentação e a discussão dos resultados obtidos após empregar a metodologia para duas abordagens propostas.

No Capítulo 6, Conclusão, é apresentada em consonância com os objetivos propostos, destacando as contribuições e os entendimentos estabelecidos pelos resultados. Além disso são apresentadas as contribuições e o alcance da pesquisa. As publicações relacionadas à pesquisa também são apresentadas.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No capítulo Fundamentação Teórica são mostrados os conceitos já consagrados na literatura, auxiliando a compreensão da metodologia adotada e dos resultados obtidos. O capítulo está organizado em seis seções: Isoladores Poliméricos, Efeito Corona, Captação da Radiação Ultravioleta, Processamento Digital de Imagens, Tratamento de Dados e Síntese do capítulo.

Na primeira seção são apresentados os **isoladores poliméricos**, suas partes constituintes, vantagens e desvantagens, além das consequências da radiação ultravioleta no revestimento polimérico. Na segunda seção é apresentado o **efeito corona**, ressaltando sua influência para os isoladores poliméricos e ainda a manifestação ultravioleta ocasionada pelo fenômeno. Na terceira seção, a **captação de radiação ultravioleta** é apresentada, destacando o espectro eletromagnético, a câmera UV e a obtenção de vídeos UV. Na quarta seção os tópicos relacionados às ferramentas de **processamento digital de imagens** são mostrados. Na quinta seção são apresentadas as técnicas de **tratamentos de dados**. Na sexta e última seção, uma síntese do capítulo é apresentada.

2.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Atualmente, os isoladores poliméricos estão em uso nas LT de todo o mundo. O emprego dos componentes aumentou progressivamente e contou com algumas décadas de experiência em serviço e várias gerações de produtos antes que pudessem finalmente ser considerados tão confiáveis quanto seus equivalentes de vidro e de porcelana. Durante o período de introdução, os isoladores poliméricos foram considerados altamente especializados e até mesmo exóticos. Eles eram comparativamente caros, devido aos baixos números produzidos, e geralmente feitos de componentes semi-acabados não padronizados, cujo emprego inicial era limitado a aplicações específicas, como em áreas com extrema poluição, vandalismo ou alto risco sísmico (VOSLOO *et al.*, 2008). Como típico de todo produto inovador, havia pouca padronização e a experiência operacional de longo prazo não existia. Como resultado, não era incomum encontrar erros de design que terminavam em falhas de serviço, especialmente relacionadas ao trilhamento do

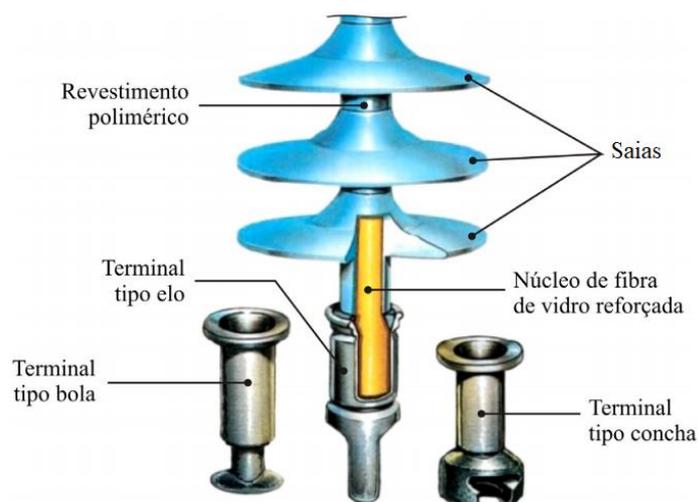
núcleo ou à fratura frágil causada pela entrada de umidade nas interfaces do revestimento (GORUR *et al.*, 1999).

Mesmo em face das não conformidades constatadas, a tecnologia de isoladores poliméricos desenvolveu-se como uma alternativa atraente à porcelana ou ao vidro, devido ao desempenho superior em determinadas aplicações. A partir da experiência operacional bem-sucedida em todo o mundo, a quantidade de produção desses componentes aumentou. Vale ressaltar que o estado da arte atual da tecnologia pode ser amplamente atribuído ao trabalho pioneiro realizado por poucos fabricantes. Instituições de pesquisa também participaram da identificação e compreensão das interações dinâmicas entre o material de revestimento e o meio ambiente, bem como os mecanismos de falhas, permitindo o desenvolvimento de modelos especializados para diversas situações existentes nos sistemas elétricos do mundo. Finalmente, a tecnologia de isoladores poliméricos alcançou um elevado nível de maturidade, que pode ser demonstrado por fatores, como: a disponibilidade de produtos padronizados verificados por testes e experiência de campo, a experiência mundial de serviço em todos os tipos de aplicações e em todos os níveis de tensão e a elevada produção de componentes, reduzindo custos. As partes constituintes de um isolador polimérico genérico são apresentados a seguir.

2.1.1 PARTES CONSTITUINTES DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS

As principais partes constituintes dos isoladores poliméricos são o **núcleo de fibra de vidro reforçado**, o **revestimento polimérico**, as **saias** (também denominadas de aletas), e as **ferragens terminais** (KUFFEL *et al.*, 2010). Os detalhes das partes que constituem o isolador polimérico podem ser visualizados na Figura 2.1.

Figura 2.1. Partes constituintes de um isolador polimérico. (Fonte: adaptado de LAPP, 2014)



A premissa básica do isolador polimérico é que diferentes materiais, quando combinados entre si, contribuem para melhorar o desempenho do componente com base em suas propriedades individuais. O núcleo de fibra de vidro reforçada é fabricado e montado de maneira que suporte as solicitações mecânicas de tração, torção e compressão a que está submetido o isolador polimérico em operação, além, claro, das solicitações elétricas. O revestimento polimérico, que cobre o núcleo e forma as saias, tem função de proteger o núcleo de agentes externos, tais quais: poluição e radiação UV. Além disso, as saias garantem uma distância de escoamento apropriada entre as ferragens fase e terra. A ferragem fase é responsável pela conexão com o cabo energizado e a ferragem terra é responsável pela conexão com a mísula da torre. A seguir são apresentadas as vantagens e desvantagens dos isoladores poliméricos.

2.1.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS

As vantagens dos isoladores poliméricos são decorrentes de dois fatores notáveis: o seu **peso reduzido** e o seu **material de revestimento**. Os isoladores poliméricos possuem dimensões compactas, com massa até 90% menor que seus equivalentes cerâmicos, o que conseqüentemente facilita o seu transporte, manuseio e instalação. O material polimérico que reveste o isolador possui uma estrutura carbônica que estabelece ligações de baixa energia proporcionando um comportamento não quebradiço e com baixa energia livre no revestimento do componente. Assim, a estabilidade energética superficial permite um excelente desempenho quanto à repulsão de água, tornando-a altamente hidrofóbica e com excelente desempenho face à poluição (HACKAM, 1999).

Além disso, as saias à base de polímeros apresentam elasticidade e, associadas à elevada resistência do núcleo central, garantem um desempenho seguro dos isoladores em regiões de vandalismo, pois, como a estrutura do isolador não se estilhaça e, conseqüentemente, não provoca um efeito visual impactante, torna-se um alvo bem menos atrativo aos vândalos, conforme apresentando por Burnham & Waidelich, (1997).

Apesar das vantagens de emprego de isoladores poliméricos nas LT justificarem seu uso, algumas desvantagens se apresentam. Os isoladores poliméricos muitas vezes não apresentam sinais aparentes de falha interna. Por ser concebido por material polimérico, a radiação ultravioleta é responsável pela degradação química, comprometendo suas propriedades mecânicas e dielétricas isolantes. Os isoladores poliméricos de uso externo, por estarem expostos às intempéries, estão sujeitos à influência da radiação UV proveniente da luz solar, a qual degrada o revestimento após longos períodos de exposição. Além da influência solar, o efeito corona também ocasiona a emissão de radiação UV, intensificando a deteriorização do isolador polimérico. O efeito corona produz o ozônio e derivados que são quimicamente agressivos e com capacidade de deteriorar o material polimérico e as ferragens terminais. Considerando o potencial de nocividade do efeito corona para os isoladores poliméricos, ele será apresentado a seguir.

2.2 EFEITO CORONA

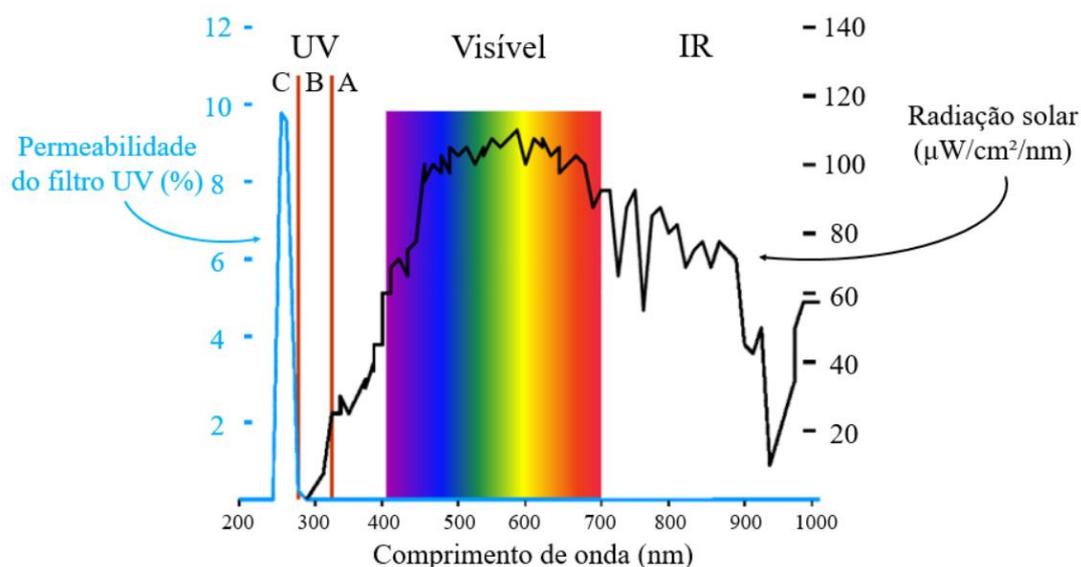
O efeito corona é uma manifestação de descargas parciais provocado pela ionização do ar por campos elétricos intensos. Devido a sua nocividade, o efeito corona é de particular importância para engenharia de alta tensão, visto que **campos elétricos intensos** são inevitáveis. As descargas corona podem ser transitórias ou estáveis e se manifestam de forma luminosa ou audível (NASSER, 1971). Em isoladores poliméricos, o fenômeno é constatado e ainda pode ser intensificado devido à poluição, umidade ou desgastes no componente, pois, estes fatores podem provocar uma distorção ainda maior no campo elétrico. Os íons produzidos em função do intenso campo elétrico bombardeiam componente deteriorando o seu material. Além disso, o efeito corona gera ozônio e óxidos de nitrogênio que em condições de alta umidade produzem ácido nítrico, substância que corrói o revestimento polimérico e as ferragens do isolador, reduzindo sua vida útil (BARTNIKAS *et al.*, 1979).

Ainda é importante salientar que as descargas corona não provocam variação de temperatura considerável e, portanto, a detecção com termovisores não é recomendada. As descargas corona provocam a emissão de radiação na faixa de frequência do ultravioleta, logo, a captação de emissões UV pode fornecer subsídio para o diagnóstico das condições operacionais dos isoladores com relação às descargas corona. A captação de radiação UV é apresentada a seguir.

2.3 CAPTAÇÃO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Por captação da radiação ultravioleta, entende-se a obtenção de informações relativas ao espectro eletromagnético correspondente aos comprimentos de onda entre 200 e 400 nm. Na Figura 2.2 é representada parte do espectro eletromagnético, destacando-se, no eixo das abscissas, os comprimentos de ondas para a radiação ultravioleta (UV), a luz visível e a radiação infravermelha (IR). A curva de cor preta destaca a radiação solar e a curva de cor azul destaca a permeabilidade do filtro detector de uma câmera sensível a radiação UV. Considerando que inspeções com UV podem ser realizadas durante o dia, o instrumento deve filtrar os comprimentos de onda acima de 280 nm que correspondem à radiação ultravioleta proveniente do sol. Para tratar apenas a radiação ultravioleta proveniente do efeito corona deve-se selecionar os sinais com **comprimento de onda entre 240 e 280 nm**, conforme a permeabilidade do filtro detector.

Figura 2.2. Espectro de interesse *versus* comprimento de onda. (Fonte: adaptado de LINDNER, 2004)



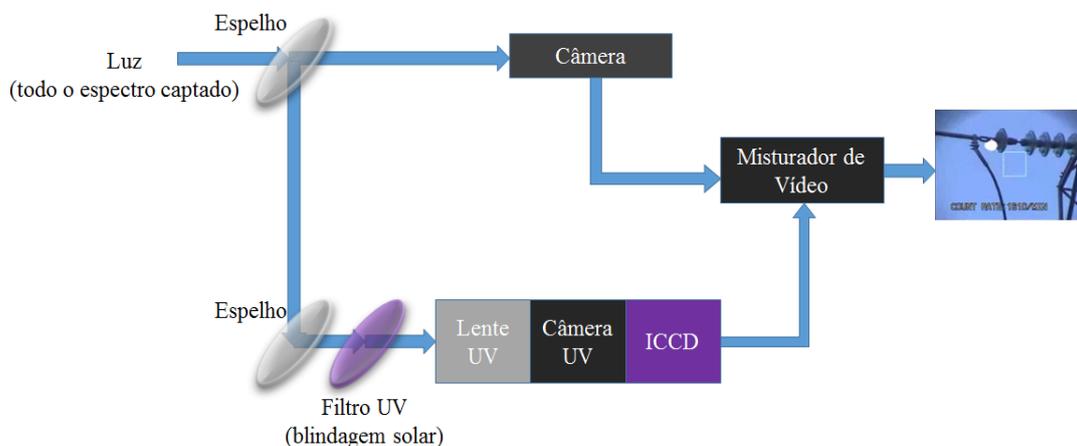
A caracterização espectral é realizada com comprimentos de onda na faixa do ultravioleta e na faixa do espectro de luz visível. O espectro visível corresponde a comprimentos de onda de 400 a 700 nm e permite a visualização do isolador inspecionado.

2.3.1 INSTRUMENTO PARA CAPTAÇÃO DA RADIAÇÃO UV

O instrumento para captação de radiação UV (ou simplesmente câmera UV) detecta a radiação emitida entre 240 e 280 nm. O sol também emite radiação nessa faixa, contudo a camada de ozônio da estratosfera realiza a filtragem natural, permitindo o uso da câmera em inspeções inclusive durante o dia (LINDNER *et al.*, 1999).

Na Figura 2.3 é possível verificar, de forma básica, o princípio de funcionamento da câmera UV. As câmeras, internas ao instrumento, são projetadas para que se registrem o sinal no espectro visível e da manifestação da radiação UV em uma mesma imagem. Com a possibilidade de exibição separada ou de forma conjunta, permitindo a localização do ponto onde ocorre a manifestação UV no isolador (LINDNER *et al.*, 1999).

Figura 2.3. Princípio de funcionamento da câmera UV. (Fonte: adaptado de LINDNER, 2004)



A câmera UV possui uma detecção mínima de descarga que corresponde a 1,5 pC a 2 pC para a distância de oito metros. Ela pode ser utilizada para medir descargas corona a uma distância de três a 100 metros, com boa relação sinal-ruído (OFIL LTD, 2003). Além disso, a câmera dispõe de um sistema de contagem de fótons por minuto e possibilita a variação do ganho de 0 a 250 em passos de 10. O aumento do ganho intensifica a manifestação visual correspondente à radiação ultravioleta. Em contrapartida, amplifica também o ruído ambiente.

Ademais, a câmera UV gera vídeos cujos quadros que podem ser processados por algoritmos baseados em ferramentas de processamento digital de imagens. A seguir a seção sobre processamento digital de imagens é apresentada.

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Por processamento digital de imagens, entende-se a manipulação de uma imagem por computador, de modo que a entrada do processo sejam imagens e saída sejam imagens e informações extraídas. O objetivo, ao se aplicar processamento digital de imagens, é melhorar, ou enfatizar, aspectos visuais, possibilitando e fornecendo, ao analista humano, subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que posteriormente possam ser submetidos a outros processamentos (SPRING, 1996). A seguir são apresentados os conceitos de píxel e imagens digitais, vizinhança e distância euclidiana de píxeis, resolução e segmentação de imagens e morfologia matemática.

2.4.1 PÍXEL E IMAGENS DIGITAIS

O píxel é a menor unidade de uma imagem digital e pode ser representado pela sua intensidade de cor e pelo seu endereçamento na imagem bidimensional. No sistema de imagens digitais **em preto e branco**, a intensidade de píxel ($I_{p\&b}$) pode assumir dois valores: 0 e 1, em que 0 é a representação da cor preta e 1 é a representação da cor branca. No sistema de imagens digitais **em escala de cinza**, a intensidade de píxel (I_{cinza}) pode assumir valores entre 0 e 255, em que 0 é a representação da cor preta, 255 é a representação da cor branca e os valores intermediários são os níveis de cinza. No sistema de imagens digitais **coloridas** (ou sistema RGB), a intensidade de píxel (I_{RGB}) é formada pela composição aditiva das intensidade de cores vermelha, verde e azul, as quais também podem assumir valores entre 0 e 255. O acrônimo *RGB* em inglês corresponde as cores vermelha (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*). A intensidade de píxel de uma imagem digital RGB, endereçada em (x, y) , pode ser representada por (2.1):

$$I_{RGB}(x, y) = (I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)), \quad (2.1)$$

A composição de uma imagem digital RGB em camadas pode ser melhor compreendida a partir do exemplo apresentado na Figura 2.4. As imagens

monocromáticas em vermelho, verde e azul são apresentadas para formar a composição de uma fotografia colorida.

Figura 2.4. Camadas R (*red*), G (*green*) e B (*blue*) que compõe a imagem RGB “Tapete da Júlia”. (Fonte: autoria própria)

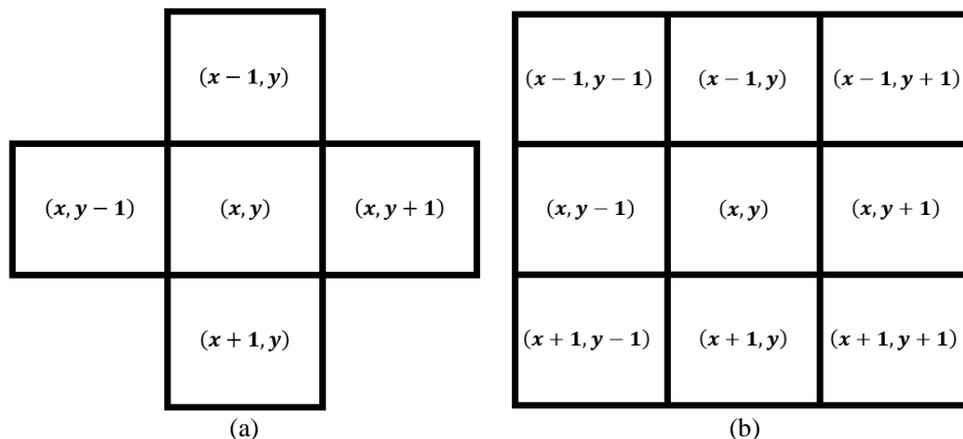


2.4.2 VIZINHANÇA E DISTÂNCIA EUCLIDIANA DE PÍXEIS

Um píxel em uma imagem bidimensional pode se relacionar a sua vizinhança por meio da **conectividade n-4** ou da **conectividade n-8** (BURGER & BURGE, 2016).

Na conectividade n-4, um píxel endereçado em (x, y) se correlaciona com os vizinhos nas coordenadas verticais e horizontais, de modo que quatro píxeis são os seus vizinhos, conforme mostrado na Figura 2.5(a). Na conectividade n-8, um píxel, também endereçado em (x, y) , se correlaciona com todos os vizinhos com que faz fronteira nas coordenadas verticais, horizontais e diagonais, de modo que oito píxeis são os seus vizinhos, conforme mostrado na Figura 2.5 (b).

Figura 2.5. Vizinhança para píxel endereçado em (x, y) em (a) conectividade n-4 e (b) conectividade n-8. (Fonte: autoria própria).



A partir da compreensão de que píxeis são endereçáveis, pode-se calcular a distância euclidiana (*de*) entre dois píxeis quaisquer a partir de seus endereços em uma imagem bidimensional (SOARES, 2012). Para dois píxeis de endereços (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , tem-se o cálculo de distância euclidiana em número de píxeis, como em (2.2):

$$de = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (2.2)$$

Na Figura 2.6, são apresentadas as distâncias euclidianas de cada píxel de uma imagem genérica de dimensões 5×5 ao píxel central da imagem.

Figura 2.6. Distância euclidiana do píxel central em uma imagem genérica 5×5 . (Fonte: autoria própria)

$2\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	2	$\sqrt{5}$	$2\sqrt{2}$
$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$
2	1	0	1	2
$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$
$2\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	2	$\sqrt{5}$	$2\sqrt{2}$

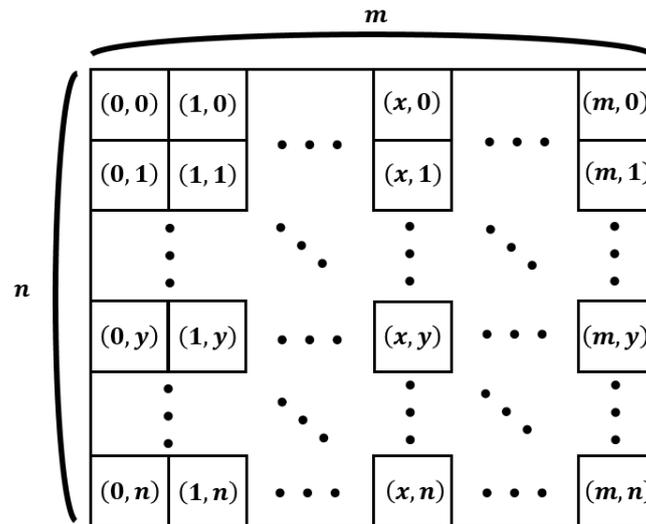
A compreensão dos conceitos de vizinhança e cálculo de distância entre píxeis também auxilia no uso de determinadas ferramentas de PDI que serão apresentadas na Metodologia.

2.4.3 RESOLUÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

A capacidade de representar uma informação visual da imagem é definida como resolução. A resolução de uma imagem pode ser especificada em termos de três parâmetros: **resolução espacial**, **resolução temporal** e **resolução de bits** (BURGER & BURGE, 2016).

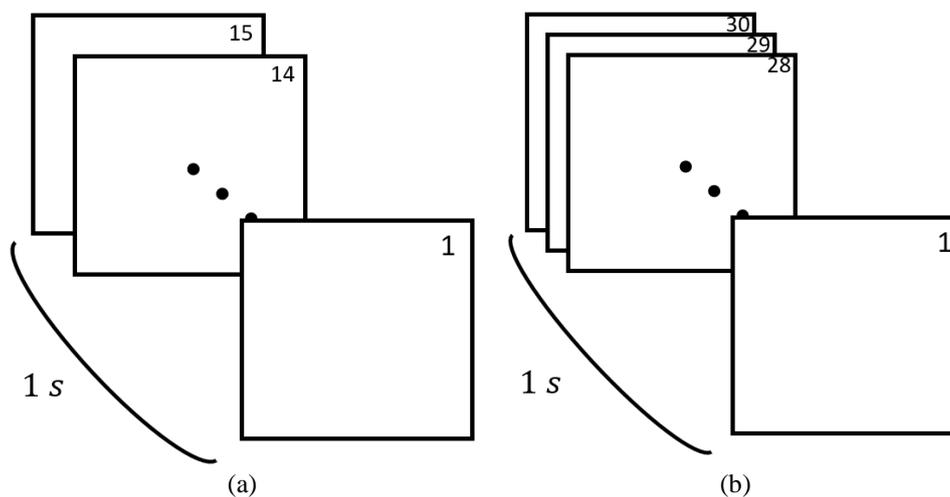
A **resolução espacial** pode ser entendida pelas dimensões de coluna (m) por linha (n) da imagem. As dimensões definem o número de píxeis usados para cobrir o espaço visual capturado pela imagem. O parâmetro está relacionado à amostragem do sinal da imagem e pode ser chamado de resolução digital da imagem. Na Figura 2.7, uma representação da resolução espacial de uma imagem com m colunas e n linhas é mostrada.

Figura 2.7. Representação da resolução espacial de uma imagem. (Fonte: autoria própria)



A **resolução temporal** é relativa a um sistema de captura contínua, como um vídeo, no qual há um número de imagens capturadas em um determinado período de tempo. O parâmetro é comumente denominado como quadros por segundo ou fps. O acrônimo fps vem do inglês: *frames per second*. Cada imagem individual é chamada de quadro do vídeo. Na Figura 2.8, são representados os quadros de um vídeo genérico em que para um segundo são registrados 15 e 30 quadros. Logo a Figura 2.8(a) apresenta 15 fps e a Figura 2.8(b) apresenta 30 fps.

Figura 2.8. Representação da resolução temporal para (a) 15 fps e (b) 30 fps. (Fonte: autoria própria)



A **resolução de bits** define o número de possíveis valores de intensidade de cor que um píxel pode assumir. O parâmetro se relaciona à quantização da informação da imagem. Por exemplo, uma imagem em preto e branco possui duas cores, uma imagem em escala de cinza possui 256 níveis de cinza diferentes, variando de preto até branco, enquanto que para uma imagem colorida RGB são $256 \times 256 \times 256$ combinações

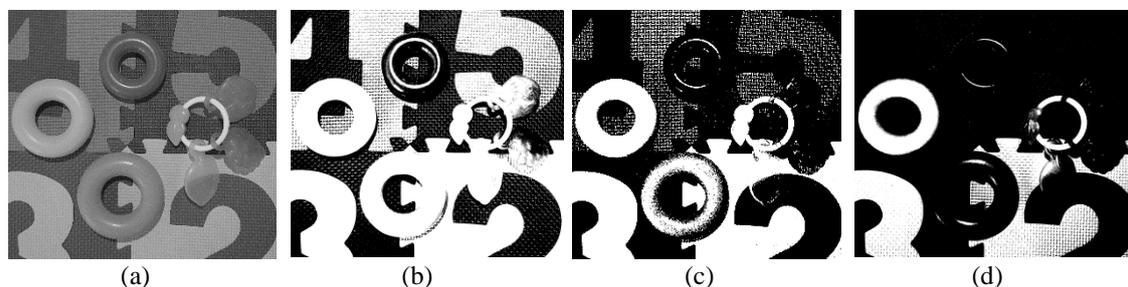
possíveis utilizando as cores vermelha, verde e azul. A resolução de bits é normalmente quantificada pelo número de bits necessários para armazenamento de todas as combinações possíveis. Em preto e branco é 1 bit, em escala de cinza são 8 bits e no sistema RGB são 24 bits. O intervalo de valores que um píxel pode assumir é geralmente chamado de intervalo dinâmico de uma imagem.

2.4.4 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

A segmentação de imagens digitais consiste basicamente em dividi-la em regiões de interesse. A segmentação é uma etapa preliminar para a execução de outras tarefas, como extração de características, proposição de classificações ou descrição de informações da imagem. Genericamente, a segmentação ocorre aplicando critérios que estabelecem diferenças a serem observadas pelo computador ou pelo analista humano entre os objetos na imagem (BURGER & BURGE, 2016). Pode-se destacar duas ferramentas bastante úteis que são a **limiarização** e **detecção de bordas**.

A **limiarização** é um procedimento de segmentação de imagem bastante simples. Após fixar um determinado valor de nível de cinza ou intensidade de cor (para uma imagem RGB), um varredura para cada pixel da imagem é realizada. Caso a intensidade do píxel seja maior que o valor de referência, o pixel passará a ser branco, caso seja menor o píxel será preto, resultando, assim, uma imagem em preto e branco. Este processo de limiarização é conhecido como critério de Otsu (OTSU, 1979). Na Figura 2.9, a limiarização é exemplificada para uma imagem em escala de cinza (que pode assumir valores entre 0 e 255) para três valores de referência: 100, 127 e 150.

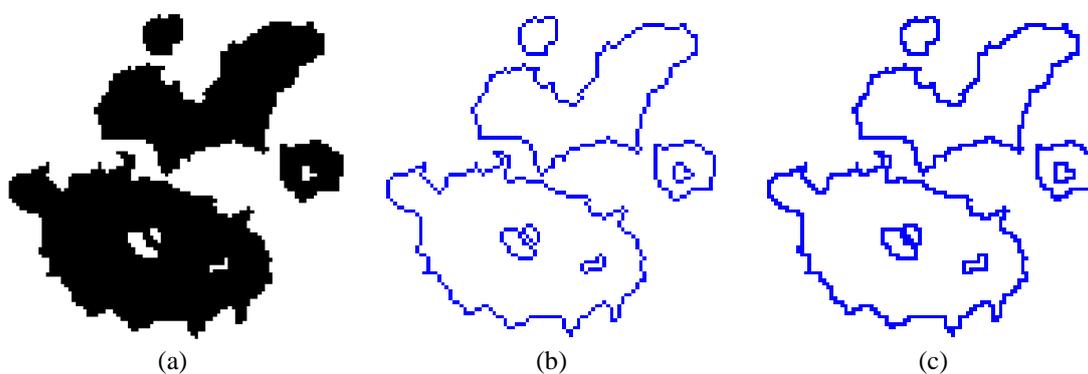
Figura 2.9. Limiarização da (a) imagem “Tapete da Júlia” em escala de cinza para três valores: (b) 100 (c) 127 e (d) 150. (Fonte: autoria própria)



Para a **detecção de bordas**, a segmentação é realizada por meio da identificação das transições existentes entre objetos da imagem. A abordagem apoia-se no fato de que há uma transmissão detectável entre duas regiões relacionadas. Podem ser destacados os

métodos que utilizam o operador Sobel e o operador Laplace. Com esses operadores e o uso de gradiente, os píxeis que pertencem a borda das imagens podem ser encontrados. Entretanto, eles geralmente não são eficientes e devem ser complementados por um algoritmo de rastreamento das bordas. Ao tratar imagens segmentadas pela técnica de limiarização é possível detectar bordas facilmente por meio da verificação de sua vizinhança, seja por conectividade n-4 ou n-8. Na Figura 2.10 é apresentada uma imagem em preto e branco e as bordas para as vizinhanças com conectividade n-4 e n-8.

Figura 2.10. Detecção de bordas da (a) imagem “Mancha Escura” para (b) conectividade n-4 e (c) conectividade n-8. (Fonte: autoria própria)



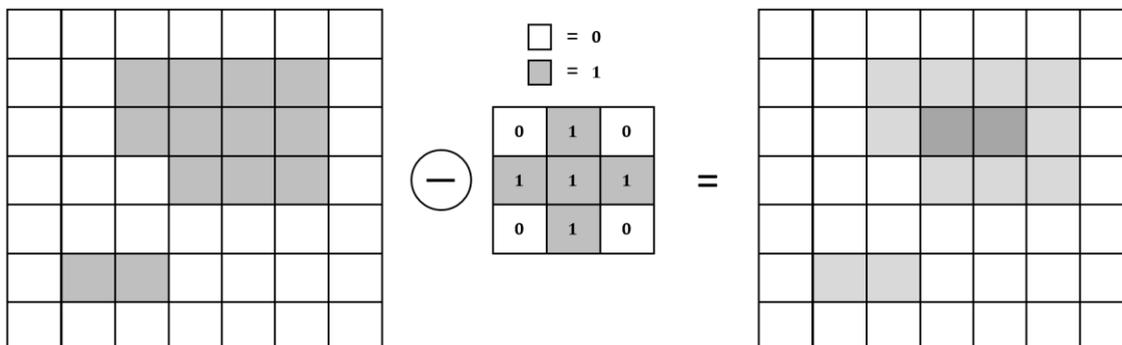
2.4.5 MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A morfologia matemática em PDI é usada para transformar as regiões segmentadas de um imagem. As operações morfológicas são baseadas na comparação dos píxeis das bordas dos objetos em primeiro plano na imagem com o píxel central do elemento estrutural escolhido (SOLOMON & BRECKON, 2011). O elemento estrutural é uma matriz na qual um píxel central é selecionado e relacionado a uma vizinhança (como a conectividade n-4 ou a n-8). Os operadores morfológicos mais simples são a **dilatação** e a **erosão**.

O processo de **erosão** remove os píxeis das bordas dos objetos em primeiro plano na imagem, transformando esses píxeis em píxeis de fundo. Na Figura 2.11, o processo é exemplificado. A imagem do lado esquerdo passa por um processo de erosão realizado pelo elemento estruturante formado por um píxel central e sua vizinhança de conectividade n-4. O píxel central do elemento estruturante faz uma varredura, píxel a píxel, na imagem verificando a conectividade n-4. Caso o píxel do objeto em primeiro plano tenham uma vizinhança com conectividade n-4, ele permanece como objeto de primeiro plano, caso

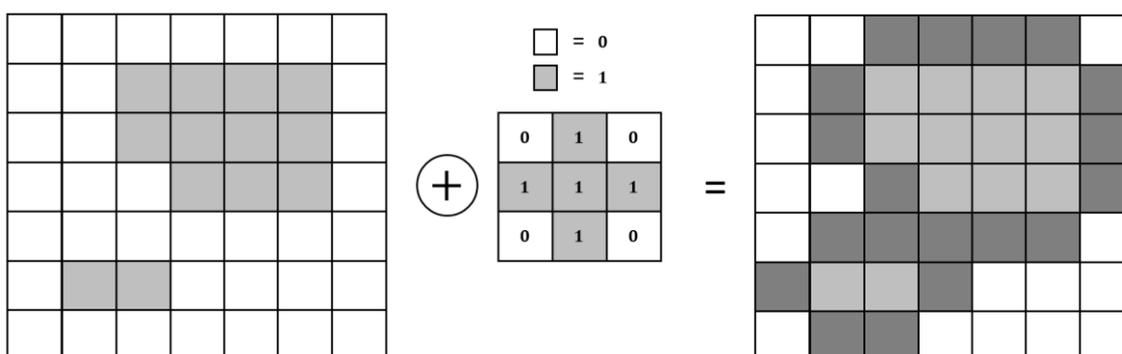
contrário ele se torna um píxel do plano de fundo. No exemplo da Figura 2.11, apenas dois píxeis na imagem atenderam ao critério.

Figura 2.11. Operação de erosão. (Fonte: adaptado de SOLOMON & BRECKON, 2011)



O processo de **dilatação** adiciona píxeis às bordas dos objetos de plano de fundo da imagem, transformando esses píxeis, trazendo-os para o primeiro plano. Na Figura 2.12, o processo é exemplificado. A imagem do lado esquerdo passa por um processo de dilatação realizado pelo elemento estruturante formado por um píxel central e sua vizinhança de conectividade n-4. O píxel central do elemento estruturante faz uma varredura, píxel a píxel, na imagem e ao encontrar píxeis correspondentes ao objeto de primeiro plano adiciona os píxeis da vizinhança de conectividade n-4 ao objeto de primeiro plano.

Figura 2.12. Operação de dilatação. (Fonte: adaptado de SOLOMON & BRECKON, 2011)



A partir das duas operações básicas de erosão e dilatação, duas outras operações podem ser definidas: a operação de **fechamento** e de **abertura**.

A operação de **fechamento** de uma imagem A por um elemento estruturante B é definida pela a erosão da dilatação da imagem, conforme descrito em (2.5).

$$(A \bullet B) = (A \oplus B) \ominus B, \quad (2.3)$$

em que \ominus é o operador de erosão e \oplus é o operação de dilatação.

O principal efeito de uma operação morfológica de fechamento é a remoção furos e fissuras na imagem. Na etapa de dilatação, a remoção furos e fissuras nas estruturas de primeiro plano que são menores que o elemento estruturante é realizada. Na etapa seguinte, de erosão, as estruturas restantes voltam a diminuir aproximadamente ao seu tamanho original.

A operação de **abertura** de uma imagem A por um elemento estruturante B é definida pela a dilatação da erosão da imagem, conforme descrito em (2.6).

$$(A \circ B) = (A \ominus B) \oplus B. \quad (2.4)$$

O principal efeito de uma operação morfológica de abertura é que todas as estruturas de primeiro plano menores que o elemento estruturante são eliminadas na etapa de erosão. Na etapa seguinte, de dilatação, as estruturas restantes são suavizadas e voltam a crescer aproximadamente ao seu tamanho original.

Os operadores de fechamento e de abertura servem, no processamento de digital de imagens, como uma remoção básica de ruído morfológico. A operação de abertura remove pequenos objetos do primeiro plano de uma imagem, geralmente considerados como píxeis brilhantes, colocando-os em segundo plano, enquanto o fechamento remove pequenos orifícios no primeiro plano, transformando pequenas ilhas de segundo plano em primeiro plano.

A seguir são apresentados os tratamentos de dados dos atributos obtidos a partir das ferramentas de PDI.

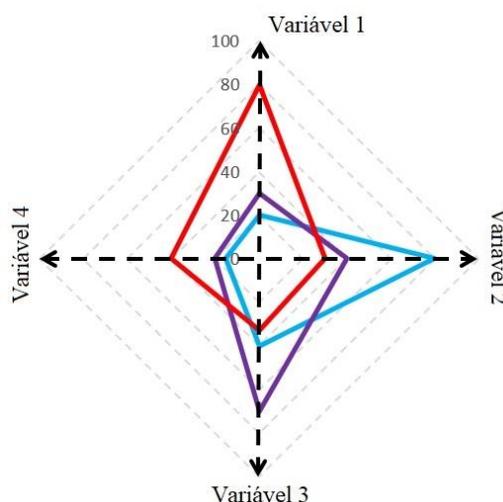
2.5 TRATAMENTO DE DADOS

Os dados obtidos devem ser analisados a partir de ferramentas apropriadas e no intuito de melhor representar os atributos obtidos das imagens. Neste trabalho, a técnica de tratamento de dados explorada foi o gráfico de radar e a normalização.

2.5.1 GRÁFICO DE RADAR

O gráfico de radar é um método de apresentação multivariável de dados na forma de um gráfico bidimensional de três ou mais variáveis quantitativas representadas em eixos que partem de um mesmo ponto. A representação gráfica consiste em uma sequência de raios equiangulares, com cada raio representando uma das variáveis. O comprimento de cada raio é proporcional à magnitude da variável com relação à máxima magnitude da variável em todos os pontos. Uma linha é desenhada ligando os valores de cada raio, formando um polígono com número de lados igual ao número de variáveis (DATAVIZ, 2019). Na Figura 2.13, um exemplo de gráfico do radar para quatro variáveis é apresentado para três conjuntos de informação, representados nas cores vermelha, azul claro e roxa.

Figura 2.13. Exemplo de gráfico do radar para quatro variáveis. (Fonte: autoria própria)



Para representar de forma apropriada as informações obtidas na extração de atributos das imagens é necessário realizar a normalização dos dados.

2.5.2 NORMALIZAÇÃO

Entende-se por normalização como sendo a harmonização de dados ou conjuntos dados em uma escala única (MATOS, 2019). Determinados dados em um conjunto podem possuir diferentes ordens de grandeza, o que, por vezes, inviabiliza sua comparação em termos absolutos. Para facilitar as comparações, os dados devem passar por alguma forma de normalização a fim de viabilizar sua comparação. Na Tabela 2.1, quatro fórmulas de normalização são apresentadas, mostrando quais valores são os extremos de escala e observações sobre as fórmulas propostas. Destaca-se que x_n é o

valor do dado já normalizado, x é o valor do dado antes da normalização e X é um conjunto de valores dos dados.

Tabela 2.1. Propostas de normalização de atributos. (Fonte: adaptado de MATOS, 2019)

Fórmula de normalização	Valores normalizados extremos da escala	Observação
$x_n = \frac{x - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}$	Máximo = 1 Mínimo = 0	Dado de maximização ideal = 1
$x_n = \frac{\max(X) - x}{\max(X) - \min(X)}$	Máximo = 0 Mínimo = 1	Dado de minimização ideal = 1
$x_n = \frac{x}{\max(X)}$	Máximo = 1 Mínimo = $\frac{\min(X)}{\max(X)}$	Dado de maximização ideal = 1
$x_n = \frac{x}{\min(X)}$	Máximo = $\frac{\max(X)}{\min(X)}$ Mínimo = 1	Dado de minimização Transformação não-linear

A seguir é apresentado a síntese do capítulo da fundamentação teórica.

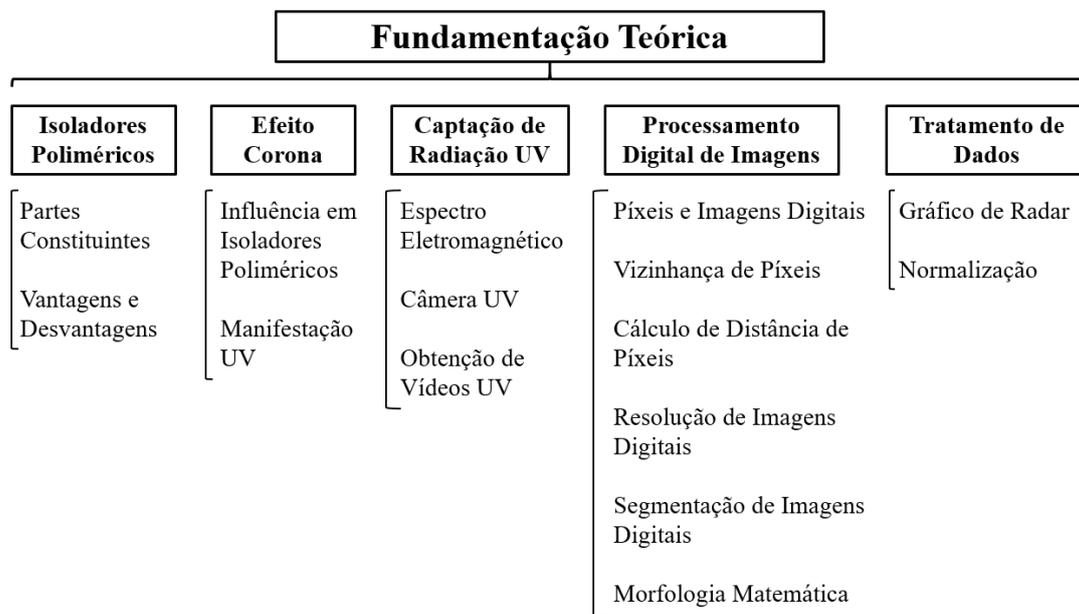
2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A fundamentação teórica seguiu um encadeamento lógico de apresentar o componente de interesse (ou objeto de teste) do trabalho: o **isolador polimérico**. Em seguida, o fenômeno de particular interesse: o **efeito corona**. Como detectar esse fenômeno: a **captação da radiação UV**. As ferramentas para processar a detecção: o **processamento digital de imagens** e, finalmente, como realizar a análise dos atributos obtidos pelo PDI: o **tratamento de dados**.

A fim de sintetizar os temas apresentados no capítulo de Fundamentação Teórica e representá-los de forma gráfica, foi elaborado um diagrama de árvore, apresentado na Figura 2.14.

No próximo capítulo será apresentada a revisão bibliográfica da Tese.

Figura 2.14. Diagrama de Árvore da Fundamentação Teórica. (Fonte: autoria própria)



3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo Revisão Bibliográfica está organizado em quatro seções: Pesquisas Pioneiras e o Estado da Arte, Considerações sobre a Pesquisa no Tema, Quadro Sinóptico das Pesquisas no Tema e Síntese do Capítulo.

Na primeira seção, **Pesquisas Pioneiras e o Estado da Arte**, as pesquisas relacionadas ao tema são apresentadas de forma cronológica. Na seção seguinte, **Considerações sobre a Pesquisa no Tema**, uma análise crítica do conjunto das pesquisas estudadas na seção anterior é apresentada. Na terceira seção, é apresentado o **Quadro Sinóptico das Pesquisas no Tema**, o quadro apresenta as principais características das pesquisas de forma comparativa entre os trabalhos realizados na área, inclusive esta Tese. Na quarta e última seção, uma síntese do capítulo é apresentada.

3.1 PESQUISAS PIONEIRAS E O ESTADO DA ARTE

Os trabalhos descritos nesta seção são analisados a partir dos algoritmos desenvolvidos para caracterizar o estado operacional dos isoladores elétricos e de outros componentes de alta tensão por meio de atributos extraídos de imagens UV. Um recorte histórico é apresentado a partir dos trabalhos iniciais, apresentando o uso de câmera UV como alternativa viável para detecção de descargas corona, até as pesquisas mais avançadas que aplicam algoritmos de extração de atributos sofisticados.

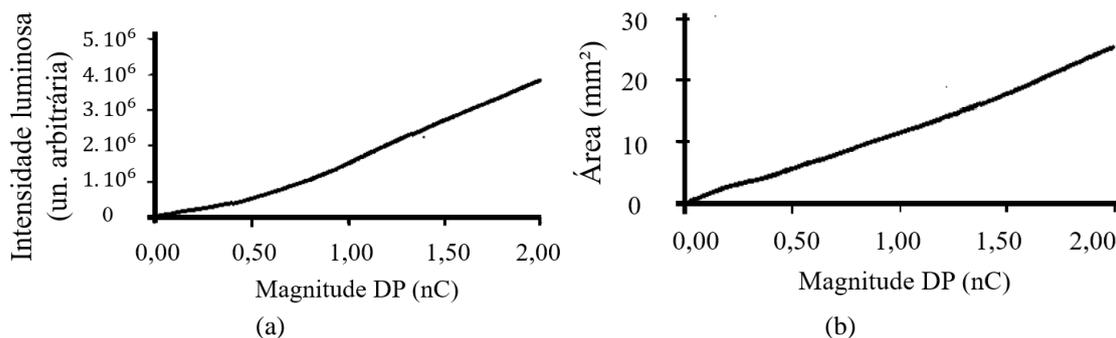
Bologna et al. (2002) inspecionaram os isoladores, especialmente poliméricos, por meio de imagens de radiação infravermelha e de ultravioleta. Os autores evidenciaram que as descargas corona são tradicionalmente detectadas por meio de fotografias usando tecnologia de visão noturna. O objetivo do trabalho foi correlacionar as imagens geradas por esta tecnologia com as imagens geradas pela câmera blindada a radiação UV, esta última, empregada durante o dia. As câmeras UV, novas na época, surgiram como alternativa para realização de inspeções durante o dia, e de fato, as inspeções realizadas pelos autores indicaram que as imagens UV podem ser correlacionadas com as inspeções usando a câmera de visão noturna. O monitoramento UV foi apontado como uma alternativa viável para inspeções fora do horário da noite. A correlação apresentada pelo

grupo foi meramente visual e subjetiva, não sendo apresentada nenhuma correlação quantitativa entre as imagens ou, ainda, ferramenta computacional similar a um algoritmo para tratar as informações obtidas.

No mesmo ano, **Pinnangudi *et al.* (2002)** trabalharam com a quantificação da energia das descargas corona em isoladores poliméricos a partir das imagens UV. Para tanto, a intensidade luminosa e a área da manifestação UV das imagens foram correlacionadas quantitativamente com medições de descargas parciais (DP), conforme é apresentado na Figura 3.1, indicando uma relação linear entre os atributos e a magnitude das descargas parciais (DP).

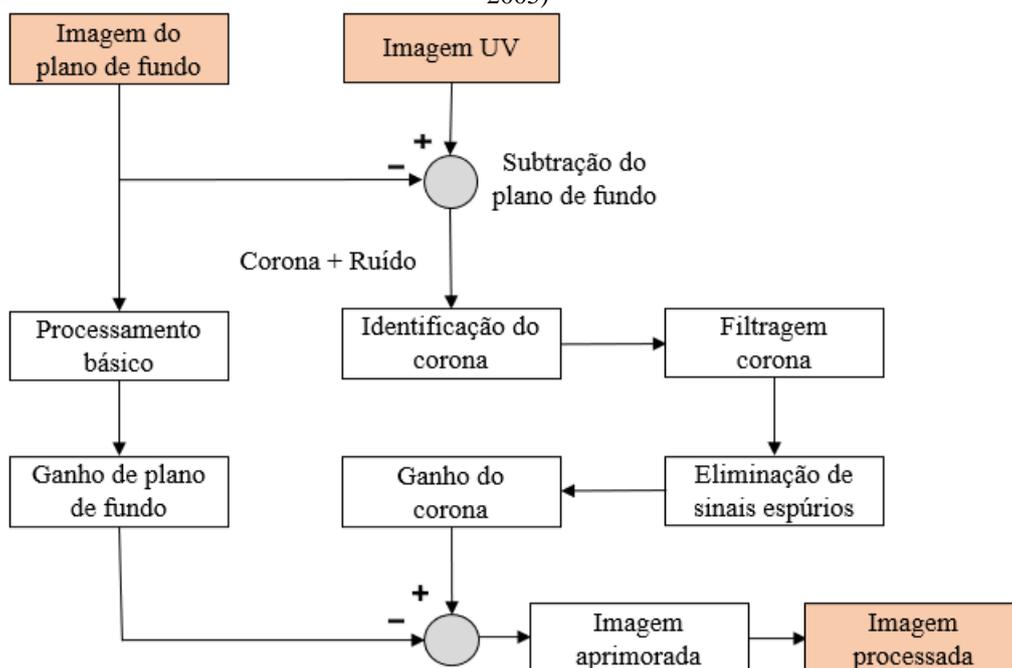
O atributo de intensidade luminosa foi representado por meio de uma unidade arbitrária obtida pela soma dos valores dos píxeis da manifestação UV e o atributo de área da manifestação UV foi calculado em milímetros quadrados, considerando que a câmera utilizada gera píxeis de área com $4,5 \mu\text{m}^2$.

Figura 3.1. Relação entre atributos de (a) intensidade luminosa e de (b) área da manifestação UV com a magnitude de descargas parciais. (Fonte: adaptado de Pinnangudi *et al.*, 2002)



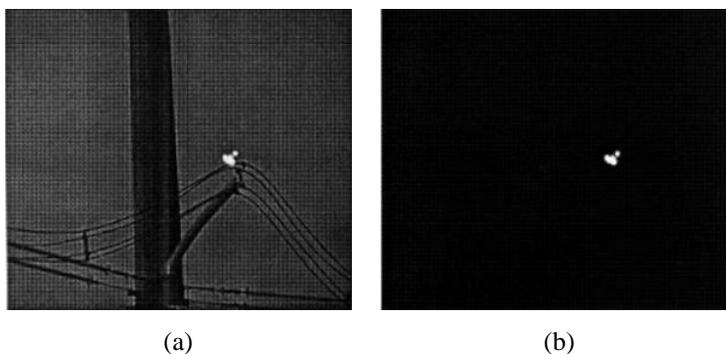
Os autores apresentaram a descrição do algoritmo adotado no trabalho, de forma um pouco mais detalhada, apenas em 2005. **Pinnangudi *et al.*, (2005)** realizaram as captações de imagens UV com as câmeras CoroCAM 2 e CoroCAM 3 e apresentaram novamente a correlação entre os já citados atributos das imagens (intensidade luminosa e área) e a magnitude de descargas parciais. Na Figura 3.2, o fluxograma do algoritmo baseado em PDI utilizado para obtenção dos atributos das imagens UV é apresentado.

Figura 3.2. Fluxograma do algoritmo de Pinnangudi *et al.* (2005). (Fonte: adaptado de Pinnangudi *et al.*, 2005)



A partir de duas imagens capturadas pela câmera UV, o algoritmo considera as regiões de descargas corona apenas aquelas cujos píxeis de mesmo endereço em ambas imagens apresentam manifestação ultravioleta. Essa consideração é feita tomando uma das imagens como sendo o plano de fundo. A imagem resultante é tratada, identificando o corona (ou seja, a manifestação UV), passando por etapa de filtragem: de eliminação de sinais espúrios e de aplicação de ganho do corona. As últimas etapas não são apresentadas em detalhes no trabalho, entretanto são apresentados resultados da aplicação do processamento proposto. Na Figura 3.3 é mostrada a imagem UV registrada (a) antes e (b) depois da aplicação do algoritmo desenvolvido na pesquisa.

Figura 3.3. Imagens UV registradas (a) antes e (b) depois da aplicação do algoritmo de Pinnangudi *et al.* (2005). (Fonte: adaptado de Pinnangudi *et al.*, 2005)

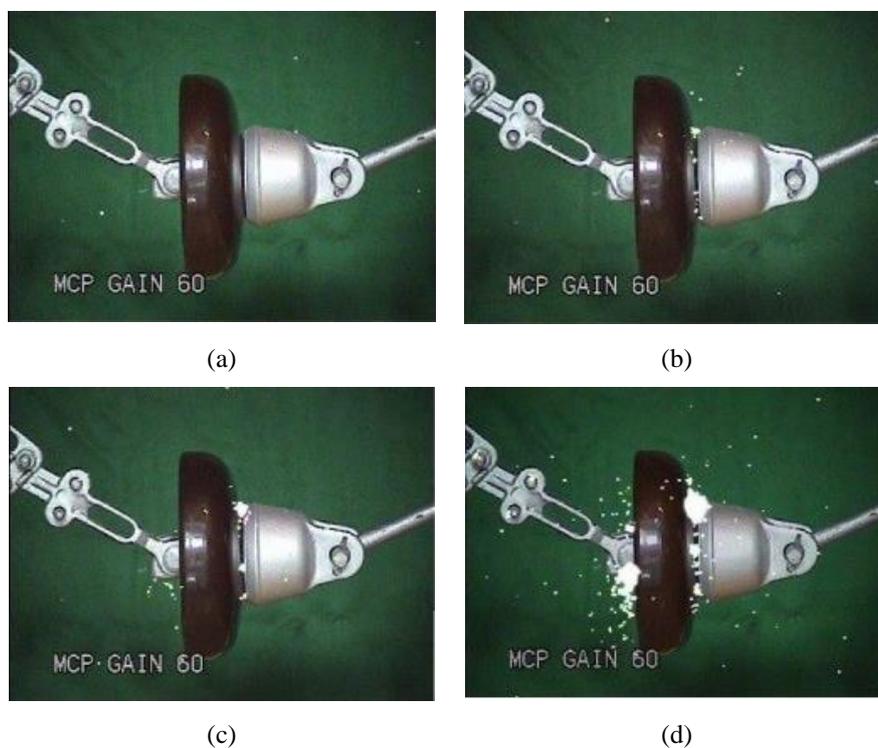


O algoritmo para extração de atributos, baseado em PDI, proposto por Pinnangudi *et al.* (2005) serviu como base para trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores. Apesar de Pinnangudi *et al.* (2005) não terem pormenorizado as etapas intermediárias do

algoritmo, o trabalho é uma orientação de como obter atributos da manifestação UV proveniente das descargas corona em imagens.

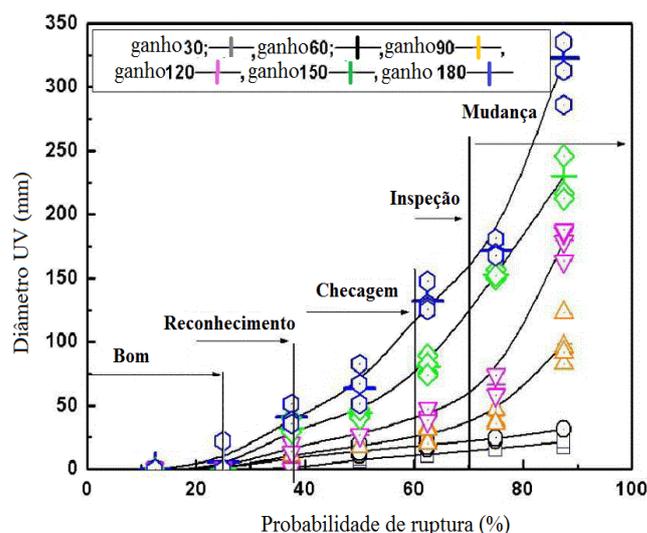
Shong *et al.* (2007) captaram imagens com a manifestação ultravioleta correspondente às descargas corona em isoladores de suspensão de porcelana de 23 kV utilizando a câmera Daycor II. Os pesquisadores utilizaram diversos ganhos para a câmera (30, 60, 90, 120, 150 e 180) e analisaram os seus efeitos para vários níveis de tensão (10, 30, 50 e 70 kV). Na Figura 3.4, podem ser observadas as imagens, enfatizando o aumento da manifestação UV para diferentes níveis de tensão e um ganho UV de 60 e a distância de 5 m.

Figura 3.4. Imagens captadas por Shong *et al.* (2007) com câmera UV com ganho UV de 60 para as tensões de: (a) 10 kV, (b) 30 kV, (c) 50 kV e (d) 70 kV. (Fonte: adaptado de Shong *et al.*, 2007)



Os autores apresentaram, como um atributo da imagem UV, o diâmetro das manifestações UV das descargas corona. Entretanto, o algoritmo necessário para extração desse atributo não foi detalhado. Na pesquisa, o diâmetro da manifestação UV foi apresentado como um indicativo de risco de ruptura superficial dos isoladores cerâmicos, sendo também diretamente relacionado ao nível de tensão aplicado. Para cada ganho da câmera UV, os autores arbitraram valores para o atributo de diâmetro que seriam indicativo da ação a ser executada pela equipe de manutenção no isolador (reconhecimento, checagem, inspeção e mudança). Na Figura 3.5 é mostrada a relação entre diâmetro da manifestação UV e risco de ruptura estipulados pela pesquisa.

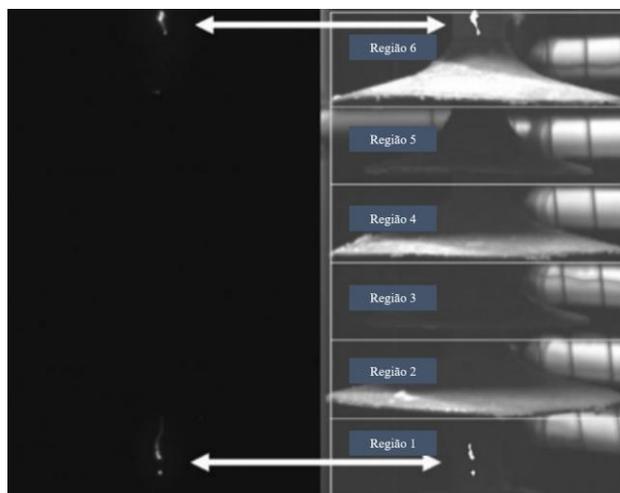
Figura 3.5. Relação proposta por Shong *et al.* (2007) entre diâmetro da manifestação UV e risco de ruptura. (Fonte: adaptado de Shong *et al.*, 2007)



Os autores buscaram contribuir com uma classificação das imagens UV (a partir do diâmetro da manifestação UV), porém não foi relatado o porquê da escolha dos valores adotados como referências para as ações sugeridas à equipe de manutenção.

Bruce *et al.* (2008) realizaram ensaios elétricos em isoladores poliméricos em uma câmara de névoa salina. Eles fizeram aquisição do sinal de tensão, do sinal corrente de fuga e registraram imagens UV do isolador sob ensaio. Os autores propuseram um algoritmo para a segmentação da imagem do isolador no intuito de associar a manifestação UV a regiões de interesse (no caso, cada região correspondendo a uma saia do isolador polimérico), conforme a Figura 3.6. O objetivo da pesquisa, ao segmentar o isolador polimérico em partes de interesse, era detectar a localização exata da manifestação ultravioleta correspondente as descargas corona.

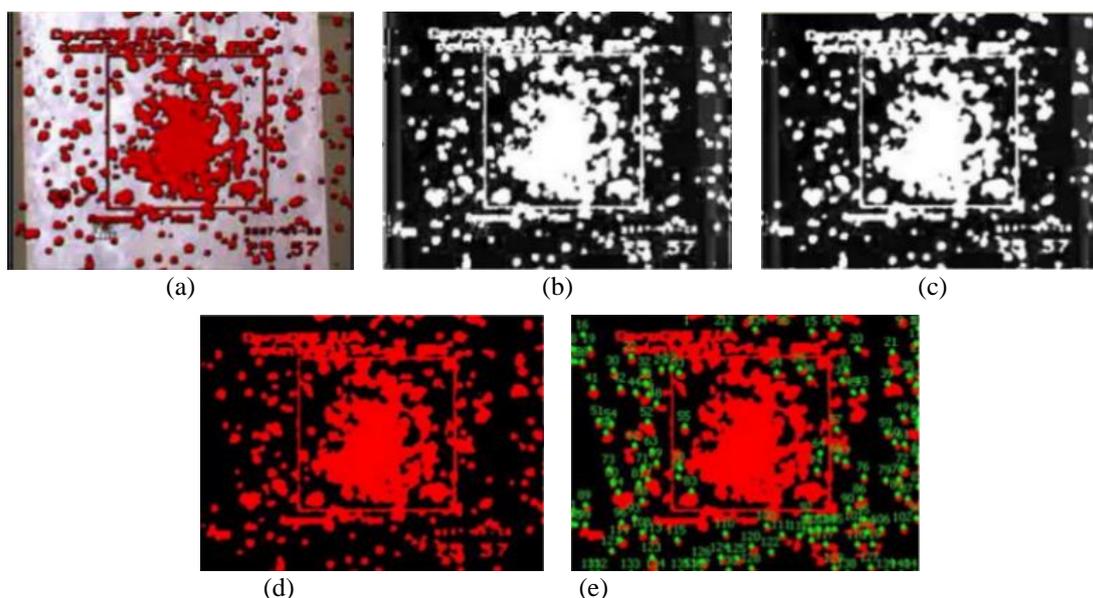
Figura 3.6. Segmentação da imagem do isolador em partes de interesse proposta por Bruce *et al.* (2008). (Fonte: adaptado de Bruce *et al.*, 2008)



Zhou et al. (2009) e **Zhou et al. (2011)** empregaram câmera UV modelo CoroCAM IV+ para registrar as manifestações ultravioletas das descargas corona em eletrodos haste-plano e desenvolveram um algoritmo, baseado em PDI, para extrair atributos das imagens obtidas. Os autores definiram a área de manifestação UV como atributo de caracterização da intensidade de descargas corona ao variar o nível de tensão e a distância entre os eletrodos. Apesar das pesquisas não estarem diretamente voltadas aos isoladores elétrico, ressaltou-se que os atributos de imagem UV podem ser correlacionados a grandezas elétricas e disposições geométricas do ensaio.

A descrição das etapas de aplicação do algoritmo desenvolvido é apresentada na Figura 3.7. A imagem colorida captada pela câmera UV é apresentada na Figura 3.7(a). A imagem UV é convertida em escala de cinza, conforme mostrado na Figura 3.7(b), em seguida, são realizadas as etapas de eliminação de ruído, que resulta na Figura 3.7(c) e binarização, conforme a Figura 3.7(d). Na Figura 3.7(e) é verificada a rotularização das manifestações UV (procedimento para identificar todos os objetos na imagem). A partir do exemplo apresentado pelos autores (Figura 3.7), foi constatada uma falsa segmentação de manifestações UV: a legenda da imagem (com dados relativo *count rate*) e o enquadramento das imagem (retângulo que cobre a parte central da interface do visor da câmera) foram inapropriadamente consideradas como manifestação UV.

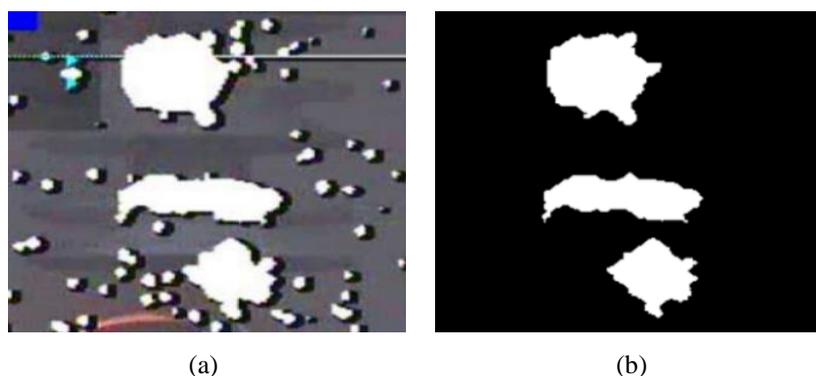
Figura 3.7. Exemplificação das etapas de aplicação do algoritmo de de Zhou et al. (2009). (Fonte: adaptado de Zhou et al., 2009)



Fangcheng et al. (2010) e **Fangcheng et al. (2012)** descrevem que utilizaram uma câmera CoroCAM 504 para captação de descargas corona, convertendo as imagens coloridas obtidas para imagens em escala de cinza. O algoritmo desenvolvido pelos

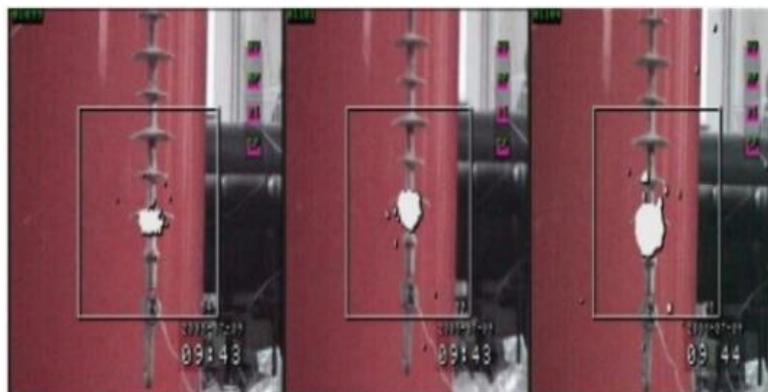
autores considera como descarga corona os píxeis que apresentaram de 80% a 90% de intensidade de luminosidade de manifestação UV. Essa métrica até então não tinha sido descrita na literatura. Os autores descrevem que aplicaram uma etapa de eliminação de ruído, usando filtros morfológicos para eliminar as manifestações consideradas espúrias, suavizar seus contornos e ainda preencher as lacunas que viessem a aparecer dentro da manifestação UV considerada como principal. O resultados obtidos da aplicação do algoritmo na Figura 3.8(a) podem ser vistos na Figura 3.8(b).

Figura 3.8. Imagem (a) captada com CoroCAM 504 e (b) resultado após processamento pelo algoritmo de Fangcheng *et al.* (2010). (Fonte: adaptado de Fangcheng *et al.*, 2010)



Os autores utilizaram a área e o diâmetro das descargas como atributos de interesse, mostrando sua relação com o estado de degradação de cinco isoladores poliméricos, quando submetidos a diferentes níveis de tensão. Na Figura 3.9 são apresentados isoladores ensaiados sob as tensões de 8, 10 e 15 kV e suas respectivas manifestações UV em imagem.

Figura 3.9. Manifestação UV em isoladores submetidos a diversos níveis de tensão. (Fonte: adaptado de Fangcheng *et al.*, 2012)



Os trabalhos de Fangcheng *et al.* (2010) e Fangcheng *et al.* (2012) são marcos na área de monitoramento de radiação ultravioleta de descargas corona empregando algoritmos baseado em PDI. Os autores descrevem de forma mais detalhada que

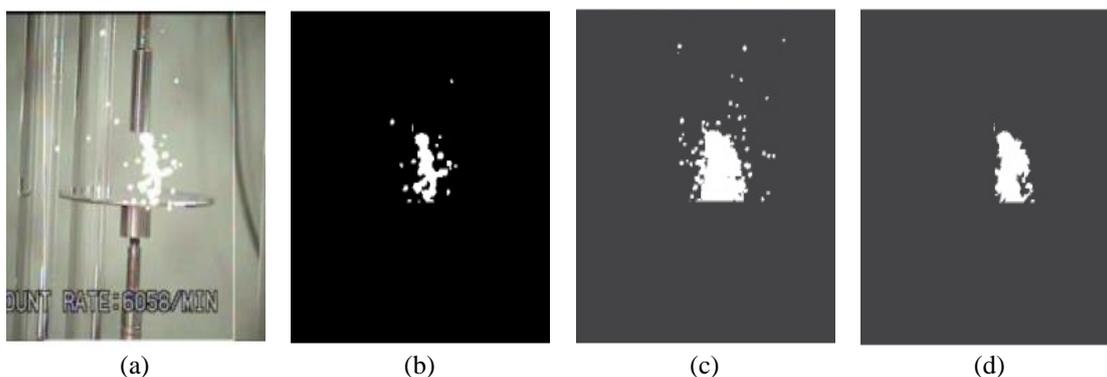
Pinnangudi *et al.* (2005) como desenvolvem o seu algoritmo. A ferramenta serve como importante referência da literatura na extração de atributos de imagens UV.

Barros (2011) realizou ensaio com configuração de eletrodos haste-plano, utilizando a câmera Daycor II. O algoritmo desenvolvido nesta pesquisa processa as imagens obtidas pela câmera UV visando obter a região de ocorrência de manifestação de radiação ultravioleta das descargas coronas em termos de concentração de píxeis, sendo contabilizado o *count rate* e a área da manifestação UV (área chamada pelo autor de concentração de píxeis do corona). No trabalho, ainda foi realizado ensaio com variação do ganho da câmera de detecção UV no intuito de verificar a sensibilidade da câmera a sua variação de ganho. Constatou-se uma região linear de ganho entre 120 e 160, sendo o recomendável para campanhas de medição usando a câmera Daycor II.

Barros (2011) capturou 200 imagens UV durante os ensaios e seu algoritmo selecionou as dez imagens com maior aparição de corona em termos de concentração de píxeis. As manifestações UV das dez imagens foram integralizadas e, da imagem resultante, apenas os píxeis que se manifestaram no mesmo endereço em pelo menos três dos 10 quadros foram caracterizados como descargas corona. O trabalho de Barros (2011) também é um marco na área de monitoramento de radiação ultravioleta de descargas corona com o emprego de algoritmos baseado em PDI. O autor propôs um procedimento para a extração de atributos baseando-se, inicialmente, em 200 imagens.

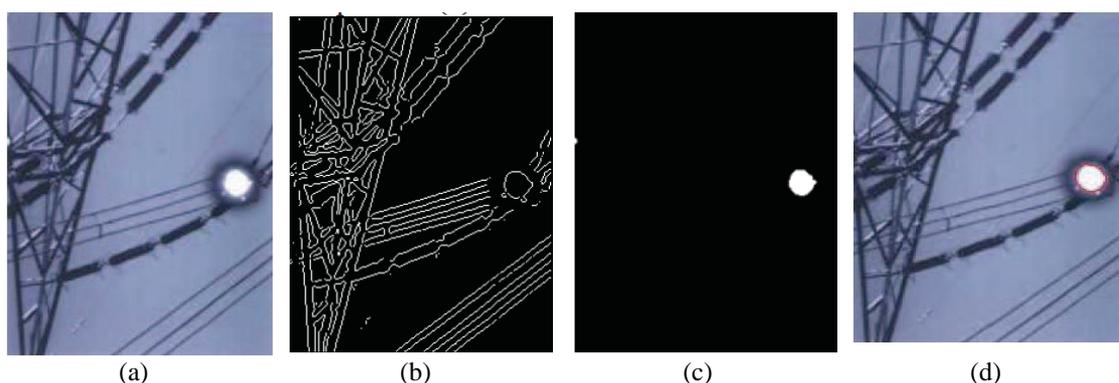
Na Figura 3.10, a aplicação do algoritmo desenvolvido é exemplificado para o experimento de aplicação de tensão à configuração de eletrodos haste-plano. Na Figura 3.10(a) é apresentado o quadro obtido pela câmera UV do experimento seguido, na Figura 3.10(b), pela segmentação da manifestação UV de um quadro. Na Figura 3.10(c) é mostrado o resultado da soma das dez imagens com maior manifestação UV e, na Figura 3.10(d), o resultado do processamento proposto para eliminar o ruído.

Figura 3.10. Exemplificação das etapas do algoritmo de Barros (2011) em experimento de aplicação de tensão em eletrodos haste-plano. (Fonte: adaptado de Barros, 2011)



Li et al. (2011) desenvolveram um algoritmo voltado para detecção de contorno da manifestação UV em imagem de cadeia de isoladores em LT. O algoritmo desenvolvido aplicou operadores de detecção de bordas e de morfologia matemática, considerando as bordas da manifestação UV para calcular a área, em número de píxeis, da descarga corona. Os autores ressaltaram dificuldades da aplicação do algoritmo relacionadas à falsa segmentação de elementos que não compõem a manifestação das descargas corona. Na Figura 3.11, o algoritmo de Li *et al.* (2011) é exemplificado. Na Figura 3.11(a), a imagem captada da cadeia de isoladores em conjunto da manifestação UV é apresentada, na Figura 3.11(b) o resultado da aplicação dos operadores de detecção de borda, na Figura 3.11(c) o resultado da aplicação dos operadores de morfologia matemática e, finalmente, o resultado do processamento é apresentado Na Figura 3.11(d). O algoritmo de Li *et al.* (2011) usa a detecção de borda de forma inovadora para calcular atributos relativos às descargas corona.

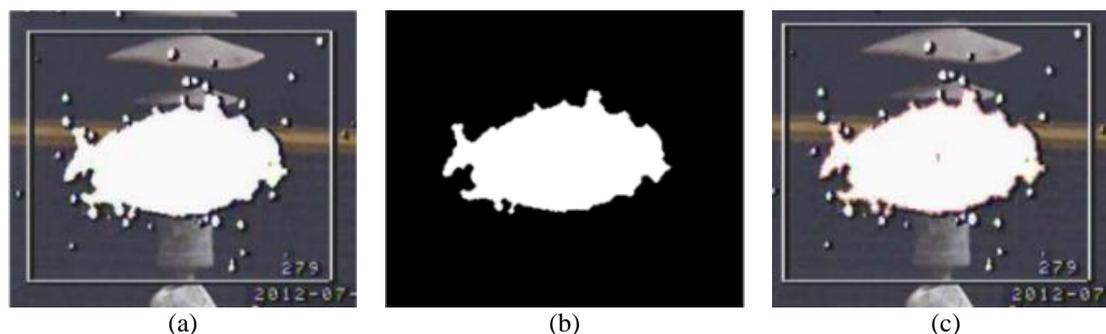
Figura 3.11. Exemplificação das etapas do algoritmo de Li *et al.* (2011). (Fonte: adaptado de Li *et al.*, 2011)



Wang et al. (2014) basearam parte do seu algoritmo de extração de atributos no trabalho de Fangcheng *et al.* (2012) e usaram filtros morfológicos para definir uma manifestação UV principal em isoladores poliméricos. Os autores também desenvolveram um processamento para detectar os contornos (as bordas) da região da manifestação UV. Neste trabalho, os contornos da manifestação UV foram delimitados para selecionar a manifestação principal, ou seja, com maior perímetro.

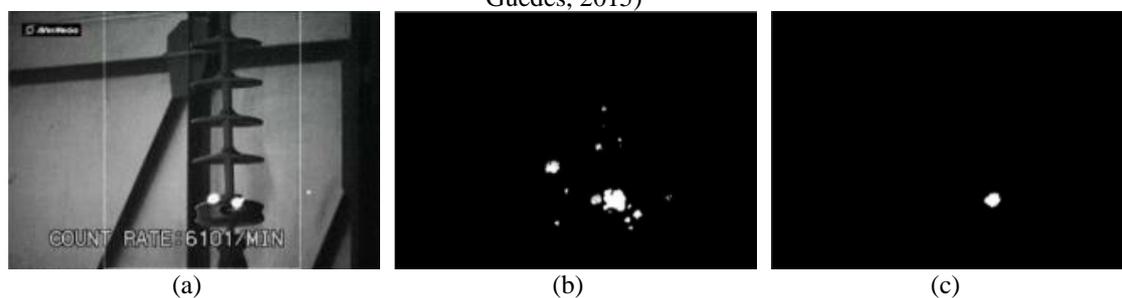
Na Figura 3.12 são apresentadas as etapas do algoritmo desenvolvido para a determinação de descarga e seus contornos. Na Figura 3.12(a) é apresentada a imagem capturada original. Na Figura 3.12(b) é apresentado o resultado da aplicação dos operadores morfológicos de abertura e de fechamento. Na Figura 3.12 (c) é apresentada a imagem da manifestação UV destacando os contornos da manifestação UV. O algoritmo de Wang et al. (2011) é um aperfeiçoamento do algoritmo de Fangcheng *et al.* (2012) .

Figura 3.12. Exemplificação das etapas do algoritmo de Wang *et al.* (2014). (Fonte: adaptado de Wang *et al.*, 2014)



Guedes (2015) ensaiou isoladores poliméricos de 230 kV com diferentes níveis de degradação, utilizando a câmera Daycor II para monitoramento UV. A autora empregou o algoritmo para extração de atributos de Barros (2011), agora voltado para a aplicação em isoladores poliméricos de 230 kV. Na Figura 3.13 são mostradas as etapas de segmentação da manifestação UV realizadas no trabalho de Guedes (2015). Na Figura 3.13(a) é apresentada a imagem obtida em ensaio de isolador polimérico de 230 kV com a câmera UV. Na Figura 3.13(b) é apresentado o resultado da segmentação da manifestação UV e, na Figura 3.13(c), o resultado final após a eliminação de ruído.

Figura 3.13. Exemplificação das etapas do algoritmo usado em Guedes (2015). (Fonte: adaptado de Guedes, 2015)

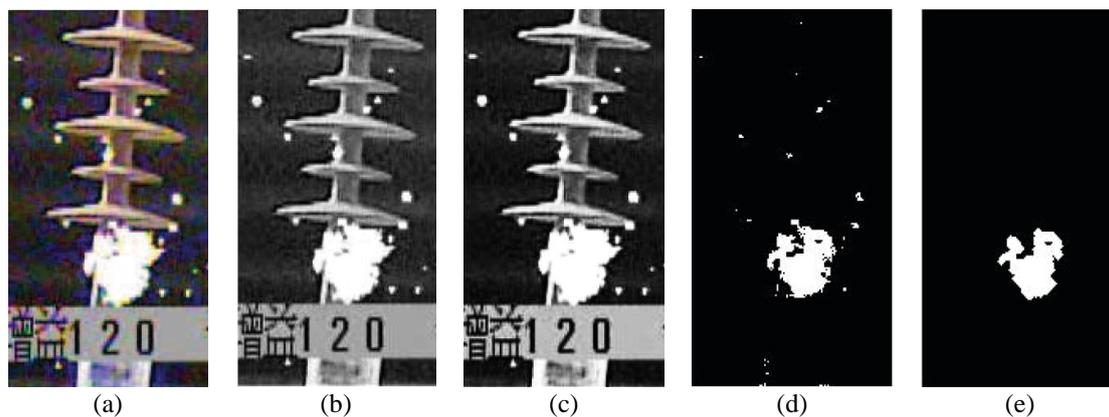


Oliveira Neto *et al.* (2015) desenvolveram um algoritmo que extrai atributos da manifestação ultravioleta correspondente às descargas corona. Os autores foram pioneiros ao considerar a persistência da manifestação UV ao longo do tempo. Eles também calculam, com o seu algoritmo, as distância da manifestação UV às áreas consideradas críticas do isolador polimérico. Os autores avaliaram quatro casos distintos de ocorrência de corona nos isoladores poliméricos e indicaram que a avaliação conjunta dos atributos poderia ser utilizada para tomada de decisão sobre o diagnóstico do componente. Os autores apresentaram um critério para eliminação de ruído arbitrário, similar ao de Barros (2011), considerando descarga corona apenas os píxeis cuja aparição de manifestação UV fosse de pelo menos 33,3% do total quadros analisados.

O trabalho explicita a necessidade de trabalhar com vários quadros de vídeo UV, ressaltando a importância da persistência das manifestações UV como um atributo relevante. O autor dessa Tese é um dos coautores deste trabalho.

Zhang *et al.* (2016) captaram imagens UV de isoladores poliméricos usando a câmera Daycor Superb UV. O algoritmo desenvolvido na pesquisa calculou a área da manifestação UV a partir de imagens obtidas no sistema RGB, ressaltando que este atributo é obtido de forma relativamente fácil e que tem potencial para caracterizar às descargas corona nos isoladores poliméricos. O algoritmo de Zhang *et al.* (2016) é exemplificado na Figura 3.14. Na Figura 3.14(a) é apresentada a figura obtida com a câmera UV, na Figura 3.14(b) a imagem é convertida em escala de cinza, na Figura 3.14(c), tem seu contraste ressaltado. Na Figura 3.14(d) a imagem é binarizada (ou seja, convertida em preto e branco) e, finalmente, na Figura 3.14(e), a imagem passa pelos operadores morfológicos. A partir da Figura 3.14(e), a área da manifestação UV é calculada e analisada com atributo de área.

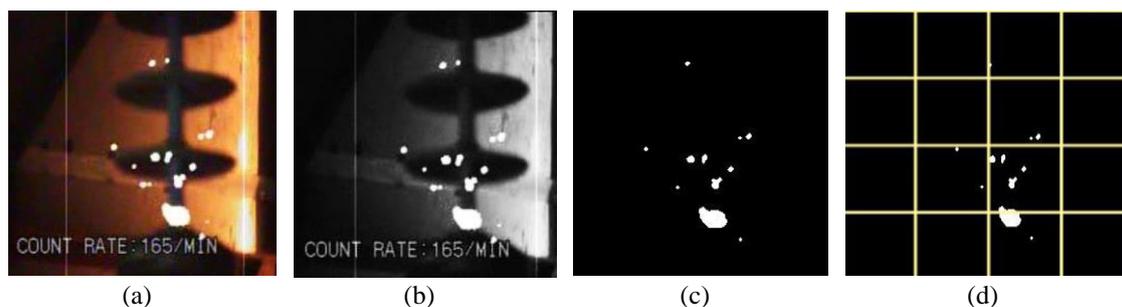
Figura 3.14. Exemplificação das etapas do algoritmo de Zhang *et al.* (2016). (Fonte: adaptado de Zhang *et al.*, 2016)



Ribeiro (2017) buscou classificar de isoladores poliméricos desenvolvendo um algoritmo que calcula os atributos de estimativa de píxeis (como a autora chamou área da manifestação UV), persistência e distância das manifestações UV ao núcleo do isolador. No algoritmo desenvolvido pela autora, os atributos foram calculados dividindo-se a imagem obtida em 16 partes iguais. O atributo que a autora chama de persistência foi calculado considerando o somatório de píxeis dentro de cada uma das 16 partes da imagem de aproximadamente 600 quadros. Esta persistência, calculada dessa maneira, não apresenta relação direta com área da manifestação UV. O trabalho de Ribeiro (2017) reforça uma tendência na pesquisa no tema em analisar um número consideravelmente alto de quadros dos vídeos UV.

Na Figura 3.15, as etapas do algoritmo de Ribeiro (2017) são exemplificadas. Na Figura 3.15 (a) é apresentada imagem obtida pela câmera UV, na Figura 3.15(b) é apresentada a conversão da imagem em escala de cinza, seguido, Figura 3.15(c), pelo processamento da imagem binarizada. Na Figura 3.15(d) é explicitada a divisão em 16 partes de interesse para o cálculo dos atributos citados.

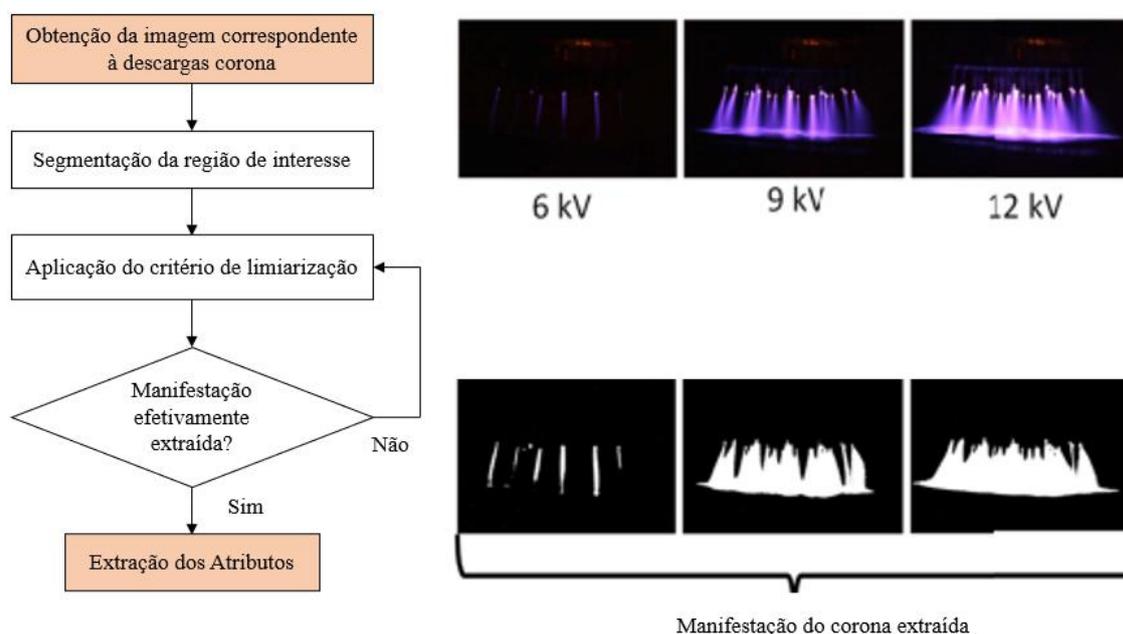
Figura 3.15. Exemplificação das etapas do algoritmo de Ribeiro (2017). (Fonte: adaptado de Ribeiro., 2017)



Brito (2017) propôs uma metodologia para o aprimoramento da classificação de isoladores poliméricos baseada em um algoritmo de extração de atributos de imagens UV. O trabalho se concentrou na apresentação de um algoritmo desenvolvido baseado de PDI, com vistas à extração de atributos da imagem UV. O autor apresentou uma análise de sensibilidade dos atributos em relação à quantidade de quadros a serem processados no vídeo UV e o limite de ruído a ser considerado (por limiarização) dentro do intervalo de pixels da manifestação UV. Brito (2017) apresenta como atributos: área, perímetro, fator de forma, persistência e distâncias até partes de interesse do isolador polimérico.

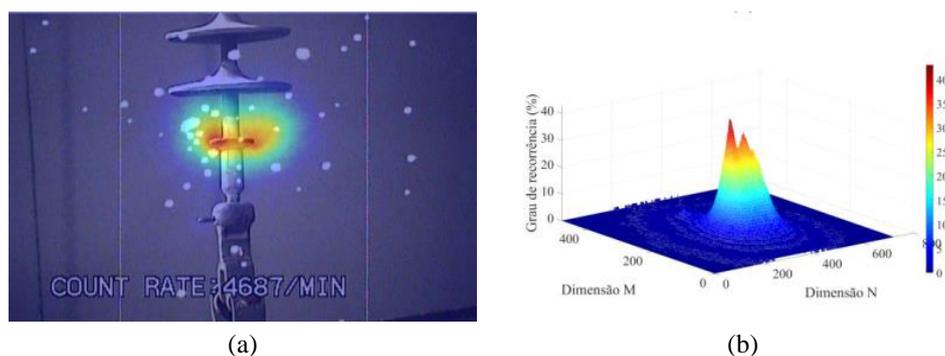
Prasad & Reddy (2017) apresentaram um algoritmo para analisar as descargas corona em uma configuração de eletrodos com múltiplas pontas. A partir dos dados relativos à iluminância das descargas corona, os autores estimaram a energia proveniente do efeito. Ressalta-se que os dados são calculados considerando os parâmetros dos sensores das câmeras utilizadas (que não são câmeras UV). Os autores buscaram evidenciar a relação entre as informação de energia das descargas corona com atributos das imagens obtido, ressaltando o potencial do algoritmo em caracterizar o fenômeno elétrico. O fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 3.16.

Figura 3.16. Fluxograma das etapas do algoritmo de Prasad & Reddy (2017). (Fonte: adaptado de Prasad & Reddy, 2017)



Florentino (2019) desenvolveu um método de avaliação das condições operacionais de isoladores poliméricos com foco na caracterização das descargas corona usando atributos extraídos de imagens ultravioletas, para isso utilizou imagens UV captadas com a câmera Daycor II. O autor apresentou um processamento inovador para obter o mapa de persistência da manifestação ultravioleta correspondente às descargas corona. O uso do mapa de persistência possibilitou estimar a área da manifestação UV, localizando as regiões de maior ocorrência de descargas corona na imagem e estimando a persistência baseada no cálculo da taxa de recorrência normalizada. Na Figura 3.17, um mapa de persistência após a integralização da manifestação UV é apresentado (a) sobre o isolador e (b) tridimensionalmente, em que o grau de recorrência é relativo à persistência da manifestação UV ao longo do tempo. O algoritmo desenvolvido por Florentino (2019) é baseado em Brito (2017).

Figura 3.17. Mapa de persistência apresentado por Florentino (2019). (Fonte: Florentino, 2019)



A seguir são apresentadas as considerações sobre a pesquisa no tema.

3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PESQUISA NO TEMA

A partir da revisão bibliográfica foi constatado que os algoritmos para extração de atributos de imagens UV são apresentados, ao longo do tempo, como uma proposta de caracterização para os equipamentos de alta tensão. Entretanto, de modo geral, os critérios apresentados são pouco objetivos ou, ainda, são estabelecidos a partir de métricas arbitrárias, sem referências prévias.

Assim, a partir da análise dos algoritmos existentes para extração de atributos referentes ao efeito corona em sistemas de alta tensão, foram determinados os atributos de vídeos UV que influenciam na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos de alta tensão.

Para os isoladores elétricos, a **área** correspondente à manifestação ultravioleta nas imagens tem sido utilizada como atributo principal. A área é calculada a partir da soma dos píxeis correspondentes à descarga corona na imagem obtida pela câmera UV, seja de forma absoluta (PINNANGUDI *et al.*, 2005; LI *et al.*, 2011, PRASAD & REDDY, 2017) ou de forma relativa (em relação às dimensões da imagem capturada em vídeo) (ZHOU *et al.*, 2011). Antes do atributo de área da manifestação UV, em si, ser calculado no algoritmos apresentados, são aplicadas etapas de filtragem de ruído por limiarização (BARROS, 2011; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2015; BRITO, 2017; XUEWEN *et al.*, 2017) ou por operações de morfologia matemática (LI *et al.* 2011; 2011; FANGCHENG *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2016). Essas pesquisas enfatizam a relevância da área da manifestação UV na análise de vídeos UV para caracterização e classificação do estado operacional de isoladores. No entanto, quando usado de forma exclusiva, não permite a consideração de outros atributos relevantes, como o formato da manifestação UV ou sua persistência ao longo do vídeo.

As pesquisas que calculam atributos relacionados ao **formato** da manifestação UV consideram ou o raio (PINNANGUDI *et al.*, 2005; FANGCHENG *et al.*, 2012) ou o diâmetro (SHONG *et al.*, 2007) da manifestação ultravioleta, ignorando, ou não explicitando, que a manifestação ultravioleta da descarga corona não tem necessariamente um formato circular, limitando o uso desses atributos. Esta limitação

pode ser contornada por um fator de forma genérico, sendo função da área e do perímetro da manifestação UV (BRITO, 2017).

Os atributos relacionados à taxa de recorrência da manifestação UV também devem ser considerados ao longo do tempo, ou seja, no que diz respeito à sua **persistência** no vídeo UV. Vale ressaltar que os pesquisadores (BARROS, 2011; GUEDES, 2015; JIN *et al.*, 2017; PRASAD & REDDY, 2017) utilizaram a taxa de recorrência aplicando métricas arbitrárias, sem considerar a influência de todos os quadros dos vídeos UV e sem considerar a persistência como atributo, possivelmente, mais representativo na caracterização das descargas corona em isoladores elétricos.

Outra abordagem que ainda não foi devidamente explorada na literatura é a relevância dos atributos relativos a **distância das manifestações** mais intensas de descarga corona a regiões específicas do componente de alta tensão. Apesar de existir trabalhos que fazem a segmentação do componente em partes de maior relevância (BRUCE *et al.*, 2008; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2015; BRITO *et al.*; 2017), as pesquisas ainda não fizeram análises quantitativas sobre como estes atributos podem auxiliar a caracterização do estado operacional de componentes de alta tensão.

Nesta perspectiva, pretende-se, como continuidade da pesquisa no tema, desenvolver um algoritmo eficaz e inovador na extração de atributos de vídeos UV.

A seguir são apresentados os autores das pesquisas elencados em um quadro sinóptico.

3.3 QUADRO SINÓPTICO DAS PESQUISAS NO TEMA

As pesquisas no tema serviram como base para o desenvolvimento desta Tese e são elencadas a partir de suas diferenciações científicas na Tabela 3.1. Destacam-se, nos trabalhos:

- (1) Estabelecimento de um conjunto de atributos de vídeos UV que influenciam na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.
- (2) Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI para caracterizar componentes de alta tensão a partir de imagens UV.
- (3) Estabelecimento de correlação entre as imagens ultravioletas e o estado operacional de isoladores poliméricos.

- (4) Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI com extração de atributo relacionado à persistência da manifestação UV em um número considerável de quadros do vídeo UV.
- (5) Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI com extração de atributo relacionado às distâncias da manifestação UV às regiões de interesse no isolador polimérico.

Destaca-se que esta Tese é o único trabalho que atende a todas as diferenciações científicas apresentadas, desenvolvendo de um algoritmo que caracteriza as descargas corona e auxilia à tomada de decisão com relação ao estado operacional dos isoladores poliméricos, conseqüentemente contribuindo para tornar o sistema elétrico de potência mais eficiente e seguro.

Tabela 3.1. Diferenciações científicas das pesquisas da revisão bibliográfica. (Fonte: autoria própria)

Ano	Pesquisadores	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
2002	Bologna <i>et al.</i>			✓		
2002	Pinnangudi <i>et al.</i>	✓	✓	✓		
2007	Shong <i>et al.</i>	✓	✓	✓		
2008	Bruce <i>et al.</i>			✓		✓
2009	Zhou <i>et al.</i>	✓	✓			
2010	Fangcheng <i>et al.</i>	✓	✓	✓		
2011	Barros	✓	✓		✓	
2011	Li <i>et al.</i>		✓	✓		
2014	Wang <i>et al.</i>	✓	✓	✓		
2015	Guedes	✓	✓	✓	✓	
2015	Oliveira Neto <i>et al.</i>	✓	✓	✓		✓
2016	Zhang <i>et al.</i>	✓	✓	✓		
2017	Brito	✓	✓	✓		✓
2017	Ribeiro	✓	✓	✓	✓	
2017	Prasad & Reddy	✓				
2019	Florentino	✓	✓	✓	✓	
2021	Brito (Esta Tese)	✓	✓	✓	✓	✓

- (1) Estabelecimento de um conjunto de atributos de vídeos UV que influenciam na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.
- (2) Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI para caracterizar componentes de alta tensão a partir de imagens UV.
- (3) Estabelecimento de correlação entre as imagens ultravioletas e o estado operacional de isoladores poliméricos.
- (4) Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI com extração de atributo relacionado a persistência da manifestação UV em um número considerável de quadros do vídeo UV.
- (5) Desenvolvimento de um algoritmo baseado em PDI com extração de atributo relacionado as distâncias da manifestação UV às regiões de interesse no isolador polimérico.

3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, as pesquisas relacionadas ao tema desenvolvido nesta Tese foram apresentadas. As pesquisas pioneiras e o estado da arte foram explorados, seguido das considerações sobre a pesquisa no desenvolvimento de algoritmos para extração de atributos de imagens UV. O capítulo foi finalizado com a apresentação do quadro sinóptico comparativo entre as pesquisas realizadas na área, destacando suas contribuições e, ainda, destacando o desenvolvimento de um algoritmo que caracteriza as descargas corona e auxilia à tomada de decisão com relação ao estado operacional dos isoladores poliméricos nesta Tese.

No próximo capítulo, a metodologia do trabalho é apresentada.

4 METODOLOGIA

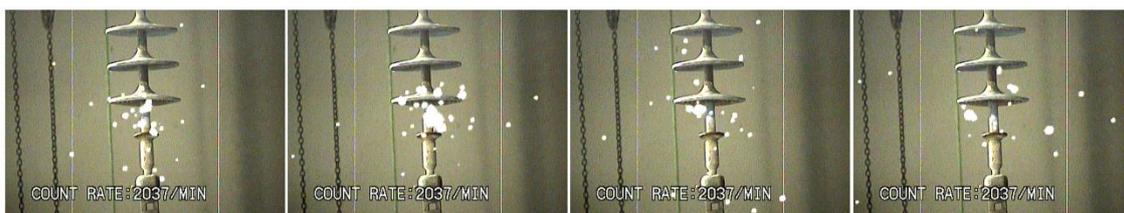
No capítulo de Metodologia são descritos o **material** utilizado e os **métodos** empregados para atingir os objetivos propostos na Tese. O capítulo está organizado em três seções: Material, Metódos e Síntese do Capítulo. A maior seção (relativa aos Métodos) está organizada em três subseções: Captação dos Vídeos UV por Ensaio de Aplicação de Tensão, Desenvolvimento do Algoritmo de Extração de Atributos e Proposta de Análise dos Atributos dos Vídeos UV. Na última seção, a síntese do capítulo é apresentada.

4.1 MATERIAL

O material utilizado para o desenvolvimento do trabalho são vinte e cinco **vídeos UV** captados com uma câmera sensível às emissões na faixa de frequência do ultravioleta. Os vídeos UV foram registrados durante ensaios de aplicação de tensão nominal em cinco isoladores poliméricos de 230 kV, sendo eles: um isolador novo, um isolador com trilhamento e erosão no núcleo, um isolador com corrosão da ferragem terminal, um isolador com rachaduras em seu revestimento e um isolador com erosão e exposição do núcleo de fibra de vidro. Os isoladores poliméricos ensaiados em laboratório foram gentilmente cedidos à pesquisa pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF).

Os vídeos captados com a câmera UV foram tratados a partir do conjunto de seus quadros. Na Figura 4.1, como exemplo, são apresentados alguns quadros de um vídeo UV. Os vídeos são captados na faixa de luz visível (para registrar o isolador) e na faixa da radiação ultravioleta (para registrar a manifestação UV).

Figura 4.1. Quadros de um vídeo UV captado durante ensaio de aplicação de tensão. (Fonte: autoria própria)



A câmera UV utilizada para a captação dos vídeos durante os ensaios de aplicação de tensão é do modelo **Daycor II**, fabricada pela *Ofil Systems*. A câmera possui uma resolução temporal de aproximadamente 30 fps. Para registrar os vídeos em um computador portátil, foi necessário a utilização de uma placa de captura de vídeo. O registro dos quadros foi realizado no sistema colorido RGB (resolução de bits de 24 bits) e resolução espacial de 720×480 . Na Figura 4.2, uma fotografia da câmera utilizada é apresentada.

Figura 4.2. Fotografia da câmera Daycor II fabricada pela *Ofil Systems*. (Fonte: Barros, 2011)



A seguir, os métodos que compõem a metodologia do trabalho são apresentados.

4.2 MÉTODOS

Os métodos empregados são descritos de modo a garantir a reprodutibilidade do trabalho, além de facilitar a compreensão dos resultados obtidos. De maneira geral, os métodos foram divididos em três etapas:

- i. Captação dos vídeos UV por meio de ensaios de aplicação de tensão nominal;
- ii. Desenvolvimento do algoritmo de extração de atributos dos vídeos UV baseado em PDI;
- iii. Proposta de análise dos atributos dos vídeos UV.

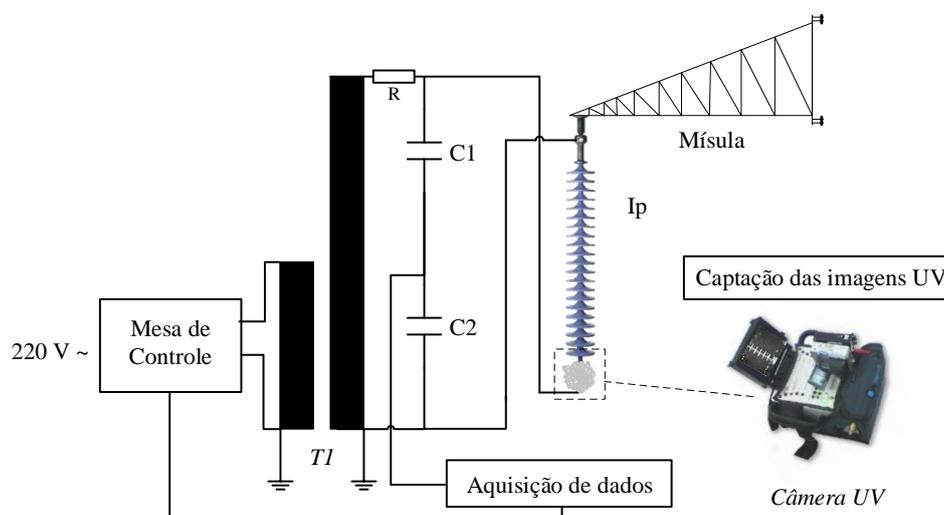
4.2.1 CAPTAÇÃO DOS VÍDEOS UV POR ENSAIOS DE APLICAÇÃO DE TENSÃO

O objetivo da captação dos vídeos UV por meio de ensaios de aplicação de tensão é formar um banco de dados apropriado para posterior tratamento da informação. As captações dos vídeos foram realizadas no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os procedimentos para as captações foram norteados pelo documento intitulado: **Guia para Monitoramento de Radiação Ultravioleta em Componentes de Alta Tensão sob Ensaios de Laboratório e Medições em Campo**. O documento (que é um subproduto desta Tese) consiste em um guia detalhado das etapas necessárias para registrar os vídeos UV de maneira segura e eficiente. O guia segue anexo à Tese.

Para o ensaio de aplicação de tensão foi montado um arranjo experimental conforme a configuração apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3. Configuração do arranjo experimental para o ensaio de aplicação de tensão e captação com câmera UV. (Fonte: adaptado de Florentino, 2015)



O arranjo é constituído de uma mesa de controle responsável por controlar os níveis de tensão no isolador polimérico I_p com o auxílio do divisor de tensão capacitivo C_1 e C_2 e da aquisição de dados. O transformador TI , de $600\text{ kV} / 600\text{ kVA}$, é alimentado por uma subestação externa que possibilita a elevação de tensão para os níveis adequados ao experimento. Suspenso pela mísula, o isolador polimérico é submetido à tensão fase-terra nominal ($230/\sqrt{3}\text{ kV}$) e é monitorado pela câmera UV. Além disso, o arranjo experimental conta ainda com um resistor limitador de corrente R . A câmera UV foi posicionada a 10 metros do objeto de teste com ganho de 150 (BARROS, 2011).

Após iniciar o ensaio, foram preparados os procedimentos de segurança, a adequação do material, o registro em ata das condições de ensaio e a parametrização da câmera UV. Em seguida, após energizar e estabilizar o circuito, duas captações de vídeos foram realizadas: uma **sem** a radiação UV (ou seja, na faixa de luz visível), com aproximadamente 10 segundos de duração, e outra **com** a radiação UV, com aproximadamente 60 segundos de duração. Os vídeos foram avaliados, com relação a sua

conformidade, e o circuito foi desenergizado. A finalização do ensaio foi realizada guardando o material utilizado e removendo os equipamentos de proteção coletiva e individual. Os procedimentos descritos são sintetizados pelo fluxograma da Figura 4.4.

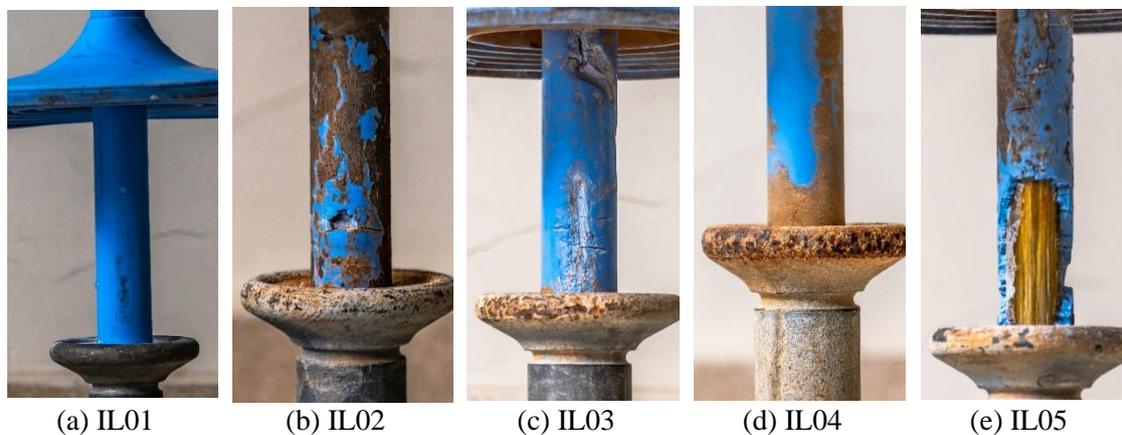
Figura 4.4. Fluxograma dos procedimentos adotados em laboratório para captação de vídeos UV em ensaios de aplicação tensão. (Fonte: autoria própria)



Os ensaios de aplicação de tensão foram realizados em isoladores da classe de tensão de 230 kV. As regiões dos isoladores poliméricos ensaiados são identificados com relação ao seu estado de degradação. As regiões apresentadas na Figura 4.5 são as partes inferiores do isolador tendo em vista que a concentração de campo elétrico nessa parte é maior e, conseqüentemente, há uma probabilidade também maior de geração de descargas corona. Na Figura 4.5 há (a) um isolador novo, (b) um isolador que apresenta trilhamento e erosão, (c) um isolador com corrosão da ferragem terminal, (d) um isolador com rachaduras em seu revestimento e (e) um isolador com erosão e exposição do núcleo de fibra de vidro. Na legenda da Figura 4.5 é apresentada a identificação adotada para cada isolador. Observa-se ainda que a filmagem realizada com a câmera UV é feita com o

cuidado de posicionar as partes mais críticas dos defeitos dos isoladores em direção a captura da câmera.

Figura 4.5. Regiões dos isoladores utilizados (a) novo e com os defeitos de (b) de rachaduras, (c) trilhamento e erosão, (d) de corrosão da ferragem terminal e (e) de erosão com exposição do núcleo. (Fonte: autoria própria)



Concluído o procedimento de captação de vídeos UV por ensaios de aplicação de tensão, o desenvolvimento do algoritmo de extração de atributos é apresentado a seguir.

4.2.2 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

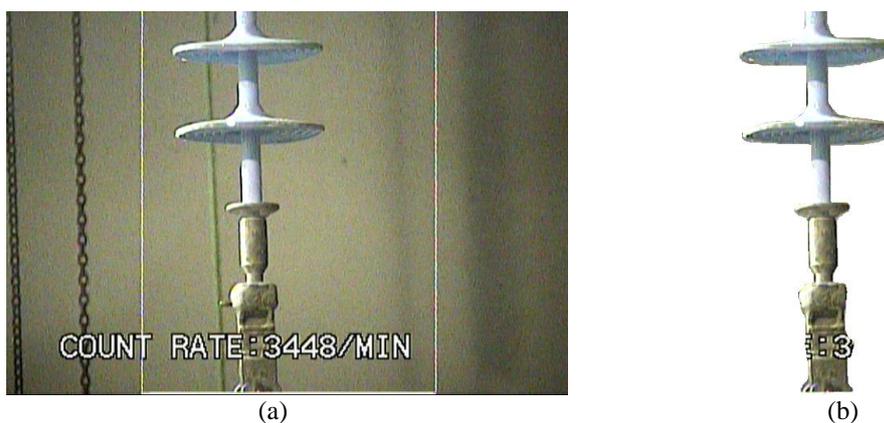
Após formar um banco de dados apropriado com os vídeos UV, torna-se necessário desenvolver um algoritmo de extração de atributos baseado em PDI com objetivo de obter informações relevantes para a caracterização dos isoladores poliméricos.

O algoritmo deve adequar os quadros captados e calcular atributos relativos ao isolador filmado. Assim, para **adequação dos quadros dos vídeos UV**, aplicou-se ferramentas de PDI para segmentar o formato do isolador e para segmentar a manifestação de radiação UV em cada quadro do vídeo UV. Em seguida, foram realizadas a integralização de todos quadros do vídeo e a eliminação de ruído, por limiarização e por operações de morfologia matemática. Para o **cálculo de atributos**, utilizou-se a imagem integralizada e sem ruídos para a extração de: estimativa de área, área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma, persistência e distâncias as partes de interesse do isolador polimérico.

4.2.2.1 Segmentação do formato do isolador e da manifestação UV dos quadros do vídeo UV.

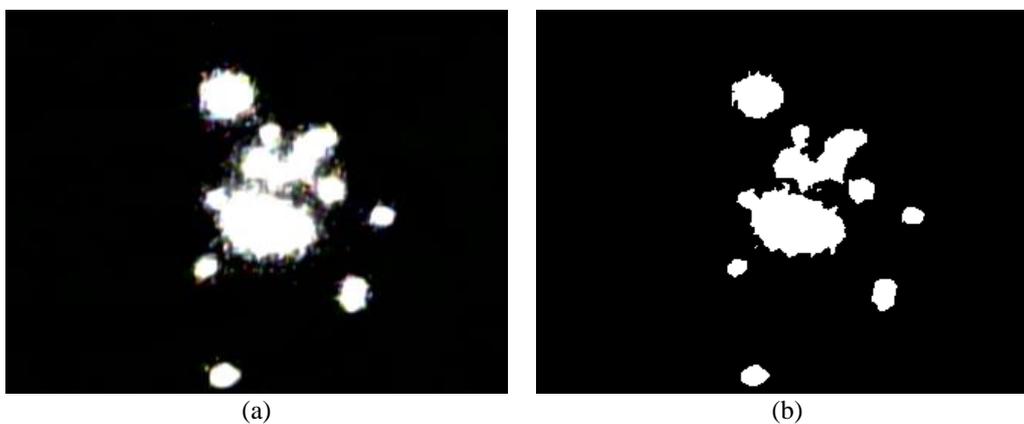
A partir do vídeo captado na **faixa espectral da luz visível**, foi possível realizar a segmentação do formato do isolador polimérico, utilizando um dos quadros. A segmentação foi realizada de forma semiautomática conjuntamente com o critério de Otsu para eliminar o plano de fundo da imagem. A exemplificação do procedimento é apresentada Figura 4.6. Na Figura 4.6(a), o quadro original do vídeo de um isolador polimérico é apresentado, e, após segmentar o conteúdo relevante (o formato do isolador) do fundo do quadro, obtém-se a imagem apresentada na Figura 4.6(b).

Figura 4.6. Quadro do vídeo do isolador polimérico (a) original e (b) após a segmentação de seu formato. (Fonte: autoria própria)



Para realizar a segmentação da manifestação UV das descargas corona nos quadros do vídeo captado na **faixa espectral do ultravioleta**, foi aplicado exclusivamente o critério de limiarização de Otsu. Ressaltando que para garantir os 60 segundos de captação foi realizada a segmentação em 1800 quadros. A exemplificação do procedimento para um dos quadros é apresentada na Figura 4.7. Na Figura 4.7(a) é apresentado o quadro original com a manifestação da radiação UV e o resultado do processamento realizado para segmentar a manifestação UV é mostrado na Figura 4.7(b)

Figura 4.7. Quadro da manifestação UV (a) original e (b) após a sua segmentação. (Fonte: autoria própria)



A etapa de segmentação da manifestação UV de cada quadro do vídeo é a que mais demanda esforço computacional no algoritmo desenvolvido. Considerando a resolução espacial (720×480), a resolução temporal (aproximadamente de 30 fps) e a duração (60 segundos), o processamento de um único vídeo opera com, no mínimo, 620 milhões de píxeis, contabilizando bilhões de operações.

Conjuntamente com a segmentação das manifestações UV, é calculada a área correspondente a manifestação UV para cada quadro do vídeo, conforme (4.1):

$$\text{ÁreaUV}_q = \sum \text{Píxeis de manifestação UV no quadro } q, \quad (4.1)$$

em que ÁreaUV_q é o valor da área de manifestação UV em um quadro q . A área é contabilizada a partir do somatório de todos os píxeis correspondentes à manifestação de radiação ultravioleta na imagem. Tomando a Figura 4.6(b) como exemplo, seria a contagem de todos os píxeis de cor branca da imagem. Para cada quadro do vídeo UV, obtem-se um valor de ÁreaUV . Em um vídeo de duração de 60 segundos e resolução temporal de 30 fps são 1800 valores de ÁreaUV . Mais à frente, esta informação será utilizada para compor o atributo chamado de estimativa de área.

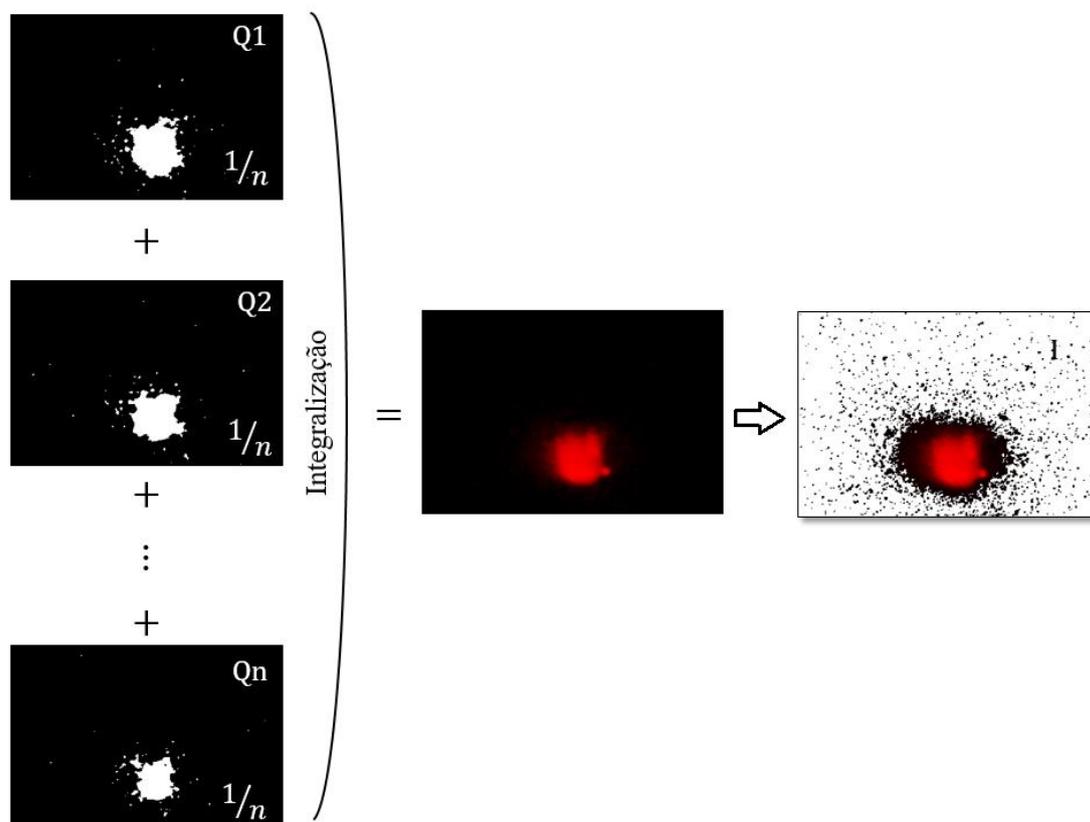
4.2.2.2 Integralização da manifestação UV relativa a todos os quadros do vídeo UV.

A etapa subsequente a segmentação das manifestações de radiação UV consiste na **integralização** das informações obtidas em uma única imagem. A integralização consiste na soma da influência das manifestações UV todos os quadros, conforme (4.2):

$$\mathbf{I} = \frac{(\mathbf{Q1} + \mathbf{Q2} + \dots + \mathbf{Qn})}{n}, \quad (4.2)$$

em que \mathbf{I} é a imagem integralizada resultante, n é o número de quadros utilizados na integralização e \mathbf{Qn} é o n -ésimo quadro do vídeo. Para os vídeos utilizados neste trabalho $n = 1800$. A representação da integralização é exemplificada na Figura 4.8, destacando-se, na imagem da direita, uma imagem com o fundo branco para todos os píxeis que não apresentaram manifestação de descargas UV.

Figura 4.8. Representação da integralização dos quadros de um vídeo UV. (Fonte: autoria própria)



Na Figura 4.8, cada quadro contribui com um peso de $1/n$ para composição da imagem integralizada. Destaca-se que o resultado obtido do processamento é uma imagem que incorpora toda a manifestação de radiação UV presente no vídeo captado. A proposta de integralização, tal qual descrita aqui, é inovadora na literatura, sendo uma ferramenta eficiente de adequação de imagens.

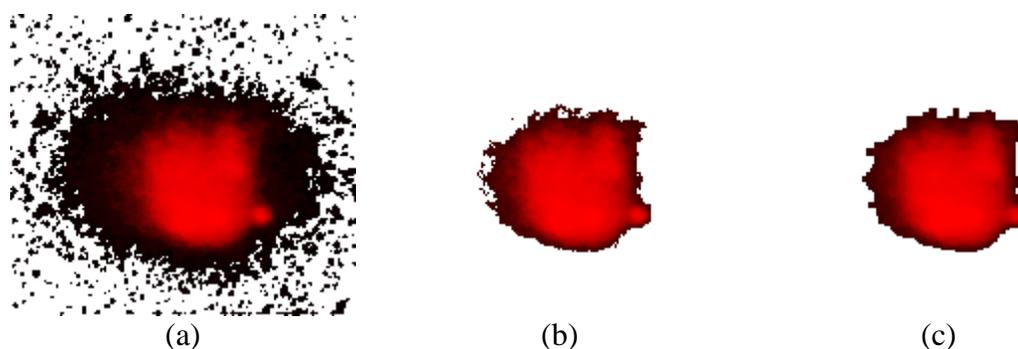
4.2.2.3 Eliminação de ruído da imagem integralizada

A etapa de **eliminação de ruído** possui dois procedimentos baseados em PDI, o primeiro é a aplicação de limiarização e o segundo é a aplicação de operações de morfologia matemática. A **limiarização** é responsável por eliminar a manifestação UV com aparição menor que um limite estabelecido no total de quadros do vídeo. O limite é determinado em função da estimativa de área e da área integralizada. Os dois atributos serão apresentados em detalhes no tópico subsequente. O critério para estabelecer o limite de limiarização é garantir que a imagem integralizada e sem ruídos possua o atributo de

área integralizada o mais próximo do valor de estimativa de área. Após aplicar o critério de limiarização, emprega-se operações de **morfologia matemática** para a remoção básica de ruído. As operações de remoção de ruídos fecha furos e fissuras na manifestação UV e elimina os pequenos objetos considerados espúrios na imagem integralizada.

Na Figura 4.9 os procedimentos de remoção de ruídos são exemplificados. Na Figura 4.9(a), uma imagem integralizada é apresentada, em seguida, na Figura 4.9(b) é apresentado o resultado da manifestação UV integralizada e sem ruídos referente à limiarização e finalmente, na Figura 4.9(c), a manifestação UV integralizada, sem ruído, com as bordas suavizadas pelo uso de operações de morfologia matemática é apresentada.

Figura 4.9. Exemplificação da eliminação de ruído a partir da (a) imagem integralizada, seguida da (b) limiarização e de (c) operações de morfologia matemática. (Fonte: autoria própria)



4.2.2.4 Cálculo de atributos da imagem integralizada e sem ruídos

Com as informações obtidas até então, é possível calcular os atributos: estimativa de área, área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma e persistência relativa.

Para a **estimativa de área**, é calculada a razão entre o somatório das área de cada quadro (ÁreaUV) e o número total de quadros, conforme (4.3):

$$\text{Estimativa de Área} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \text{ÁreaUV}_q. \quad (4.3)$$

A área integralizada e o perímetro integralizado são calculados a partir da imagem integralizada e sem ruído, conforme apresentado na Figura 4.9(c).

Para o cálculo da **área integralizada**, uma varredura na imagem integralizada e sem ruído é feita e, utilizando um contador, é determinado o número de píxeis correspondente à manifestação UV, conforme (4.4):

$$\text{Área integralizada} = \sum \text{Píxeis de manifestação UV}. \quad (4.4)$$

Para o cálculo do **perímetro integralizado** da manifestação UV é necessário estabelecer quais píxeis são correspondentes às bordas da manifestação UV na imagem integralizada, analisando-se a vizinhança por conectividade n-8 de cada píxel, conforme apresentado na Figura 4.10.

Figura 4.10. Representação da (a) manifestação UV integralizada e sem ruído e das (b) bordas detectadas na vizinhança de conectividade n-8. (Fonte: autoria própria)



Depois de varrer toda a imagem e definir todos os píxeis de borda, faz-se uma nova varredura, utilizando um contador, obtendo dessa maneira o perímetro integralizado da manifestação UV em número de píxeis, conforme (4.5):

$$\text{Perímetro integralizado} = \sum \text{Píxeis de borda UV.} \quad (4.5)$$

Em seguida, é calculado o **fator de forma**. O atributo é dado como a relação entre a área integralizada e o perímetro integralizado. O atributo é calculado para diferenciar as manifestações UV do mesmo tamanho (mesma área), mas com formatos diferentes, conforme (4.6):

$$\text{Fator de Forma} = \frac{\text{Área integralizada}}{\text{Perímetro integralizado}}. \quad (4.6)$$

O cálculo de persistência absoluta é desenvolvido para determinar a constância da manifestação UV durante o vídeo. Analogamente ao cálculo da área, é realizada uma varredura para identificar os píxeis correspondentes à manifestação UV, em que o contador registra o valor de cada píxel (nível de bit na camada vermelha no sistema RGB), conforme (4.7):

$$\text{Persistência absoluta} = \sum \text{Valor dos píxeis de manifestação UV.} \quad (4.7)$$

Conhecendo o valor da persistência absoluta e da área da manifestação UV em questão, é possível determinar a **persistência relativa** como sendo a relação entre a persistência absoluta e a área integralizada, conforme (4.8):

$$\text{Persistência relativa} = \frac{\text{Persistência absoluta}}{\text{Área integralizada}}. \quad (4.8)$$

Os atributos de área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma e persistência relativa estão diretamente relacionados a imagem integralizada e sem ruídos. O cálculo desses atributos é relativamente similar ao que vem ser feito na literatura até então. Entretanto, o grande diferencial parte da forma inovadora de sintetizar a manifestação UV ao longo do vídeo (e conseqüentemente as descargas corona) em uma única imagem.

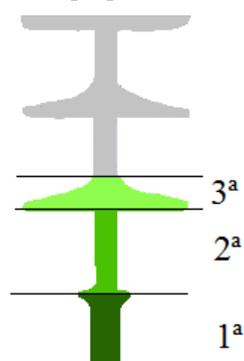
4.2.2.5 *Cálculo de atributos relacionados às distâncias da manifestação UV a partes de interesse do isolador polimérico*

O cálculo das distâncias às partes de interesse do isolador polimérico tem quatro etapas.

- i. A segmentação das partes de interesse do isolador polimérico;
- ii. A determinação dos endereços dos píxeis das partes de interesse do isolador polimérico;
- iii. A determinação dos endereços dos píxeis da região de maior intensidade de manifestação UV;
- iv. O cálculo das distâncias da manifestação UV às partes de interesse do isolador polimérico.

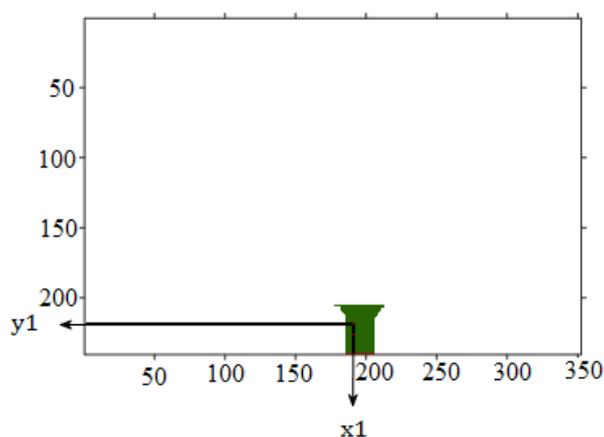
A **segmentação das partes de interesse do isolador polimérico** é feita selecionando, de forma assistida, as regiões do componente por ordem de importância. Para isso é utilizada a imagem contendo o formato do isolador (conforme a Figura 4.6(b)). Na Figura 4.11, as partes do isolador polimérico são diferenciadas por tons da cor verde. As regiões da imagem com tons da cor verdes foram estabelecidas como as regiões mais importantes. Atribuiu-se a ferragem fase como a primeira região, a primeira parte do núcleo como a segunda região e a primeira saia do isolador como a terceira região. As demais regiões são representadas pela cor cinza.

Figura 4.11. Segmentação das partes de interesse do isolador polimérico em regiões. (Fonte: autoria própria)



Em seguida, é feita a **determinação dos endereços dos píxeis das partes de interesse do isolador polimérico**. Para a parte de interesse selecionada é feito o endereçamento dos píxeis correspondente a região, ou seja, são registradas as coordenadas de aparição da informação de interesse no quadro. Conforme exemplificado na Figura 4.12, são registrados os endereços correspondentes à ferragem fase (isto é, os píxeis na cor verde).

Figura 4.12. Endereçamento das partes de interesse. (Fonte: autoria própria)



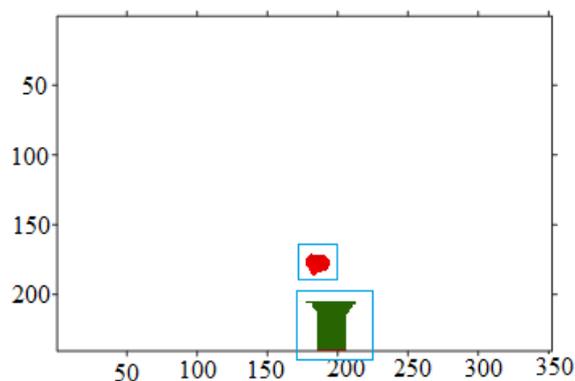
Em seguida, na **determinação dos endereços dos píxeis da região de maior intensidade de manifestação UV**, também são registrados os endereços das regiões na imagem integralizada e sem ruído (Figura 4.9 (c)) em que manifestação UV é elevada, onde se constata elevado valor em nível de bit.

Assim, o endereçamento para as três regiões de interesse no isolador polimérico e para a região de maior manifestação UV é efetuado.

Finalmente, o **cálculo das distâncias da manifestação UV a partes de interesse do isolador polimérico** é realizado. Calcula-se a distância euclidiana entre todos os pares ordenados de endereço referente à região de interesse e todos pares ordenados de endereço

referente à região dos píxeis de maior manifestação UV. A menor distância observada nos cálculos é considerada como a distância entre a manifestação UV e a parte de interesse. Na Figura 4.13, é exemplificada a região de interesse correspondente à ferragem fase (região de cor verde) e a região de maior intensidade de manifestação UV (região de cor vermelha). A distância é calculada entre as duas partes indicadas pelas caixas de cor azul.

Figura 4.13. Região de maior intensidade de manifestação UV e região de interesse do isolador polimérico. (Fonte: autoria própria)

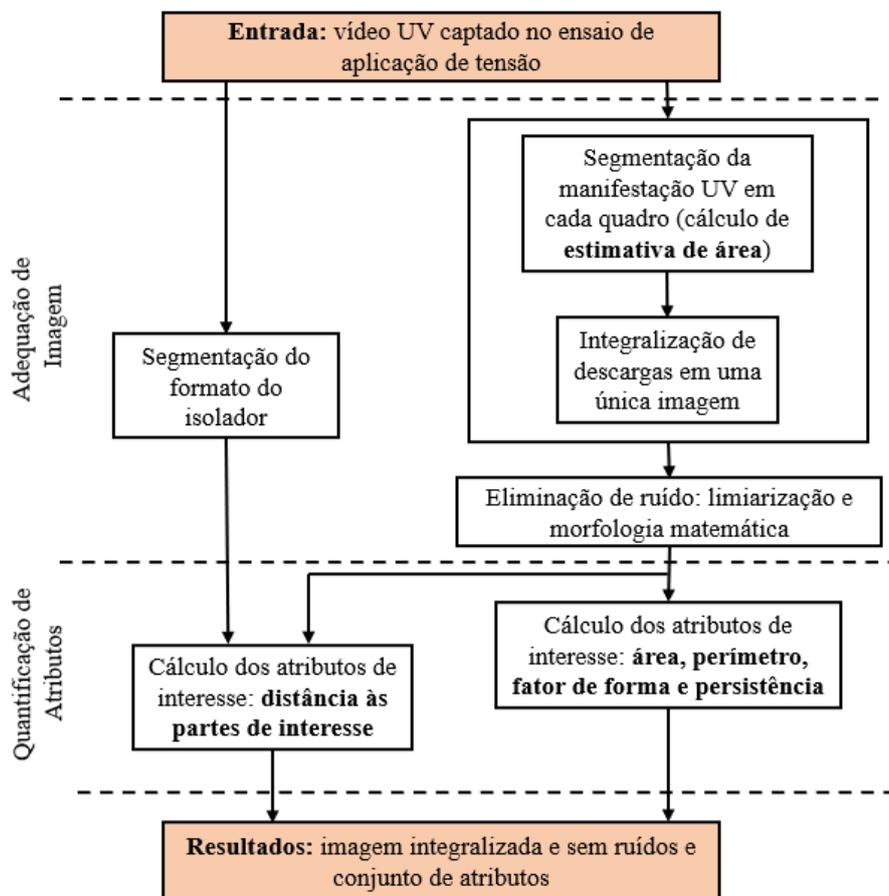


Finalmente, as informações obtidas pela etapa de quantificação dos atributos para o vídeo UV do isolador polimérico são listados a seguir:

- i. Estimativa de área;
- ii. Área integralizada;
- iii. Perímetro integralizado;
- iv. Fator de forma
- v. Persistência relativa;
- vi. Distância à ferragem fase;
- vii. Distância ao núcleo;
- viii. Distância à primeira saia.

Cada atributo apresentado pode, potencialmente, caracterizar as manifestação UV correspondentes às descargas corona nos isoladores poliméricos. O algoritmo desenvolvido pode ser visualizado de maneira esquemática na Figura 4.14, em que as principais etapas são a adequação de imagem e a quantificação de atributos.

Figura 4.14. Diagrama esquemático das etapas do algoritmo desenvolvido. (Fonte: autoria própria)



Concluído o desenvolvimento do algoritmo de extração de atributos, a proposta de análise dos atributos dos vídeos UV é apresentada a seguir.

4.2.3 PROPOSTA DE ANÁLISE DOS ATRIBUTOS DOS VÍDEOS UV

De modo que os resultados das aplicações do algoritmo possam ser correlacionados entre si, uma normalização dos atributos é realizada, conforme apresentado na Tabela 2.1. A normalização é feita de acordo com (4.9),

$$x_n = \frac{x}{\max(X)}, \quad (4.9)$$

em que x_n é o valor do atributo já normalizado, x é o valor do atributo antes da normalização e X é um conjunto de valores dos atributos.

Em seguida, a representação dos atributos é realizada por meio de gráfico de radar. Cada gráfico de radar representa um vídeo UV, em que o comprimento de cada raio é proporcional à magnitude de um atributo normalizado com relação ao valor máximo encontrado no conjunto deste atributo.

Os gráficos de radar foram construídos para representar os atributos de **área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma e persistência relativa**, formando um polígono quadrilátero. O atributo de **estimativa de área**, conforme explicitado no tópico 4.2.2.3, é utilizado apenas para determinar o critério de limiarização na eliminação de ruído e não compõe o gráfico de radar. Os atributos relativos às **distâncias da manifestação UV às partes de interesse do isolador polimérico** também não compõe os gráficos de radar e são abordados em separado.

Os cinco isoladores (IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05) foram ensaiados sob tensão nominal, totalizando cinco vídeos captados com a câmera UV. Os vídeos foram processados pelo algoritmo desenvolvido e, a partir dos atributos obtidos, a análise dos resultados é realizada por meio de duas abordagens.

- i. A primeira abordagem consiste na análise dos atributos normalizados de área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma e persistência relativa representados em gráfico de radar, reforçando as etapas de adequação de imagens.
- ii. A segunda abordagem analisa a influência das distâncias da manifestação UV às regiões de interesse dos isolador poliméricos.

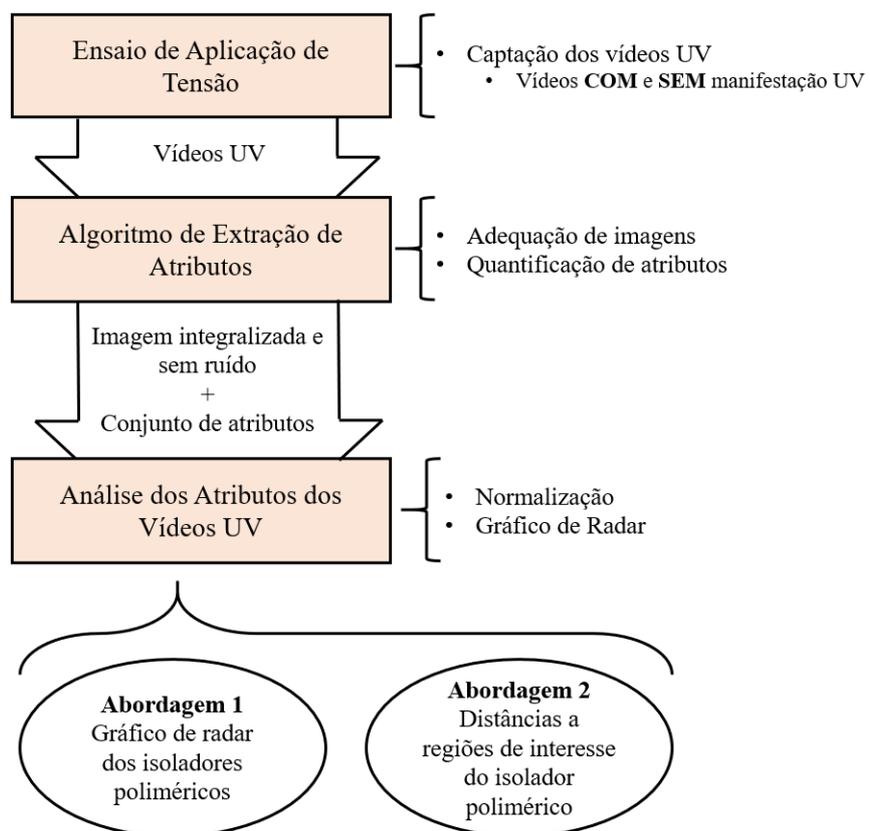
A seguir, é apresentada a síntese do capítulo da metodologia.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, o material utilizado e os métodos empregados foram descritos. A captação dos vídeos UV por ensaios de aplicação de tensão foi detalhada apresentando os procedimentos adotados e os isoladores ensaiados. No desenvolvimento do algoritmo para a extração de atributos, foram apresentadas as etapas para adequar as imagens e quantificar os atributos. Finalmente, na análise dos atributos dos vídeos UV, foram apresentadas a normalização e a representação por gráfico de radar dos atributos e ainda as duas abordagens propostas para analisar os resultados. Na Figura 4.15, um fluxograma simplificado da metodologia desenvolvida nesta Tese é apresentado.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos.

Figura 4.15. Fluxograma simplificado da metodologia desenvolvida. (Fonte: autoria própria)



5 RESULTADOS

No capítulo Resultados duas abordagens são apresentadas para a análise e discussão dos resultados obtidos após o emprego da metodologia apresentada. O capítulo está organizado em três seções: Abordagem 1 – Gráficos de Radar para Isoladores Poliméricos de 230 kV, Abordagem 2 – Distância da Manifestação UV às Regiões de Interesse nos Isoladores Poliméricos de 230 kV e Síntese do capítulo

De modo a atingir o objetivo geral do trabalho, os resultados da aplicação do algoritmo para extração de atributos da manifestação UV de descargas corona são apresentados em detalhes, destacando as imagens obtidas durante o processamento e os atributos extraídos. O processamento é realizado após os isoladores poliméricos de 230 kV (IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05) terem sido submetidos a ensaios de aplicação de tensão fase-terra nominal de $230\sqrt{3}$ kV. Na **Abordagem 1** são apresentados os resultados obtidos para o processamento dos vídeos UV dos cinco isoladores poliméricos ensaiados. Para cada isolador um gráfico de radar é apresentado e seus atributos são analisados. Na abordagem os procedimentos de adequação de imagens desenvolvidos são ressaltados de modo a reiterar as etapas intermediárias do algoritmo, destacando como tais imagens, de fato, são obtidas. Na **Abordagem 2** também são apresentados os resultados obtidos para o processamento dos vídeos UV dos cinco isoladores poliméricos ensaiados. Na abordagem, a análise da influência das distâncias do centróide da manifestação UV às regiões de interesse do isolador polimérico é apresentada. Os atributos de distâncias são apresentados em valores absolutos (em número de píxeis).

5.1 ABORDAGEM 1 – GRÁFICOS DE RADAR PARA

ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 230 kV

Na primeira abordagem são apresentados os resultados para os vídeos UV captados dos isoladores poliméricos de 230 kV. De modo a consolidar o algoritmo desenvolvido e exposto na metodologia, são apresentadas as figuras resultantes das etapas de adequação de imagens. Para cada um dos isoladores são apresentados:

- a) a parte do isolador polimérico, ressaltando seu estado operacional,

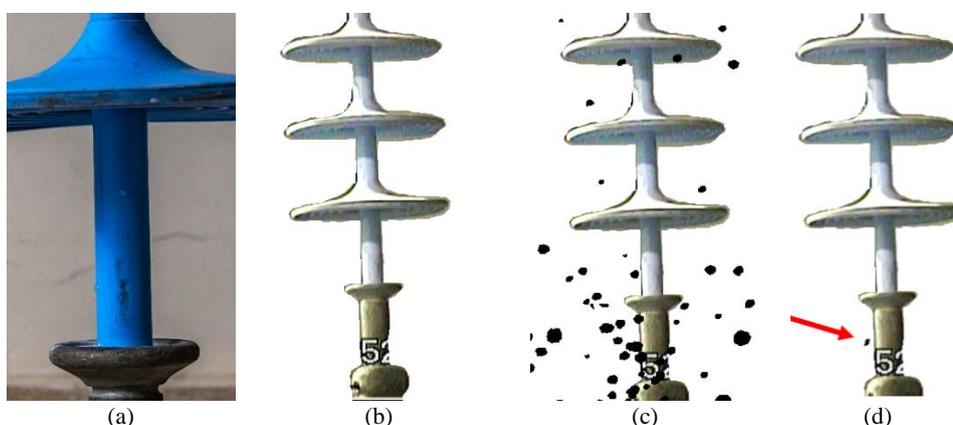
- b) o formato do isolador separado do fundo da imagem,
- c) o formato do isolador conjuntamente com a integralização dos 1800 quadros da manifestação UV das descargas corona, e
- d) o formato do isolador conjuntamente a manifestação UV integralizada e sem ruído (sinalizada por setas vermelhas).

As etapas de quantificação e análise de atributos para os cinco isoladores poliméricos são apresentadas por gráficos de radar. Os eixos dos gráficos de radar são os atributos normalizados de **área integralizada** (chamada no gráfico de radar apenas como **área**), **perímetro integralizado** (chamado no gráfico de radar apenas como **perímetro**), **fator de forma** e **persistência relativa** (chamada no gráfico de radar apenas como **persistência**).

5.1.1 ISOLADOR POLIMÉRICO NOVO (IL01)

As etapas de adequação de imagem para o vídeo do isolador polimérico considerado novo (IL01) são apresentadas na Figura 5.1.

Figura 5.1. Imagens relativas (a) ao isolador IL01 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha. (Fonte: autoria própria)



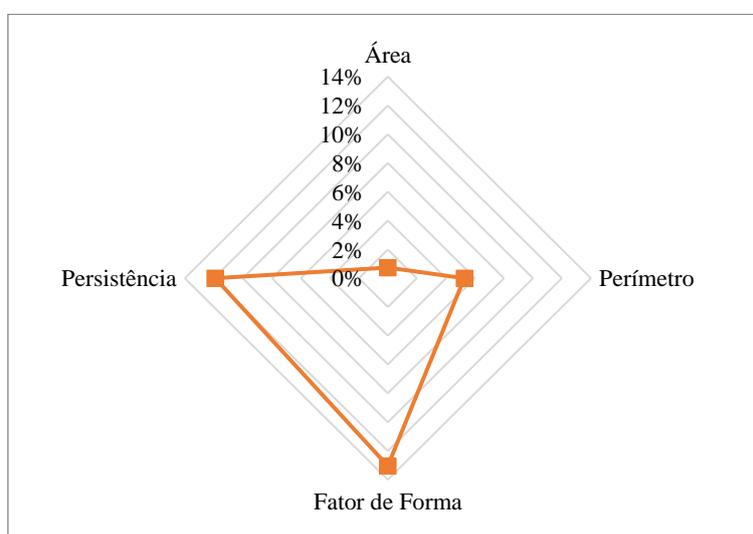
Na Figura 5.1(a) é apresentada a parte inferior do isolador IL01, destacando que não há nenhum desgaste aparente, caracterizando-o como um isolador novo. Na Figura 5.1(b) é mostrado o resultado da segmentação do formato do isolador IL01, em que foi possível destacar a imagem do formato do componente do plano de fundo. Na Figura 5.1(c) é mostrada uma imagem com a integralização dos 1800 quadros do vídeo UV do isolador IL01, notadamente apresentando sinais que, mais a frente, são considerados ruídos, conforme apresentado na Figura 5.1(d). Na Figura 5.1(d), a imagem

integralizada e sem ruídos é mostrada, em que boa parte dos sinais integralizados são eliminados. Para o caso dos vídeos do isolador polimérico novo (IL01), a aplicação das etapas de adequação de imagens foi satisfatória.

A análise da extração de atributos da manifestação UV é realizada a partir da imagem integralizada e sem ruídos do isolador IL01 e apresentada na Figura 5.2. Na Figura 5.2 é exposto um gráfico de radar com os atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência. O algoritmo foi eficaz na quantificação das informações relativas aos atributos do vídeo UV.

A partir da aplicação exitosa do algoritmo desenvolvido foi possível constatar, para o isolador IL01, que a manifestação UV resultante foi relativamente baixa e isso foi refletido em seus atributos. O resultado apresentado, com valores baixos para os atributos, é consistente com o estado operacional do isolador (considerado novo). Os atributos do isolador IL01 servem como base de comparação para os resultados dos demais isoladores (isoladores com defeitos aparentes). As manifestações de descargas de corona são bastante reduzidas ou, como em alguns quadros do vídeo UV, inexistentes. Os valores normalizados para área, perímetro, fator de forma e persistência foram, respectivamente: 0,74%, 5,26%, 13,05% e 11,90%.

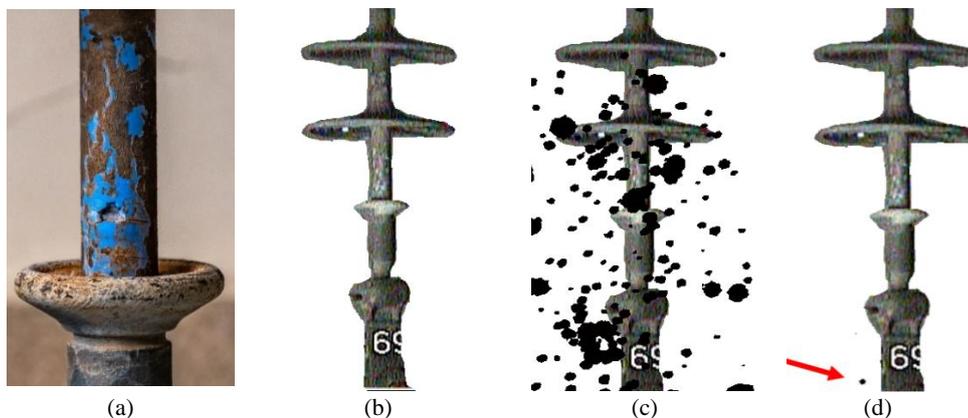
Figura 5.2. Gráfico de radar com atributos normalizados IL01. (Fonte: autoria própria).



5.1.2 ISOLADOR POLIMÉRICO COM RACHADURA (IL02)

As etapas de adequação de imagem para o vídeo do isolador polimérico caracterizado com rachaduras (IL02) são apresentadas na Figura 5.3.

Figura 5.3. Imagens relativas (a) ao isolador IL02 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha. (Fonte: autoria própria)



Na Figura 5.3(a) é apresentada a parte inferior do isolador IL02, destacando que há um desgaste aparente de rachaduras. Na Figura 5.3(b) é mostrado o resultado da segmentação do formato do isolador IL02, em que foi possível destacar a imagem do formato do componente do plano de fundo. Na Figura 5.3(c) é mostrada uma imagem com a integralização dos 1800 quadros do vídeo UV do isolador IL02, notadamente apresentando sinais que, mais a frente, são considerados ruídos, conforme apresentado na Figura 5.3(d). Na Figura 5.3(d), a imagem integralizada e sem ruídos é mostrada, em que boa parte dos sinais integralizados são eliminados, resultado similar ao caso do IL01. Para o caso dos vídeos do isolador polimérico com rachaduras (IL02), a aplicação das etapas de adequação de imagens foi apropriada.

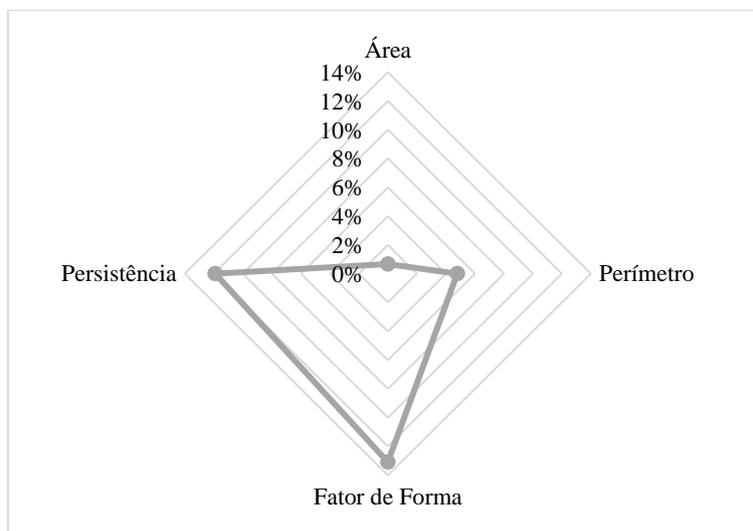
A análise da extração de atributos da manifestação UV é realizada a partir da imagem integralizada e sem ruídos do isolador IL02 e apresentada na Figura 5.4. Na Figura 5.4 é exposto um gráfico de radar com os atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência. O algoritmo foi eficaz na quantificação das informações relativas aos atributos do vídeo UV.

A partir da aplicação exitosa do algoritmo desenvolvido, também para esse caso, foi possível constatar, que a manifestação de UV resultante também foi muito baixa e **não** está localizada próxima às rachaduras no revestimento polimérico, o que implica que as rachaduras não causam uma intensificação considerável das descargas corona para este caso. Os atributos também têm valores relativamente baixos. Os valores normalizados dos atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência foram, respectivamente: 0,67%, 4,78%, 13,08% e 11,90%.

A partir dos baixos valores dos atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência obtidos da Figura 5.3(d) e da análise visual da Figura 5.4, evidencia-se a

necessidade de aplicação de outros tipos de inspeção para detectar o estado operacional do isolador. Neste caso uma inspeção visual criteriosa e o uso do monitoramento termográfico e ultrassônico auxiliaria na tomada de decisão.

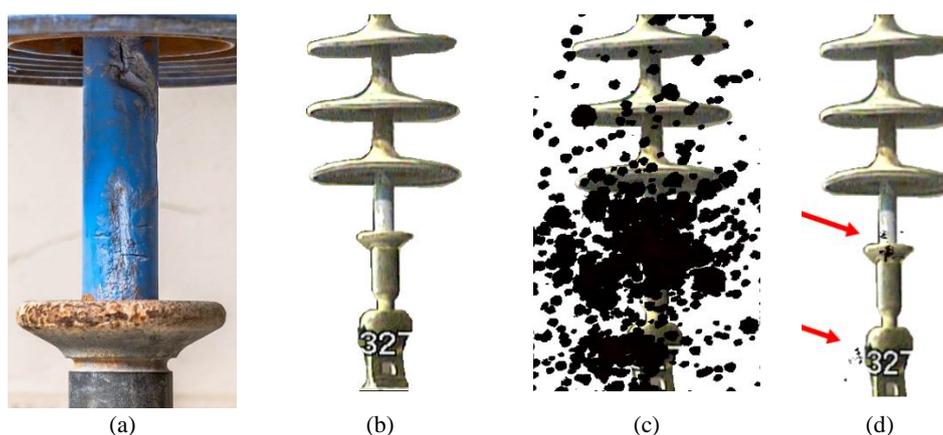
Figura 5.4. Gráfico de radar com atributos normalizados IL02. (Fonte: autoria própria)



5.1.3 ISOLADOR POLIMÉRICO COM TRILHAMENTO E EROSIÃO (IL03)

As etapas de adequação de imagem para o vídeo do isolador polimérico considerado com trilhamento e erosão (IL03) são apresentadas na Figura 5.5.

Figura 5.5. Imagens relativas (a) ao isolador IL03 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas. (Fonte: autoria própria)



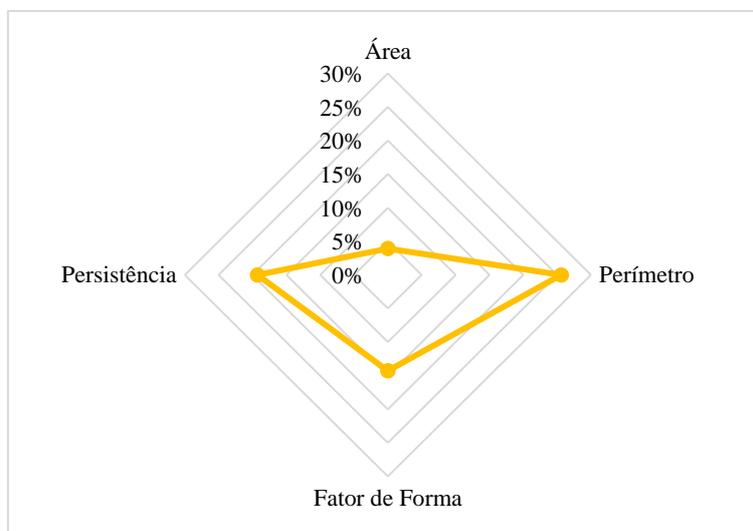
Na Figura 5.5(a) é apresentada a parte inferior do isolador IL03, destacando que há um desgaste por trilhamento e erosão. Na Figura 5.5(b) é mostrado o resultado da segmentação do formato do isolador IL03, em que foi possível destacar a imagem do formato do componente do plano de fundo. Na Figura 5.5(c) é mostrada uma imagem

com a integralização dos 1800 quadros do vídeo UV do isolador IL03, notadamente apresentando sinais que, mais a frente, são considerados ruídos, conforme apresentado na Figura 5.5(d). Na Figura 5.5(d), a imagem integralizada e sem ruídos é mostrada, em que boa parte dos sinais integralizados são eliminados, ressaltando dois locais de manifestação intensa de descargas corona, resultado bem mais severo que o caso de referência do isolador IL01. Para o caso dos vídeos do isolador polimérico com trilhamento e erosão (IL03), a aplicação das etapas de adequação de imagens foi satisfatória.

A análise da extração de atributos da manifestação UV é realizada a partir da imagem integralizada e sem ruídos do isolador IL03 e apresentada na Figura 5.6. Na Figura 5.6 é exposto um gráfico de radar com os atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência. O algoritmo foi eficaz na quantificação das informações relativas aos atributos do vídeo UV.

A partir do sucesso da aplicação do algoritmo, foi possível notar, para este caso, que existem duas regiões de manifestação de UV com persistência alta, uma localizada no encaixe da ferragem fase e a outra localizada próximo ao desgaste causado pelo trilhamento e erosão. Ambos com uma certa intensidade que se reflete no atributo persistência (um pouco maior do que no caso de IL01), indicando descargas corona mais intensas, conforme mostrado na Figura 5.5(d). Além disso, por causa dessas duas regiões, os atributos de área e perímetro também são um pouco maiores. Conforme a Figura 5.6, os valores normalizados de área, perímetro, fator de forma e persistência foram, respectivamente: 3,92%, 25,60%, 14,28% e 19,27%.

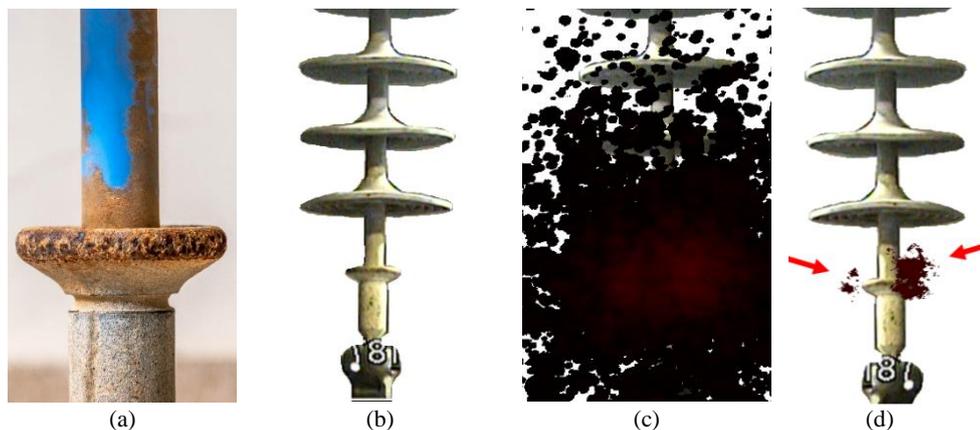
Figura 5.6. Gráfico de radar com atributos normalizados IL03. (Fonte: autoria própria)



5.1.4 ISOLADOR POLIMÉRICO COM CORROSÃO DA FERRAGEM TERMINAL (IL04)

As etapas de adequação de imagem para o vídeo do isolador polimérico considerado com corrosão da ferragem terminal (IL04) são apresentadas na Figura 5.7.

Figura 5.7. Imagens relativas (a) ao isolador IL04 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas. (Fonte: autoria própria)



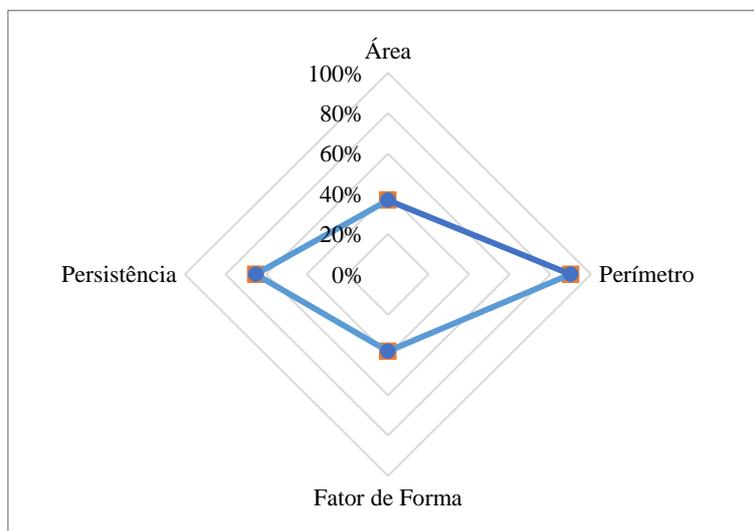
Na Figura 5.7(a) é apresentada a parte inferior do isolador IL04, destacando que há um desgaste aparente de corrosão da ferragem terminal. Na Figura 5.7(b) é mostrado o resultado da segmentação do formato do isolador IL04, em que foi possível destacar a imagem do formato do componente do plano de fundo. Na Figura 5.7(c) é mostrada uma imagem com a integralização dos 1800 quadros do vídeo UV do isolador IL04, notadamente apresentando bastante sinais que, mais a frente, são considerados ruídos, conforme apresentado na Figura 5.7(d). Na Figura 5.7(d), a imagem integralizada e sem ruídos é mostrada, em que boa parte dos sinais integralizados são eliminados, ressaltando dois locais de manifestação intensa de descargas corona. Para o caso dos vídeos do isolador polimérico com corrosão da ferragem terminal (IL04), a aplicação das etapas de adequação de imagens foi apropriada.

A análise da extração de atributos da manifestação UV é realizada a partir da imagem integralizada e sem ruídos do isolador IL04 e apresentada na Figura 5.8. Na Figura 5.8 é exposto um gráfico de radar com os atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência. O algoritmo foi eficaz na quantificação das informações relativas aos atributos do vídeo UV.

A partir da aplicação exitosa do algoritmo, foi possível constatar, para o isolador IL04, que há duas regiões de manifestação UV, ambas localizadas próximas ao desgaste causado pela corrosão, destacando a atividade de descarga corona. A intensidade da

manifestação UV é refletida pelo atributo de persistência. Os atributos apresentam valores elevados, segundo Figura 5.8, os valores normalizados de área, perímetro, fator de forma e persistência foram, respectivamente: 36,77%, 89,95%, 38,14% e 65,11%. Relacionando os atributos com o isolador de referência IL01 fica notória a ação das descargas corona.

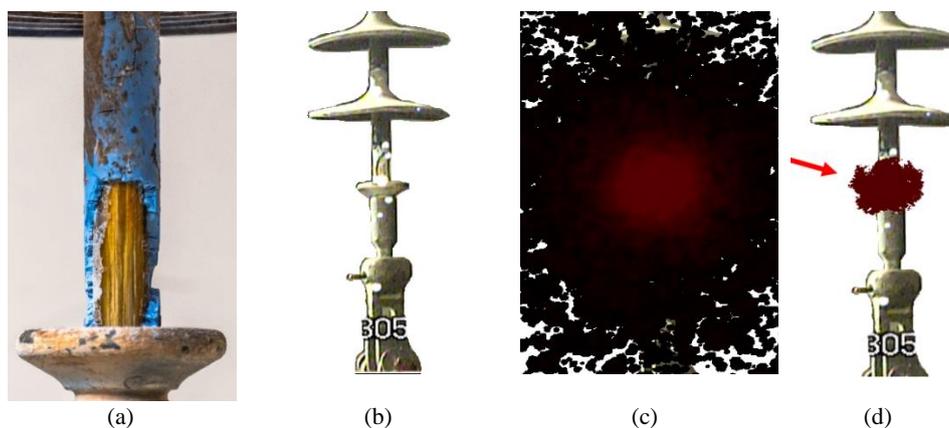
Figura 5.8. Gráfico de radar com atributos normalizados IL04. (Fonte: autoria própria)



5.1.5 ISOLADOR POLIMÉRICO COM EROÇÃO COM EXPOSIÇÃO DO NÚCLEO (IL05)

As etapas de adequação de imagem para o vídeo do isolador polimérico considerado com erosão com exposição do núcleo (IL05) são apresentadas na Figura 5.9.

Figura 5.9. Imagens relativas (a) ao isolador IL05 e (b) o seu formato para a (c) imagem integralizada e (d) imagem integralizada sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha. (Fonte: autoria própria)



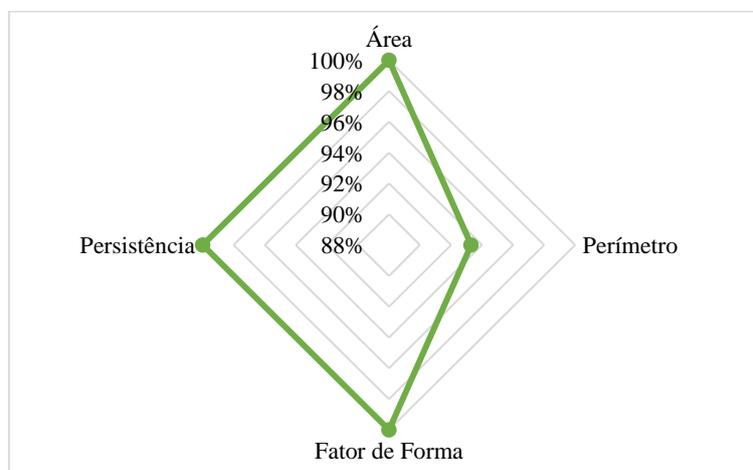
Na Figura 5.9(a) é apresentada a parte inferior do isolador IL05, destacando que há um desgaste aparente de erosão com exposição do núcleo. Na Figura 5.9(b) é mostrado o resultado da segmentação do formato do isolador IL05, em que foi possível destacar a

imagem do formato do componente do plano de fundo. Na Figura 5.9(c) é mostrada uma imagem com a integralização dos 1800 quadros do vídeo UV do isolador IL05, notadamente apresentando bastante sinais que, mais a frente, são considerados ruídos, conforme apresentado na Figura 5.9(d). Na Figura 5.9(d), a imagem integralizada e sem ruídos é mostrada, em que boa parte dos sinais integralizados são eliminados, ressaltando um local de manifestação intensa de descargas corona. Para o caso dos vídeos do isolador polimérico com erosão com exposição do núcleo (IL05), a aplicação das etapas de adequação de imagens foi satisfatória.

A análise da extração de atributos da manifestação UV é realizada a partir da imagem integralizada e sem ruídos do isolador IL05 e apresentada na Figura 5.10. Na Figura 5.10 é exposto um gráfico de radar com os atributos de área, perímetro, fator de forma e persistência. O algoritmo foi eficaz na quantificação das informações relativas aos atributos do vídeo UV.

A partir da aplicação exitosa do algoritmo, foi possível constatar, que os atributos para este caso apresentam os maiores valores entre todos os apresentados até então, especialmente para o isolador de referência IL01, conforme mostrado na Figura 5.10. De fato, a exposição do núcleo por erosão provoca o aparecimento de deformidades no revestimento polimérico e no núcleo do isolador, intensificando os campos elétricos não uniformes e consequentemente aumentando a ação de descargas corona. A manifestação das descargas corona é intensificada tanto no tamanho (representado pela área, perímetro e fator de forma) quanto na intensidade temporal (representada pela persistência). Os valores normalizados de área, perímetro, fator de forma e persistência foram, respectivamente: 100,00%, 93,30%, 100,00% e 100,00%.

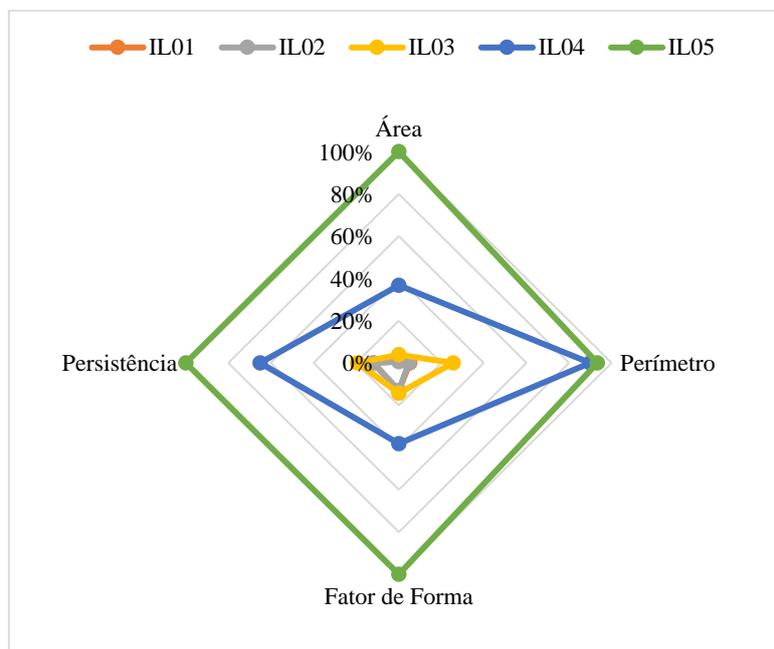
Figura 5.10. Gráfico de radar com atributos normalizados IL05. (Fonte: autoria própria)



5.1.6 CONJUNTO DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS

Os gráficos de radar para os cinco isoladores são apresentados na mesma escala da Figura 5.11, com variação do eixo de 0 a 100%.

Figura 5.11. Gráfico de radar com todos os atributos normalizados dos isoladores. (Fonte: autoria própria)



De fato, diferentes padrões podem ser constatados para os diferentes tipos de estados de operação do isolador. O algoritmo contribui para a caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos com relação somente às manifestações ultravioletas causadas pelas descargas corona.

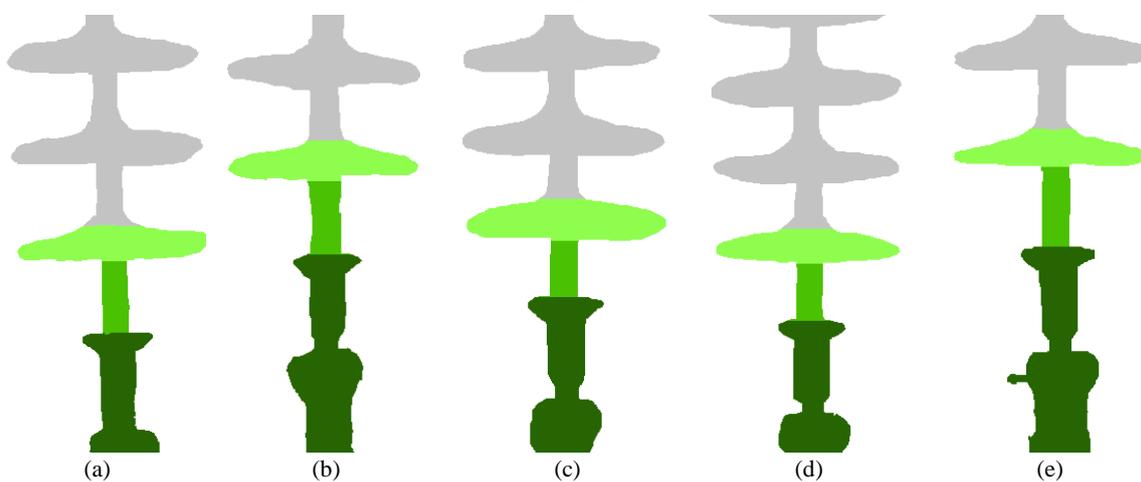
Comparando com o isolador de referência IL01, a aplicação do algoritmo foi eficaz na detecção dos padrões de manifestação das descargas corona nos isoladores IL03, IL04 e IL05, ressaltando que os atributos indicam o formato e a duração da corona para o estado operacional dos isoladores. Para o isolador com baixa manifestação do efeito corona, IL02, o padrão detectado pelo algoritmo foi semelhante ao isolador de referência, inclusive os resultados de IL02 sobrepõem visualmente os resultados de IL01 na Figura 5.11.

5.2 ABORDAGEM 2 – DISTÂNCIA DA MANIFESTAÇÃO UV ÀS REGIÕES DE INTERESSE NOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 230 KV

Na segunda abordagem são apresentados os resultados para os vídeos UV captados dos isoladores poliméricos de 230 kV para os atributos relacionados à **distância da manifestação UV às regiões de interesse nos isoladores poliméricos de 230 kV**. De modo consolidar o algoritmo desenvolvido e exposto na metodologia, são apresentadas as figuras resultantes das etapas de adequação de imagens e extração de atributos.

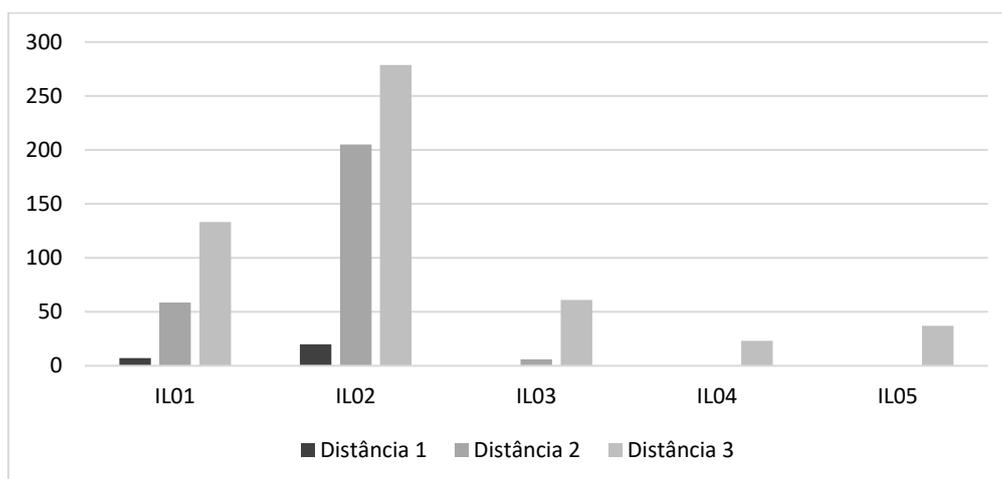
Na Figura 5.12, os formatos segmentados dos isoladores IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05 são apresentados. Em que a cor verde de tom mais escuro representa a ferragem fase, o verde de tom intermediário representa a primeira parte do núcleo do isolador, o verde de tom mais claro representa a primeira saia do isolador. O restante do formato do isolador é representado pela cor cinza. A aplicação dessa etapa de adequação de imagens foi empregada de forma apropriada.

Figura 5.12. formato segmentado dos isoladores (a) IL01, (b) IL02, (c) IL03, (d) IL04 e (e) IL05. (Fonte: autoria própria)



Na extração dos atributos, na Figura 5.13, as distâncias euclidianas, em número de píxeis, das manifestações UV às regiões de interesse nos isoladores poliméricos (IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05) são apresentadas. A distâncias são calculadas a partir do centroide da manifestação ultravioleta até a ferragem fase (distância 1), a primeira parte do núcleo (distância 2) e a primeira saia do isolador (distância 3). O algoritmo foi eficaz na quantificação das informações relativas aos atributos de distância do vídeo UV.

Figura 5.13. Distância euclidiana (em número de píxeis) da manifestação UV às regiões de interesse nos isoladores IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05. (Fonte: autoria própria)



As distâncias destacadas no gráfico da Figura 5.13 são apresentadas na Tabela 5.1. Os valores não são necessariamente inteiros por conta do cálculo de distância euclidiana, conforme (2.2). Quão menor for o valor da distância, mais próxima da região de interesse a manifestação UV está. No caso em que os valores forem iguais a zero, a manifestação UV encontra-se localizada na região de interesse no isolador.

Tabela 5.1. Distância euclidiana (em número de píxeis) da manifestação UV às regiões de interesse nos isoladores IL01, IL02, IL03, IL04 e IL05. (Fonte: autoria própria)

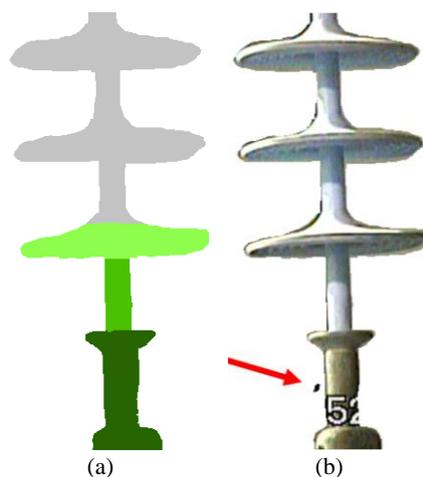
Distâncias	IL01	IL02	IL03	IL04	IL05
Distância 1	7,00	20,00	0,00	0,00	0,00
Distância 2	58,69	205,18	6,00	0,00	0,00
Distância 3	133,24	278,87	61,00	23,00	37,00

A seguir, os atributos de distância são discutidos para cada isolador, apresentando (a) a imagem da segmentação do formato do isolador e (b) a imagem da manifestação integralizada e sem ruído no formato do isolador.

5.2.1 ATRIBUTO DE DISTÂNCIA PARA IL01

A imagem da segmentação do formato do isolador IL01 é apresentado, na Figura 5.14, ao lado da imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha.

Figura 5.14. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL01 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha. (Fonte: autoria própria)

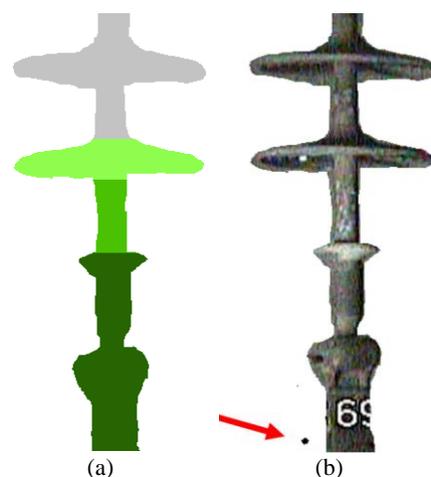


O cálculo das distâncias para o IL01 reforça a informação apresentada na Figura 5.14(b). Deixando explícito quantitativamente que a descarga corona não está situada no corpo do isolador polimérico. Associando esta informação à análise feita na seção 5.1.1, fica claro que o isolador polimérico novo não está submetido a uma ação considerável das descargas corona.

5.2.2 ATRIBUTO DE DISTÂNCIA PARA IL02

A imagem da segmentação do formato do isolador IL02 é apresentado, na Figura 5.15, ao lado da imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha.

Figura 5.15. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL02 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha. (Fonte: autoria própria)



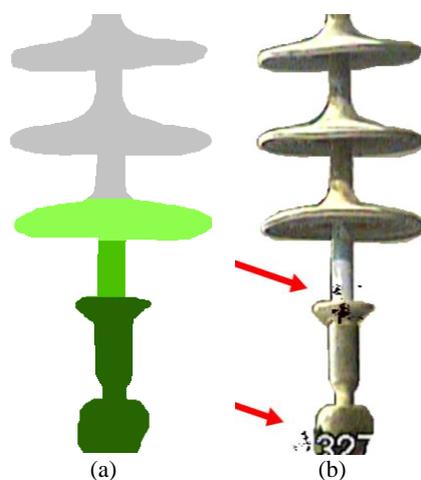
Nota-se, para este caso, que a manifestação de UV resultante também está distante das regiões de interesse do isolador polimérico e pode-se constatar ao associar esta

informação à análise feita em na seção 5.1.2, que o isolador polimérico com rachadura não está sob efeito uma ação consideravelmente intensa das descargas corona.

5.2.3 ATRIBUTO DE DISTÂNCIA PARA IL03

A imagem da segmentação do formato do isolador IL03 é apresentado, na Figura 5.16, ao lado da imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas.

Figura 5.16. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL03 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas. (Fonte: autoria própria)

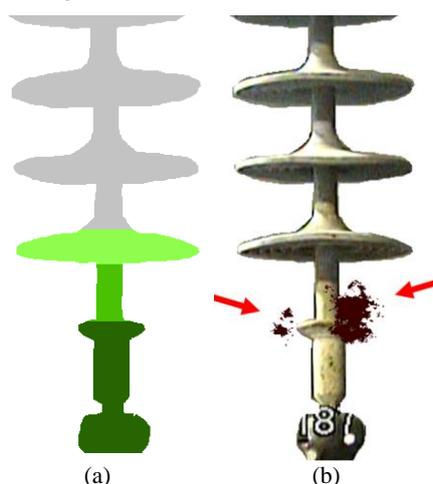


Conforme constatado na Figura 5.16(b), existem duas regiões de manifestação de UV, uma localizada no encaixe da ferragem fase e a outra localizada próxima ao desgaste causado pelo trilhamento e erosão. Pelo fato de ser mais persistente, a primeira manifestação UV é tomada como referência para o cálculo das distâncias. A partir dos dados quantitativo (dos atributos de distância) fica notória a existência da manifestação UV mais intensa na ferragem fase e relativamente próxima ao núcleo do isolador. Ou seja, o corpo do isolador polimérico com trilhamento e erosão está, de fato, submetido à ação das descargas corona.

5.2.4 ATRIBUTO DE DISTÂNCIA PARA IL04

A imagem da segmentação do formato do isolador IL04 é apresentado, na Figura 5.17, ao lado da imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas.

Figura 5.17. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL04 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com duas setas vermelhas. (Fonte: autoria própria)

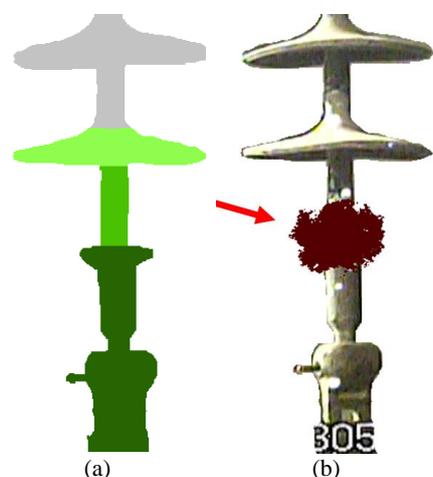


Neste caso também há duas regiões de manifestação UV, ambas localizadas próximas ao desgaste causado pela corrosão. A manifestação UV da direita é a mais persistente e é tomada como referência para o cálculo das distâncias. A partir dos atributos de distância fica explicitado que a manifestação UV mais intensa está tanto na ferragem fase quanto no núcleo do isolador. Ou seja, o isolador polimérico com corrosão da ferragem terminal está submetido à ação direta das descargas corona.

5.2.5 ATRIBUTO DE DISTÂNCIA PARA IL05

A imagem da segmentação do formato do isolador IL05 é apresentado, na Figura 5.18, ao lado da imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha.

Figura 5.18. Imagens relativas (a) à segmentação do isolador IL05 e (b) imagem integralizada e sem ruído, sinalizando a manifestação UV com uma seta vermelha. (Fonte: autoria própria)



Tal qual o caso do isolador IL04, o isolador IL05 apresenta a manifestação UV localizado na ferragem fase e no núcleo do isolador. Ou seja, o isolador polimérico com erosão com exposição do núcleo está também submetido à ação das descargas corona.

Analisando a segunda abordagem com relação à primeira, constatou-se que os atributos relacionados às distâncias da manifestação UV às regiões de interesse no isolador polimérico corroboram com os resultados obtidos na abordagem com os gráficos de radar. De forma complementar, os atributos de distância apresentam como vantagem o fornecimento de um subsídio quantitativo que permite conclusões mais assertivas com relação à ação das descargas corona nos isoladores poliméricos ensaiados. Os isoladores foram caracterizados pelas **imagens integralizadas e sem ruído**, pelos **gráficos de radar** e pelas **distâncias às regiões de interesse**.

Os isoladores poliméricos com trilhamento e erosão (IL03), corrosão na ferragem fase (IL04) e com erosão e exposição do núcleo (IL05) por apresentarem descargas corona mais intensas foram mais explicitamente caracterizados com relação ao isolador de referência IL01. Para o caso com descargas corona mais moderadas, o isolador com rachaduras (IL02), não apresentou manifestação UV consideravelmente maior que o isolador novo de referência (IL01).

Em suma, a aplicação do algoritmo desenvolvido ensejou uma proposta que efetivamente contribuiu com a caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo os resultados foram apresentados após o emprego da metodologia desenvolvida nesta Tese. Duas abordagens foram aplicadas para análise dos atributos. A primeira abordagem explorou, a partir de gráficos de radar, os atributos de área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma e persistência relativa. A segunda abordagem explorou os atributos relacionados às distâncias às regiões de interesse do isolador polimérico. As etapas de adequação de imagens e extração de atributos do algoritmo desenvolvido foram aplicadas de forma satisfatória.

Diante do exposto, constata-se que as duas abordagens são complementares na análise dos atributos relacionados às descargas corona em isoladores poliméricos. Além de validar (por meio da aplicação em cinco casos) o algoritmo proposto na metodologia.

Destaca-se, ainda, que há limitações à aplicação da técnica para os casos em que as descargas corona (e consequentemente a manifestação UV) sejam relativamente moderadas, conforme explicitado no caso do isolador IL02. Para estes casos sugere-se a aplicação de outros tipos de inspeção para detectar o estado operacional do isolador.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões da Tese.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões, as contribuições, o alcance da Pesquisa e Publicações.

Como conclusão desta Tese, foi desenvolvido um algoritmo baseado em PDI inovador para adequação de imagens e extração de atributos da manifestação ultravioleta de descargas corona, apresentando uma proposta eficaz que contribui na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos.

Para conceber como o objetivo geral do trabalho foi atingido, é necessário destacar os fatores que auxiliaram o desenvolvimento do trabalho.

Inicialmente, o desenvolvimento do algoritmo apresentado só pôde ser viável após a análise dos algoritmos já existentes na literatura. A realização de uma **revisão bibliográfica crítica** permitiu a compreensão das ferramentas utilizadas para elaboração de algoritmos que tratam imagens ou vídeos UV e possibilitam a extração de atributos relativos ao efeito corona em sistemas de alta tensão. A partir da revisão bibliográfica estabeleceu-se pilares importantes do trabalho como: principais ferramentas de PDI a serem utilizadas, os principais atributos a serem extraídos, a necessidade de explorar a persistência da manifestação UV para todos quadros do vídeo UV e a necessidade de relacionar às distâncias da manifestação UV às regiões de interesse no isolador polimérico.

A partir da compreensão de que os vídeos UV são os dados de entrada para o algoritmo, foi desenvolvido um **procedimento experimental apropriado** para as suas aquisições. A roteirização dos procedimentos foi esmiuçada em um guia, subproduto da Tese, apresentado em anexo. O procedimento experimental foi aplicado de acordo com a proposta da metodologia, garantindo a obtenção de vídeos com a qualidade necessária para o processamento eficiente do algoritmo.

O desenvolvimento, de fato, do algoritmo foi feito destacando-se duas etapas: a adequação de imagens e a extração de atributos. Obteve-se resultados eficazes para a aplicação do algoritmo tanto na adequação de imagens quanto na extração de atributos em vídeos obtidos em ensaios de aplicação de tensão em isoladores poliméricos de 230 kV.

Na **adequação de imagens** foram apresentadas as imagens processadas com o formato dos isoladores separado do fundo da imagem, o formato dos isoladores conjuntamente com a integralização dos 1800 quadros da manifestação UV, o formato dos isoladores conjuntamente a manifestação UV integralizada e sem ruído e ainda o formato dos isoladores segmentado em regiões de interesse. Na **extração de atributos** foram apresentados gráficos de radar com os atributos de área integralizada, perímetro integralizado, fator de forma e persistência relativa e ainda uma tabela com as distâncias da manifestação UV às regiões de interesse do isolador poliméricos (regiões de ferragem fase, primeira parte do núcleo e a primeira saia).

Ao analisar a **influência do conjunto dos atributos da manifestação UV**, tanto nos gráficos de radar quanto nas distâncias às regiões de interesse, foi possível contribuir na caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos. Os isoladores poliméricos com trilhamento e erosão, com corrosão na ferragem fase e com erosão e exposição do núcleo, por apresentarem descargas corona mais intensas, foram mais explicitamente diferenciados do isolador de referência, o isolador novo. O isolador com rachaduras, por não apresentar descargas corona tão intensas, não foi diferenciado do isolador novo.

Finalmente, pode-se afirmar que o algoritmo se mostrou como uma proposta eficaz e inovadora de caracterização do estado operacional de isoladores poliméricos com relação as descargas corona, sendo capaz de quantificar atributos relacionados às manifestações UV. O algoritmo é uma ferramenta com potencial de auxílio de tomada de decisão com relação ao estado operacional de componentes de alta tensão.

6.1 CONTRIBUIÇÕES E ALCANCE DA PESQUISA

Esta pesquisa consistiu no desenvolvimento de um algoritmo que caracteriza as descargas corona, auxiliando a tomada de decisão com relação ao estado operacional de componentes do sistema de alta tensão, contribuindo para tornar o sistema elétrico de potência mais confiável e seguro. Até então, não havia na literatura especializada uma proposta clara e bem consolidada para a adequação de imagens e extração de atributos de vídeos UV.

A partir desta Tese, tem-se estabelecido de forma apropriada: um procedimento experimental para ensaios em laboratório e medições em campo, um algoritmo para

extração de atributos de vídeos UV e uma proposta de análise dos atributos extraídos.

Diante do exposto, múltiplos caminhos para desenvolvimento de pesquisas se apresentam.

Com relação aos procedimentos experimentais, novas formas de aquisição de vídeo podem ser estudadas. Nas medições em campos, devido às diversas disposições espaciais existentes, nem sempre é possível realizar aquisições de vídeos de forma ideal, de modo que é necessário analisar como capturas de vídeos em ângulos e distâncias distintas influenciam nos atributos das manifestações UV. O guia de ensaio e medição elaborado e apresentado em anexo a esta Tese foi pensado para situações laboratoriais cujas condições ambientais são bem controladas e, apesar de o guia também poder ser aplicado em situações de campo relativamente uniformes, é necessário compreender as situações críticas de medições em campo. Logo, esse é um caminho promissor de pesquisa na área.

Ainda pensando em procedimentos experimentais, destacam-se como potenciais fontes de pesquisa, as análises de outros tipos de componentes de alta tensão, tais como: para-raios, disjuntores, chaves e transformadores. Todos os componentes que podem estar submetidos à ação das descargas corona podem ser avaliados seguindo a proposta apresentada nesta Tese. Nesta perspectiva, todos os componentes podem ser avaliados a partir de diferentes modelos, fabricantes, nível de tensão ou, ainda, com relação aos possíveis defeitos e falhas existentes.

Com relação ao algoritmo para extração de atributos de vídeos UV, pode-se destacar que os procedimentos apresentados podem ser revistos, pensando em ferramentas distintas de processamento de imagens e de extração de atributos. Há diversas ferramentas na literatura de PDI para realizar as etapas do algoritmo desenvolvido. Como fonte de pesquisas, pode-se pensar em novas formas para segmentar e integralizar as manifestações UV relativas às descargas corona e novas maneiras de realizar a filtragem e eliminação de sinais espúrios, sem este outro caminho promissor para desenvolver pesquisa na área.

Com relação à análise dos atributos, ainda há também vários tipos de análises que podem ser efetuadas de forma mais profunda. Notadamente, os atributos relacionados à área, fator de forma, persistência e distâncias das manifestações UV têm potencial para ser explorados aplicando-se estatísticas ou ainda, aplicar os atributos obtidos em classificadores baseados em inteligência artificial de aprendizado de máquinas, como redes neurais artificiais e lógica fuzzy.

Ainda se pode destacar, de forma pontual, o possível desenvolvimento de uma interface amigável e esteticamente agradável do algoritmo com o usuário, a partir de um software.

Enfim, ao concluir esta Tese, os objetivos propostos foram atingidos, as contribuições da pesquisa foram evidenciadas e os possíveis trabalhos futuros foram apresentados.

6.2 PUBLICAÇÕES

Na Tabela 6.1, os artigos submetidos e publicados relacionados a esta Tese são apresentados.

Tabela 6.1. Artigos relacionados ao trabalho. (Fonte: autoria própria)

Artigos	Autores	Títulos	Revista/Evento	Ano
Submetidos	BRITO, K. B. COSTA, E. G. FLORENTINO, M. T. B. DIAS, B. A. LIRA, G. R. S.	<i>Development of DIP-based Algorithm for Extraction of UV Video Attributes from Corona Discharges on Polymeric Insulators</i>	International Journal of Electrical Power and Energy Systems	2021
	DIAS, B. A. COSTA, E. G. BRITO, K. B. SOUZA, J. P. C. LEITE NETO, A. F. FLORENTINO, M. T. B.	<i>Technical Management of Polymeric Insulators with Machine Learning</i>	International Journal of Electrical Power and Energy Systems	2021
Publicados	BRITO, K. B. COSTA, E. G. FLORENTINO, M. T. B. DIAS, B. A.	Efeito de Poluição Salina em Atributos Extraídos de Vídeos UV de Isolador Polimérico de 230 kV com Perfuração no Revestimento	3rd IWADA	2019
	BRITO, K. B. COSTA, E. G. 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. BRITO, K. B. DIAS, B. A. OLIVEIRA, R. G. D. GERMANO, A. D.	<i>Proposal and Evaluation of a Technique Based on Ultrasound for Composite Insulator Monitoring.</i>	20th ISH	2017
	BRITO, K. B. COSTA, E. G. OLIVEIRA NETO, A. B. FLORENTINO, M. T. B. DIAS, B. A. FERREIRA, T. V.	<i>Attribute Extraction and Sensitivity Analysis for Classification of Polymeric Insulators Ultraviolet Images</i>	20th ISH	2017

REFERÊNCIAS

AI, J.; JIN, L.; ZHANG Y.; TIAN, Z.; DUAN, W. **Detecting Partial Discharge of Polluted Insulators Based on Ultraviolet Imaging**. In: 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). IEEE p. 456-459, 2015.

ALBANO, M.; HADDAD, A.; GRIFFITHS, H.; WATERS, R. T.; HICKS, Y. A.; SARATHI, R. **Dry-band and discharge activity characterization using visual and IR data analysis**. In: 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, IEEE, Poznan, Poland, 8-11 Sept. 2014.

ANDRADE, D. R. R. **Termografia Aplicada na Manutenção Preditiva de Sistemas Elétricos** RIT. Revista Inovação Tecnológica Volume 5, número1 – 2015 ISSN: 2179-2895.

ANJUM, S.; JAYARAM, S.; EL-HAG, A.; NADERIAN, A. **Radio Frequency (RF) Technique for Field Inspection of Porcelain Insulators**. In: 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Sydney, NSW, 2015, pp. 1019-1022.

BARROS, W. P. P. **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Junho de 2011. 82 f.

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

BATISTA, L. V. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Nota de Aula, 2005. Disponível em <<http://www.di.ufpb.br/leonardo/pdi/PDI2005.pdf>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2015.

BOLOGNA, F.; MAHATHO, N.; HOCH, D. A. **Infra-Red and Ultra-Violet Imaging Techniques Applied to The Inspection of Outdoor Transmission Voltage Insulators**. IEEE Africon, p. 593-598, 2002.

BRITO, K. B. **Extração de Atributos de Descargas de Imagens Ultravioletas de Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Março de 2017. 82 f.

BRUCE, G. P.; ROWLAND, S. M.; ROBERTSON, J. **A Technique for the Optical Detection and Analysis of Dry Band Arcs on a Composite Insulator**. In: Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, p. 220-223, 2008.

BURGER, W.; BURGE, M. J.; **Digital Image Processing. An Algorithmic Introduction Using Java**, Springer, 2ª Edição, 2016.

BURNHAM, J. T.; WAIDELICH, R. J. **Gunshot damage to ceramic and nonceramic insulators**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, nº 4, p. 1651-1656, 1997.

COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; NERI, M. G. G.; GERMANO, A. D. **Characterization of Polymeric Insulator Using Thermal and UV Imaging Under Laboratory Condition**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, nº 4, p. 985-992, August 2009.

DATAVIZCATALOGUE. **The Data Visualisation Catalogue**. Disponível em: <https://datavizcatalogue.com/methods/radar_chart.html>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

DIRECT INDUSTRY. **Inspection Camera/ Corona and Arcing Detection/ Visible/ UV**. Disponível em <<https://www.directindustry.com/prod/ofil-ltd/product-65565-689709.html>> Acesso em: 28 de agosto de 2019.

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.

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

FANGCHENG, L.; WANG, S.; HEMING, L. **Insulator Pollution Grade Evaluation Based on Ultraviolet Imaging and Fuzzy Logic Inference**. In: IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. p. 1-4, 2010.

FERNANDO, M. A. R. M.; GUBANSKI, S. M. **Leakage Current Patterns on Artificially Polluted Composite Insulators**. In: Proc. IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, CA, 1996, pp. 394-397.

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

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, p. 583-589, 2012.

FLIR. **Câmeras de Infravermelho com Msx® FLIR E5**. Disponível em: <<https://www.flir.com.br/products/e5/>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

FLORENTINO, M. T. B. **Caracterização das Condições Operacionais de Isoladores Poliméricos Usando Atributos das Descargas Corona**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Setembro de 2019. 151 f.

FLORENTINO, M. T. B. **Análise de Sensibilidade do Método dos Vetores de Energia dos Centroides das Sub-bandas Espectrais Aplicado ao Monitoramento de Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Agosto 2015.

FLORENTINO, M. T. B.; COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V. **Processamento de Imagem Ultravioleta e Visível de Isoladores Poliméricos**. In: Decimoséptimo Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, mayo de 2017.

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, vol.19, no.3, pp.49-56, 2019.

GARCIA, R. W. S.; GONZALEZ, E. G.; MELLO, D. R.; PAIVA, P. L. S.; MACIEL, D.; FERREIRA L. F. P.; COSTA, E. G. **Desenvolvimento de Metodologia para Monitoração de Isoladores Poliméricos**. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Curitiba - PR, 16 a 21 de outubro de 2005.

GIANELLI, B. F. **Caracterização do Efeito Corona em Isoladores Poliméricos do Tipo Bastão Submetidos à Poluição Salínica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências, Bauru, 2008. 82 f.

GILL, P. **Electrical Power Equipment Maintenance and Testing**. CRC Press – 2ª edição, pg. 39, 2008.

GONZALEZ, R.; WOODS, P. **Digital Image Processing**. Prentice Hall, 2ª edição. 2002.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. Phoenix, Arizona, 1999.

GUEDES, C. P. G. **Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Julho de 2015. 88 f.

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: The International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015.

HACKAM, R. **Outdoor HV Composite Polymeric Insulators**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 6, no. 5, pp. 557-585, Outubro de 1999.

HALL, J. F. **History and Bibliography of Polymeric Insulators of outdoor Applications**. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 8, no.1, pp. 376-385, Janeiro de 1993.

HALLIDAY, D. RESNICK, J. W. **Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna**. 8ª Edição, LTC, pp. 2, Rio de Janeiro, 2009.

JÄHNE, B. **Digital Image Processing**. Springer-Verlag, 5ª edição, 2002.

JIANG, Y.; MCMEEKIN, S. G.; REID, A. J.; NEKAHI, A.; JUDD, M. D.; WILSON, A. **Monitoring Insulator Contamination Level Under Dry Condition with a Microwave Reflectometer**, In: 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Sydney, NSW, Australia, pp. 959-962, 2015.

JIN, L; AI, J; TIAN, Z; GAO, K.; HUANG, H. **Pollution State Detection of Insulators Based on Multisource Imaging and Information Fusion**. In: 2016 IEEE International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2016.

JIN, L; AI, J.; ZHANG, Y. **Detection of Polluted Insulators Using the Information Fusion of Multispectral Images**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 24, No 6, December 2017.

KIM, Y.; SHONG, K. **Measurement of Corona Discharge on Polymer Insulator through the UV rays Sensor including Optical Lens**. In: 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-7, 2010.

KIM, Y.; SHONG, K. **The Characteristics of UV Strength According to Corona Discharge from Polymer Insulators Using a UV Sensor and Optic Lens**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 26 no. 3, p. 1579-1584, 2011.

KRZMA, A. S., ALBANO, M. HADDAD, A. **Comparative Performance of 11kV Silicone Rubber Insulators using Artificial Pollution Tests** In: 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), IEEE, Stoke on Trent, United Kingdom, Sept 1-4, 2015.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering Fundamentals**. 2ª Edição, 2010.

LAPP INSULATORS. **Composite Insulators. Rodurflex Suspension Insulators**. Disponível em <<https://www.lappinsulators.com/products/composite-insulators/rodurflex-suspension-insulators/?L=2>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

LAPP INSULATORS. **Porcelain Insulators. Long Rod Insulators**. Disponível em <<https://www.lappinsulators.com/products/porcelain-insulators/long-rod-insulators/?L=2>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

LAPP INSULATORS. **Rodurflex High-voltage Insulators**. Disponível em <<http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2015.

LI, H.; DAI, R.; LI, M.; LÜ, F. **Insulator Ultraviolet Discharge Feature Extraction based on Level Set**, In: 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, China, pp. 2283-2286, 2011.

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J. M.; PHILLIPS, A. J. **Daylight Corona Discharge Imager**. In: High Voltage Engineering Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467), Vol. 4, pp 349 – 352, August 1999.

LUNDGAARD, L. E. **Acoustic Partial Discharge Detection - Fundamental Considerations**. IEEE Electrical Insulation Magazine, n. August, p. 25–31, 1992.

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: IEEE Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. Pg 253-259, 2006.

MARIA, L. G. F. **Processamento Digital de Imagens**. Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Junho de 2000.

MASCARENHAS, N. A.; VELASCO, F. R. D. **Processamento Digital de Imagens**. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. Instituto de Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE). Janeiro de 1989.

MATOS, M.A.C.C. **Conceitos Úteis - Normalização**. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~mam/normetr.pdf>> Acesso em 28 de agosto de 2019.

NASSER, E. **Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics**. Wiley-Interscience, New York, 1971.

NERI, M. G. G. **Avaliação de Técnicas de Monitoramento e Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Junho de 2005. 71 f.

NIGRI, A. I. **Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção**. In: (XVSNPTEE) Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, 1999.

OFIL LTD. **Daycor®II, The Most Advanced Daytime Corona Imager**, The Indispensable Predictive Maintenance Tool to Enhance Electrical Utility Reliability, 2003.

OFIL SYSTEMS. **What Is Corona?** Disponível em: <<http://www.ofilsystems.com/technology/corona.html>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

OKABE, A.; BOOTS, B.; SUGIHARA, K.; CHIU, S. N. **Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams**, 2nd Edition, Julho 2000.

OLIVEIRA NETO, A. B.; BRITO, K. B.; DIAS, B. A.; COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V. **Attribute Extraction for Automatic Classification of Polymeric Insulators Based**

on Ultraviolet Imaging. In: The International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015.

OTSU, N. **A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms,** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. SMC 9, n. 1, p. 62-66, 1979.

PIGINI, A. **HV composite insulators: Market size & reliability.** Disponível em <<http://www.inmr.com/composite-insulators-market-size-reliability/>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2016.

PINNANGUDI, B.; GORUR, R. S.; KROESE, A. J. **Quantification of Corona Discharges on Nonceramic Insulators.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 12 no. 3, p. 513-523, 2005.

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

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 Vol. 24, No. 1; February 2017.

PRASAD, D. S.; REDDY, B. S. **Study on Corona Activity Using an Image Processing Approach.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 53, n. 4, p. 4008-4014, 2017b.

QUEIRÓS, J. P. M. **Análise Comparativa do Comportamento Dielétrico dos Isoladores Poliméricos com Isoladores em Materiais Convencionais.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2013.

RAMIREZ, I.; HERNANDEZ, R.; MONTOYA, G. **Measurement of Leakage Current for Monitoring the Performance of Outdoor Insulators in Polluted Environments,** in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 4, pp. 29-34, July-August 2012.

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

ROCHA, P. H. V.; COSTA, E. G.; SERRES, A. R.; XAVIER, G. V. R.; 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, Volume 113, Pages 355-361, 2019.

SCHNEIDER, B. O. **Apostila de Computação Gráfica.** Departamento de Ciência da Computação. Universidade Federal de Lavras. Agosto de 2001.

SHONG, K.; KIM, Y.; KIM, S. **Images Detection and Diagnosis of Corona Discharge on Porcelain Insulators at 22.9kV D/L.** In: 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. p. 462-466, 2007.

SOARES, F. A. A. M. N. **Processamento Digital de Imagens.** Capítulo 2. Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 2012. 35 slides. Apresentação em Power-point.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentals of Digital Image Processing. A practical approach with examples in Matlab.** Wiley-Blackwell, 1ª edição. 2011.

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

SOUZA, A. L.; LOPES, I. J. S. **Experimental Investigation Of Corona Onset in Contaminated Polymer Surfaces.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 22, n. 2, p. 1321–1331, 2015.

SOUZA, A. L.; LOPES, I. J. S. **Experimental Investigation of Corona Onset in Contaminated Polymer Insulators.** In: The International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015.

SOUZA, B. A. D. E. **Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Fevereiro de 2016. 114 f.

SPRING, G.; CAMARA, R. C. M.; SOUZA, U. M.; FREITAS, J. G. **Integrating Remote Sensing and GIS by Object Oriented Data Modeling.** Computers & Graphics, 1996, pp. 395-403.

STRI. **Guide 5 - Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators,** STRI, Ludvika, Sweden. 2005.

VITELLI, M.; TUCCI, V.; PETRARCA, C. **Temperature Distribution Along an Outdoor Insulator Subjected to Different Pollution Levels.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n. 3, p. 416–423, 2000.

VOSLOO, W.L., HOULZHAUSEN, J. P. **The Prediction of Insulator Leakage Currents from Environmental Data.** Science, v. 327, n. 5969, p. 1082–1082, 2002.

VOSLOO, W. L.; MACEY, R. E.; TOURREIL, C. DE. **The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators.** South Africa: Crown Publications, 2008.

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. Vol. 21, no. 4, pp. 1697-1704, August 2014.

XU, R.; MA, L.; HU, B.; MA, H.; TAO, B. **Intelligent High-Voltage Discharge Fault Detection and Its Diagnosis Methods Based on ANN,** In: 2011 2nd International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing, Wuhan, China, pp. 119-122, 2011.

XUEWEN, L.; LIJUN, J.; ZHIYUAN, X.; TAO, J.; HAIFENG, J. **Surface Discharge Detection Method of Contaminated Insulators Based on Ultraviolet Images'**

Parameters. In: 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, Xi'an, China, 2017.

YI, L.; YANG, W.; JUN, H.; LIAN, D., WENZHI, C.; JIANGANG, B. **Research on Detection Method for Spatial Discharge of High Voltage Electrical Equipment based on Ultraviolet Monitoring Video.** In: IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, 2017.

YONG, Y.; CHUYAN, Z.; ZHENGYING, C.; LIMING, W. **Effect of Surface Aging on UV Intensity Characteristics for long-term energizes conductors of HVDC transmission lines.** In: IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Chengdu, China, September 2016.

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, vol. 23, no. 3, pp. 1597-1604, June 2016.

ZHOU, W.; LI, H.; YI, X.; TU, J.; YU, J. **A criterion for UV detection of AC corona inception in a rod-plane air gap.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 18, no. 1, pp 232 - 237, 2011.

ZHOU, W.; WU, J.; MAO, M.; MA, B.; YI, X. **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.

ANEXOS

- I. GUIA DE ENSAIO: MONITORAMENTO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM COMPONENTES DE ALTA TENSÃO SOB ENSAIOS DE LABORATÓRIO E MEDIÇÕES EM CAMPO

- II. MODELO EM BRANCO E EXEMPLO PREENCHIDO DE ATA DE ENSAIO/MEDIÇÃO

ANEXO I

GUIA DE ENSAIO: MONITORAMENTO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM COMPONENTES DE ALTA TENSÃO SOB ENSAIOS DE LABORATÓRIO E MEDIÇÕES EM CAMPO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

GUIA DE ENSAIO

MONITORAMENTO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM
COMPONENTES DE ALTA TENSÃO SOB ENSAIOS DE
LABORATÓRIO E MEDIÇÕES EM CAMPO

AUTORES:

PROF. KAL-EL BASÍLIO BRITO, M. SC.

PROF. BRUNO ALBUQUERQUE DIAS, M. SC.

PROF. MARCUS TULIUS BARROS FLORENTINO, D. SC.

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA, BRASIL

2021

SUMÁRIO

1. Propósito do Documento	3
2. Câmera UV	4
3. Procedimentos de Segurança	6
4. Material Utilizado	9
5. Descrição de Ensaio	11
5.1. Pré-operação do Ensaio	11
5.2. Operação do Ensaio	15
5.3. Finalização do Ensaio	17
5.4. Considerações sobre Medições em Campo	18
6. Diagrama de Metodologia de Ensaio	19
Referências	21

1. PROPÓSITO DO DOCUMENTO

O propósito deste documento é registrar os procedimentos necessários para a captação da radiação ultravioleta (UV) emitida por componentes submetidos a alta tensão. O emprego de uma câmera sensível às emissões de radiação ultravioleta é roteirizado para os ensaios de laboratório e para as medições em campo.

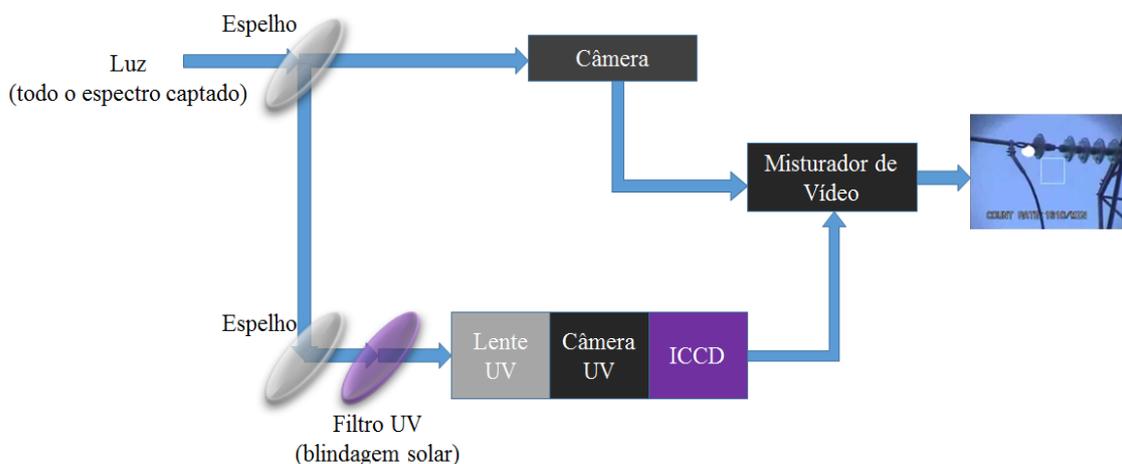
O documento é composto de seis seções, sendo esta a primeira. Na segunda seção, as especificações técnicas da **Câmera UV** são apresentadas. Na terceira seção, os **Procedimentos de Segurança** adotados (baseados na NR10) são apresentados. A quarta seção contém o **Material Utilizado**. Na quinta seção é apresentada a **Descrição de Ensaio**. Na sexta e última seção um **Diagrama Metodológico** é apresentado, sintetizando o roteiro do guia.

O guia também conta, em anexo, com a **Ata de Ensaio/Medição**. A ata é um documento auxiliar de aplicação prática, na qual as informações do ensaio ou medição são informadas.

2. CÂMERA UV

A câmera UV é o instrumento que capta a radiação UV emitida no intervalo do espectro luminoso entre **240 e 280 nm** (região de blindagem solar). Apesar de ser uma faixa de comprimento de onda em que a intensidade de emissão ultravioleta do efeito corona é relativamente menor, é justamente a faixa em que a radiação UV proveniente do sol é filtrada pela camada de ozônio. Deste modo, não há dúvida entre a radiação ultravioleta proveniente do efeito corona no componente de alta tensão e a radiação ultravioleta solar, permitindo que inspeções possam ser realizadas durante o dia (LINDNER *et al.*, 1999). Na Figura 2.1 é possível verificar, de forma básica, o princípio de funcionamento da câmera UV. As câmeras internas ao instrumento são projetadas para que se registrem o **signal no espectro visível** e a **manifestação da radiação UV** em uma mesma imagem. Com a possibilidade de exibição separada ou de forma conjunta, permitindo assim a localização do ponto onde ocorre a manifestação UV (LINDNER *et al.*, 1999).

Figura 2.1. Princípio de funcionamento da câmera UV. (Fonte: adaptado de LINDNER, 2004)



A câmera UV possui uma detecção mínima de descarga de 1,5 pC a 2 pC para a distância de oito metros e pode ser utilizada para medir descargas corona a, no mínimo, três metros e, no máximo, cem metros de distância, com boa relação sinal ruído (OFIL LTD, 2003). Além disso, a câmera dispõe de um sistema de contagem de fótons por minuto e possibilita a variação do ganho de imagem UV de 0 a 250 em passos de 10. O aumento do ganho intensifica a manifestação visual correspondente à radiação ultravioleta. Em contrapartida, o ganho também amplifica o ruído ambiente.

Antes de realizar qualquer atividade relacionada à eletricidade, ainda mais em alta tensão, é necessário observar todos os procedimentos de segurança. A seção sobre procedimentos de segurança é apresentada a seguir.

3. PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA

Com relação aos procedimentos de segurança, o documento imprescindível e norteador para as atividades deste guia é a **Norma Regulamentadora nº10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade (NR10)** e, em especial, o item 10.7 que versa sobre **Trabalhos Envolvendo Alta Tensão (AT)**.

Todas as pessoas envolvidas nas atividades apresentadas neste guia devem ser **capacitadas** por profissionais habilitados no (i) curso básico: Segurança em instalações e serviços com eletricidade e no (ii) curso complementar: Segurança no sistema elétrico de potência (SEP) e em suas proximidades. As pessoas também devem ser **autorizadas** à realização das atividades.

Em princípio as ações preventivas de controle do risco devem ser adotadas por meio de medidas de proteção coletiva. As medidas de proteção coletiva são:

- i. Assegurar a desenergização dos componentes, quando em laboratório.
- ii. Delimitar quais são ou serão os pontos energizados, a zona de risco, a zona controlada e a zona livre da realização da atividade.
- iii. Garantir a isolação das partes energizadas e o aterramento das massas.
- iv. Colocar barreiras, obstáculos e sinalização antes da zona controlada.
- v. Considerar o uso dos seguintes itens: coletes reflexivos, fitas de demarcação reflexivas, coberturas isolantes, cones de sinalização (75 cm, com fitas reflexivas), conjuntos para aterramento temporário e detectores de tensão para baixa tensão (BT) e alta tensão (AT).

Na Figura 3.1, destacam-se as distâncias no ar que delimitam radialmente as zonas de risco (ZR), as zonas controladas (ZC) e as zonas livres (ZL) com relação aos pontos energizados (PE). Ressalta-se também a influência de uma superfície isolante. De forma complementar à Figura 3.1, na Tabela 3.1, os raios de delimitação das ZR, ZC e ZL são apresentadas para as faixas de tensão nominal da instalação elétrica.

Figura 3.1. Distâncias no ar que delimitam radialmente as zonas de risco e as zonas controladas (a) sem e (b) com a interposição de uma superfície isolante (SI) (Fonte: NR10, 2014).

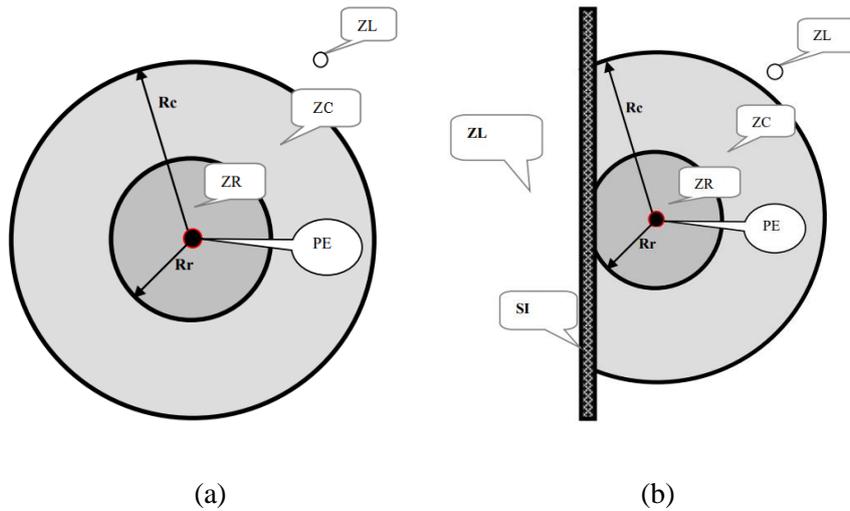


Tabela 3.1. Raio de delimitação das zonas de risco, zonas controladas e zonas livres para as faixas de tensão nominal da instalação elétrica (Fonte: adaptada da NR10, 2014).

Faixa de Tensão Nominal da Instalação Elétrica (kV)	Raio de delimitação entre zona de risco e zona controlada – R_r (m)	Raio de delimitação entre zona de controlada e zona livre – R_c (m)
< 1	0,20	0,70
= 1 e < 3	0,22	1,22
= 3 e < 6	0,25	1,25
= 6 e < 10	0,35	1,35
= 10 e < 15	0,38	1,38
= 15 e < 20	0,40	1,40
= 20 e < 30	0,56	1,56
= 30 e < 36	0,58	1,58
= 36 e < 45	0,63	1,63
= 45 e < 60	0,83	1,88
= 60 e < 70	0,90	1,90
= 70 e < 110	1,00	2,00
= 110 e < 132	1,10	3,10
= 132 e < 150	1,20	3,20
= 150 e < 220	1,60	3,60
= 220 e < 275	1,80	3,80
= 275 e < 380	2,50	4,50
= 380 e < 480	3,20	5,20
= 480 e < 700	5,20	7,20

Vale salientar que as atividades de alta tensão não podem ser realizadas individualmente e que a equipe responsável pela atividade deve possuir equipamentos que permitam a comunicação permanente entre si.

Por considerar as medidas de proteção coletiva insuficientes e, para além disso, promover a redundância de proteção, equipamentos de proteção individual (EPI) específicos e adequados às atividades desenvolvidas também devem ser adotados. Os EPIs são apresentados de acordo com o disposto na NR10, também baseando-se na **Norma Regulamentadora nº6: Equipamento de Proteção Individual - EPI (NR06)**. Os EPI são:

- i. Cintos de segurança para eletricitista, com talabarte ou trava-quedas (quando realizar intervenções em altura).
- ii. Capacete para proteção contra impactos de objetos sobre o crânio e para proteção contra choques elétricos.
- iii. Botas com proteção contra choques elétricos, bi-densidade, sem partes metálicas.
- iv. Óculos de segurança para proteção contra impacto de partículas volantes, intensos raios luminosos ou poeiras, com proteção lateral.
- v. Protetores faciais contra impacto de partículas volantes, intensos raios luminosos ou poeiras.
- vi. Braçadeiras ou mangas de segurança para proteção do braço e antebraço contra choques elétricos.
- vii. Luvas de cobertura para proteção.
- viii. Bolsas para içamento de ferramentas, quando necessário.

Destaca-se, também, como medida de proteção individual, o uso de vestimentas adequadas às atividades. Deve-se observar a condutibilidade do próprio tecido das roupas e evitar peças metálicas como fivelas, botões, rebites e fechos. Deve-se também observar a inflamabilidade das vestimentas evitando alguns tecidos sintéticos. Além disso é vedado o uso de adornos pessoais nas atividades como gravatas, anéis, pulseiras e cordões.

Apresentados os Procedimentos de Segurança, o Material Utilizado (além do material relativo a segurança) é apresentado a seguir.

4. MATERIAL UTILIZADO

Inicialmente, é apresentado o material utilizado, item a item, conjuntamente a uma descrição. Na Tabela 4.1, é apresentada a descrição simplificada dos itens utilizados para ensaios de laboratório e medições em campo, destacando sua importância para as atividades descritas no guia.

Tabela 4.1. Descrição simplificada do material para realização de ensaios em laboratório e medições em campo.

Item	Descrição simplificada
Objeto de teste	Equipamento ou componente de alta tensão a ser estudado tanto em ensaios em laboratório quanto em medições em campo. Por exemplo: isoladores, buchas, disjuntores e para-raios.
Câmera UV	Instrumento que realiza a captura das emissões de radiação UV para ensaios em laboratório e medições em campo.
Placa de captura de vídeo	Componente de <i>hardware</i> que permite transferir arquivos de áudio e vídeo diretamente da câmera UV para o computador portátil. Necessário para ensaios em laboratório e medições em campo.
Computador portátil	Computador facilmente transportável para armazenamento dos vídeos UV. Necessário para ensaios em laboratório e medições em campo.
Circuito do gerador de alta tensão (AT) e bancada de controle	Equipamentos responsáveis por aplicar os níveis de tensão adequados ao objeto de teste. Necessário apenas em ensaios em laboratórios uma vez que em medições em campo, a linha ou subestação estão energizadas.
Barômetro	Instrumento utilizado para medir a pressão atmosférica. Necessário para controle e registro das condições de ensaio em laboratório ou medições em campo.
Termo-higrômetro	Instrumento utilizado para medir a temperatura e umidade relativa do ar. Necessário para controle e registro das condições de ensaio em laboratório ou medições em campo.
Bateria e inversor de frequência	Fonte de energização dos instrumentos e componentes utilizados nas atividades. Normalmente necessário em medições de campos, visto que em laboratórios há acesso a tomadas.
Extensões de tomadas	Conexão entre fonte de energização e os instrumentos e componentes utilizados nas atividades. Normalmente necessário em ensaios em laboratórios e em medições de campos.
Plataforma e/ou andaime	Estrutura para elevar a câmera UV, melhorando o ângulo de captura dos vídeos. Normalmente empregado em ensaios em laboratório e inviáveis para aplicação em medições em campo.
Equipamento de comunicação	Equipamento responsável por manter o contato entre a equipe que realiza as atividades. Necessário para ensaios em laboratório e medições em campo.
Tripé e/ou suporte da câmera UV	Estrutura para melhorar o posicionamento e estabilizar a câmera UV na captura dos vídeos. Normalmente empregado em ensaios em laboratório e em medições em campo.

Na Tabela 4.2, todos os itens listados são classificados de acordo com o tipo de atividade realizada (**ensaio em laboratório** ou **medição em campo**) e com a necessidade do material. O material pode ser classificado como **essencial** (ou seja, é indispensável para realização da atividade) ou como material **circunstancial** (ou seja, tem aplicação dependente da disponibilidade ou das condições específicas do local de realização da atividade).

Tabela 4.2. Material para realização de ensaios laboratório e medições em campo.

Item	Ensaio em laboratório		Medição em campo	
	Essencial	Circunstancial	Essencial	Circunstancial
Objeto de teste				
Câmera UV				
Placa de captura de vídeo				
Computador portátil				
Circuito do gerador de alta tensão (AT) e bancada de controle			Não aplicável	
Barômetro				
Termo-higrômetro				
Bateria e Inversor de frequência				
Extensões de tomadas				
Plataforma/andaime				
Equipamento de Comunicação				
Tripé e/ou suporte da câmera UV				

A partir da compreensão do material a ser utilizado em ensaios de laboratório e medições em campo, pode ser apresentada a Descrição de Ensaio a seguir.

5. DESCRIÇÃO DE ENSAIO

A descrição do ensaio é realizada em um contexto de laboratório, ou seja, um ambiente controlado em que os procedimentos de segurança são relativamente controláveis e se tem à mão todo o material necessário para realizar as atividades. Ao fim da seção, as considerações para os procedimentos de medições em campos são expostos em comparação aos procedimentos laboratoriais.

Os métodos de ensaio são descritos de forma roteirizada e divididos em três momentos: (i) **pré-operação**, (ii) **operação** e (iii) **finalização** do ensaio. Esta divisão é proposta para facilitar e simplificar a verificação de etapas durante o ensaio.

5.1. PRÉ-OPERAÇÃO DO ENSAIO

A pré-operação do ensaio consiste na verificação de seis etapas:

- (i) identificação das informações gerais do ensaio,
- (ii) identificação da equipe executora das atividades,
- (iii) registro dos procedimentos de segurança,
- (iv) adequação do material,
- (v) registro e controle do ensaio ou medição e
- (vi) parametrização da câmera UV.

Todos estes itens devem ser preenchidos na ata de ensaio/medição.

A **identificação das informações gerais do ensaio** é feita designando:

- Responsável técnico: pessoa responsável pela coordenação geral do ensaio ou da medição, normalmente chefe de manutenção, professor de laboratório ou pesquisador sênior.
- Local de realização: ambiente de realização do ensaio ou medição, podendo ser as dependências de um laboratório, uma torre de alta tensão ou uma subestação.
- Data: dia, mês e ano da realização do ensaio ou medição.
- Descrição do procedimento: descrição sucinta do que será realizado, normalmente informando qual é o tipo do objeto de teste e qual é o nível da tensão (em kV) aplicada.

- Identificação do objeto teste: identificação individual que permite distinguir facilmente o objeto de teste em um conjunto ou em um lote, podendo também adicionar observações específicas como: nível de desgaste ou tipo de poluição.
- Registro do vídeo UV: nome com o qual o vídeo gravado com a câmera UV será registrado.

Na **identificação da equipe executora das atividades** são nomeadas as pessoas responsáveis por cada tarefa específica.

- Operador de câmera UV: pessoa responsável por operar a câmera UV, efetuar as filmagens e salvar os vídeos gravados no computador portátil.
- Operador de bancada: pessoa responsável por operar a bancada, aplicando os níveis de tensão necessários ao objeto de teste.
- Auxiliares: pessoas responsáveis pelo o auxílio das atividades realizadas pelo operador de câmera UV e pelo operador de bancada, podendo inclusive substituí-los caso de necessidade. A participação de pelo menos um auxiliar é mandatória, sendo previstos até três auxiliares na ata de ensaio/medição.

Ressalta-se que além dos nomes dos membros da equipe executora também é registrado seu cargo ou sua ocupação. Por exemplo: supervisor, encarregado ou técnico de uma empresa ou ainda professor ou aluno de um instituto de pesquisa.

No **registro dos procedimentos de segurança**, os itens apresentados na seção 2 para medidas de proteção coletiva e medidas de proteção individual são verificados. A ata de ensaio/medição permite que seja assinalado se o procedimento está em conformidade, marcando-se a coluna 'Ok' ou se o procedimento não é aplicável, marcando-se a coluna 'NA'. Um exemplo de procedimento NA seria o uso de cinto de segurança com trava-quedas em ensaio de laboratório no qual não seja necessário trabalho em altura.

Na **adequação do material**, os itens apresentados na seção 3 para a realização do ensaio em laboratório ou da medição em campo são verificados. A ata de ensaio/medição permite que seja assinalado se o item está disponível, marcando-se a coluna 'Ok', ou se não é aplicável ou não está disponível, marcando-se a coluna 'NA'. Um exemplo de item NA que não seria aplicável é o gerador de AT e bancada de controle em medições em campo, onde a linha de transmissão já está energizada. Um exemplo de item NA que poderia não estar disponível seria o tripé da câmera UV em um ensaio em laboratório.

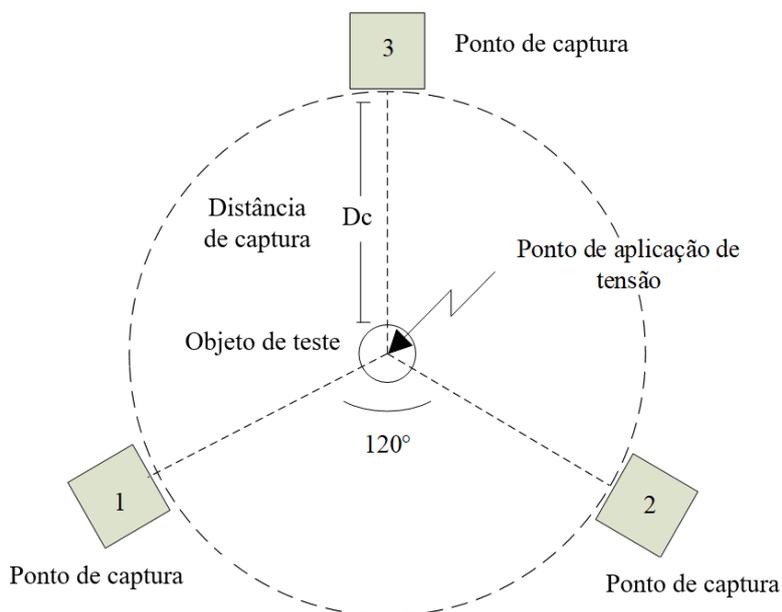
No **registro e controle do ensaio ou medição** são registradas as informações relativas à hora de início da atividade, à temperatura ambiente, à pressão atmosférica e à umidade relativa do ar (URA). Além disso é registrado o nível de tensão da atividade e as informações de raio de risco (Rr), raio de controle (Rc) e distância de captura da câmera UV (Dc). Deve-se observar por questões de segurança que $Rr < Rc < Dc$.

Na **parametrização da câmera UV**, deve-se registrar o modelo e fabricante da câmera UV, o ganho aplicado e o tempo de captação do vídeo.

A verificação das seis etapas da preparação do ensaio é auxiliada pelo preenchimento da ata de ensaio/medição pela equipe executora da atividade.

Ainda no contexto da preparação do ensaio, na Figura 5.1, uma disposição espacial genérica para o ensaio em laboratório ou medição em campo é apresentada. Três pontos de captura são apresentados com distâncias angulares iguais entre si (espaçadas de 120°). Sugere-se que objeto de teste seja filmado por três ângulos distintos a fim de registrar toda sua superfície. Recomenda-se também que cada captação possua uma ata própria, visto que as condições de ensaio para cada vídeo registrado podem ser distintas.

Figura 5.1. Disposição espacial de genérica.

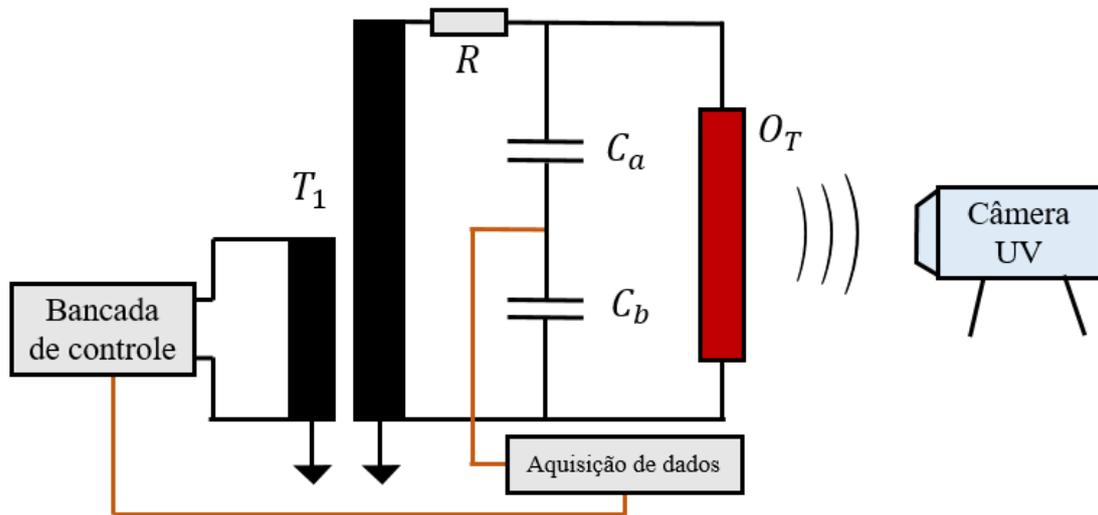


Destaca-se que durante a pré-operação do ensaio em laboratório ou medição em campo pode-se fotografar o ambiente. As fotos podem ser adicionadas como anexo da própria ata de ensaio/medição, especialmente no caso de realização de medições em

campo em que a disposição espacial pode ser irregular e não seguir a proposta da Figura 5.1.

Ainda na pré-operação do ensaio é necessário compreender o esquema de circuito do gerador de AT comumente utilizado em laboratório, conforme apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2. Esquema do circuito do gerador de alta tensão para as medição e aquisição de dados.



No esquema do circuito da Figura 5.2, são apresentadas a bancada de controle, o transformador T_1 , o divisor capacitivo, representado pelos capacitores C_a e C_b , R e a resistência limitadora de corrente, o objeto de teste O_T , a aquisição de dados (responsável pela verificação do nível de tensão aplicado) e a câmera UV. O circuito esquematizado funciona de modo que a bancada de controle é responsável por manter os níveis de tensão no objeto de teste com o auxílio do divisor de tensão capacitivo e da aquisição de dados. O transformador T_1 é alimentado por uma subestação externa e eleva a tensão para os níveis adequados ao experimento. O objeto de teste O_T é filmado pela câmera UV.

Finalmente, a partir da compreensão dos procedimentos que devem ser efetuados na pré-operação do ensaio, da disposição espacial genérica do objeto teste e da câmera UV e do esquema do circuito do gerador de AT para ensaios em laboratório, pode-se apresentar os procedimentos para a Operação do Ensaio a seguir.

5.2. OPERAÇÃO DO ENSAIO

A realização do ensaio consiste em efetivar o **monitoramento de radiação UV no componente de alta tensão**. Para tanto é exposta uma descrição temporal do que cada membro da equipe executora deve realizar. Isto posto, é indicada a presença de pelo menos três responsáveis: o **operador de câmera UV**, o **operador de bancada** e o **auxiliar**.

Inicialmente, antes de efetivar a energização do circuito, todos devem assumir seus postos e se prepararem para a realização do ensaio. O **operador de câmera UV** assume o posto em um dos pontos de captura (conforme Figura 5.1). O **operador de bancada** assume o posto na própria bancada do gerador AT e o **auxiliar** se posiciona onde melhor convier, normalmente junto a um dos operadores. Inicialmente, o **auxiliar** retira a vara de manobra do transformador (a vara é uma medida redundante de proteção que aterriza o transformador).

O **operador de bancada** eleva a tensão no circuito, energizando o objeto de teste na tensão prevista para o ensaio. Destaca-se que para ensaios à tensão nominal de componentes provenientes da rede trifásica deve-se considerar a tensão fase-terra, ou seja: $V_{ensaio} = V_{nom}/\sqrt{3}$, em que V_{ensaio} é a tensão de ensaio e V_{nom} é a tensão nominal.

Após a energização do circuito, o **operador de câmera UV** realiza uma aquisição de vídeo inicial, SEM registrar a radiação UV, por aproximadamente 10 segundos. Na câmera UV, a aquisição de vídeo sem radiação UV é feita selecionando-se apenas o modo de captura de imagem na faixa de luz visível. A aquisição de vídeo inicial é utilizada, posteriormente, no processamento digital dos vídeos.

Após a aquisição de vídeo inicial, em função do tipo de ensaio que se pretenda realizar, pode ser necessário aguardar algum tempo, mas, logo após isso, o **operador de câmera UV** realiza outra aquisição de vídeo registrando APENAS a radiação UV, durante 60 segundos. Na câmera UV, a aquisição de vídeo com apenas a radiação UV é feita selecionando-se o modo de captura da imagem na faixa do ultravioleta.

Concluído estes procedimentos, o **operador de bancada** desenergiza o circuito e o auxiliar garante o aterramento do transformador com a vara de manobra aterrada.

De modo a garantir vídeos com padrão de qualidade aceitável, o responsável técnica (indicado na ata de ensaio/medição) avalia se os vídeos registrados são adequados ou não. Caso os vídeos sejam avaliados como adequados o **operador de câmera UV** se desloca até um ponto de captura que ainda não foi registrado, caso contrário, orientado

pelo responsável técnico, analisa quais parâmetros podem ser ajustados e volta ao ponto de captura que se encontrava antes.

A avaliação do vídeo é de caráter heurístico, devendo observar se o tempo de captação foi suficiente e se não houve movimentações consideráveis da câmera UV ou do objeto teste.

Desta forma, todos retomam os seus postos e se repetem todos os procedimentos descritos até então. A realização do ensaio é concluída apenas quando os vídeos de todos os pontos de captura sejam avaliados como adequados. Todas as mudanças de parâmetros realizadas devem ser registradas nas observações da ata de ensaio/medição. Finalmente, uma vez que os vídeos obtidos pela câmera UV sejam adequados o ensaio pode ser finalizado.

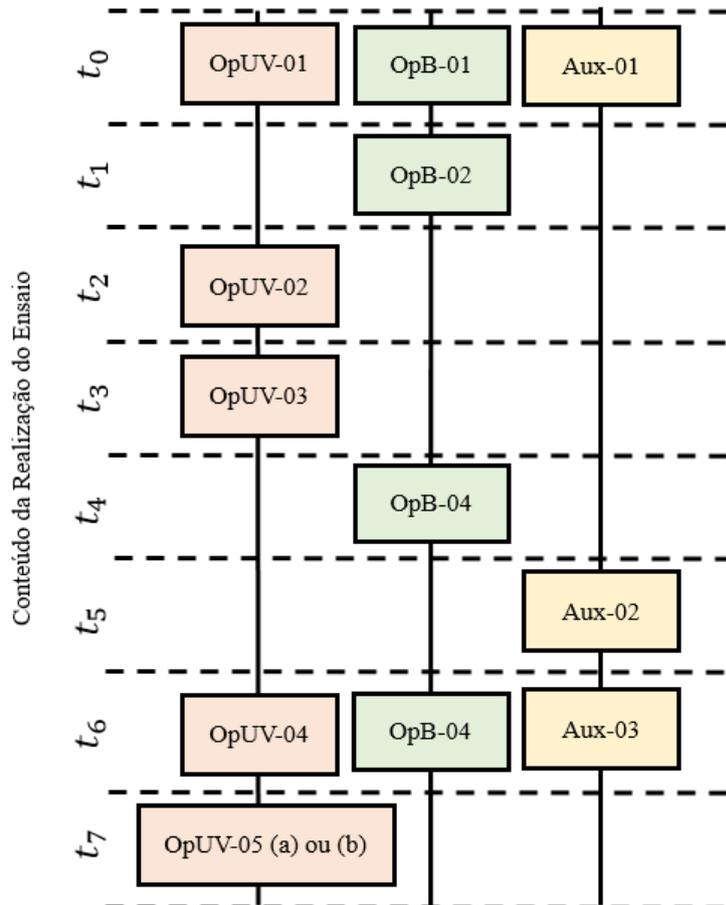
Para facilitar a compreensão da realização do ensaio, a descrição de cada atividade para cada responsável foi grifada ao longo do texto anterior. Para simplificar o uso da informação, um código indicando o responsável e o número da atividade é apresentado na Tabela 4.1. Os códigos são: **OpB** para operador de bancada, **OpUV** para operador de câmera UV e **Aux** para o auxiliar.

Tabela 5.1. Descrição das atividades para cada responsável pelo ensaio.

Responsável	Código	Atividade
Operador de câmera UV	OpUV-01	Assumir o posto em um ponto de captura.
	OpUV-02	Realizar uma aquisição de vídeo inicial, SEM registrar a radiação UV, por aproximadamente 10 segundos.
	OpUV-03	Realizar uma aquisição de vídeo registrando APENAS a radiação UV, durante 60 segundos.
	OpUV-04	Avaliar se os vídeos registrados são adequados ou não e, em caso negativo, analisar quais parâmetros podem ser ajustado (se for o responsável técnico).
	OpUV-05a	Assumir o posto em um ponto de captura que ainda não foi registrado.
	OpUV-05b	Assumir o posto no ponto de captura em que se encontrava antes.
Operador de bancada	OpB-01	Assumir o posto junto a bancada de controle.
	OpB-02	Elevar a tensão do circuito, energizando o objeto de teste na tensão prevista para o ensaio.
	OpB-03	Desenergizar o circuito.
	OpB-04	Avaliar se os vídeos registrados são adequados ou não e, em caso negativo, analisar quais parâmetros podem ser ajustado (se for o responsável técnico).
Auxiliar	Aux-01	Assumir seu posto e se preparar para a realização do ensaio (retirando a vara de manobra do transformador).
	Aux-02	Garantir o aterramento do transformador com uma vara de manobra.
	Aux-03	Avaliar se os vídeos registrados são adequados ou não e, em caso negativo, analisar quais parâmetros podem ser ajustado (se for o responsável técnico).

As atividades de realização do ensaio se repetem em um ciclo, até o registro adequado dos vídeos em todos os pontos de captura. As atividades compreendidas neste ciclo são apresentadas na Figura 5.3, conforme a execução ao longo do tempo, divididas em oito períodos, de t_0 até t_7 .

Figura 5.3. Sequência de atividades para a realização do ensaio em disposição temporal.



Ao concluir a realização do ensaio, pode-se partir para a sua finalização, conforme apresentado a seguir.

5.3. FINALIZAÇÃO DO ENSAIO

A etapa de finalização do ensaio consiste em garantir a **desenergização total** dos componentes e instrumentos. Em seguida, da **guarda de todo o material utilizado** em seus devidos locais. **Remoção de todos os equipamentos de proteção coletiva**, garantindo que o ambiente no qual foi realizado o ensaio ou medição está nas mesmas condições anteriores à sua realização, e na **guarda de todos os equipamentos de proteção individual**. Finalmente, preenche-se a **lista de controle final** da ata de

ensaio/medição, verificando-se os itens supracitados. Para concluir todo o procedimento, todos os responsáveis da equipe rubricam a ata de ensaio/medição.

De forma a complementar as informações apresentadas para ensaios em laboratório, as considerações sobre medições em campo são apresentadas a seguir.

5.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÕES EM CAMPO

A principal diferença entre os procedimentos experimentais do ensaio em laboratório e da medição em campo consiste no fato do laboratório ser um ambiente controlado, no qual é relativamente mais fácil realizar as aquisições de vídeo na disposição espacial que melhor convém (idealmente seguindo a proposta da Figura 5.1), Pode-se ainda submeter o objeto de teste a condições desejadas com relação aos níveis de tensão, à aplicação de poluições, à confecção artificial de defeitos e, ainda, realizar o ensaio em momentos em que a umidade relativa do ar (URA), a temperatura ambiente e a pressão atmosférica são mais propícios. Além disso, em laboratório, não há necessidade de meio de transporte para se chegar ao local de aquisição, como subestações em localidades distantes ou torres de transmissão fora da zona urbana.

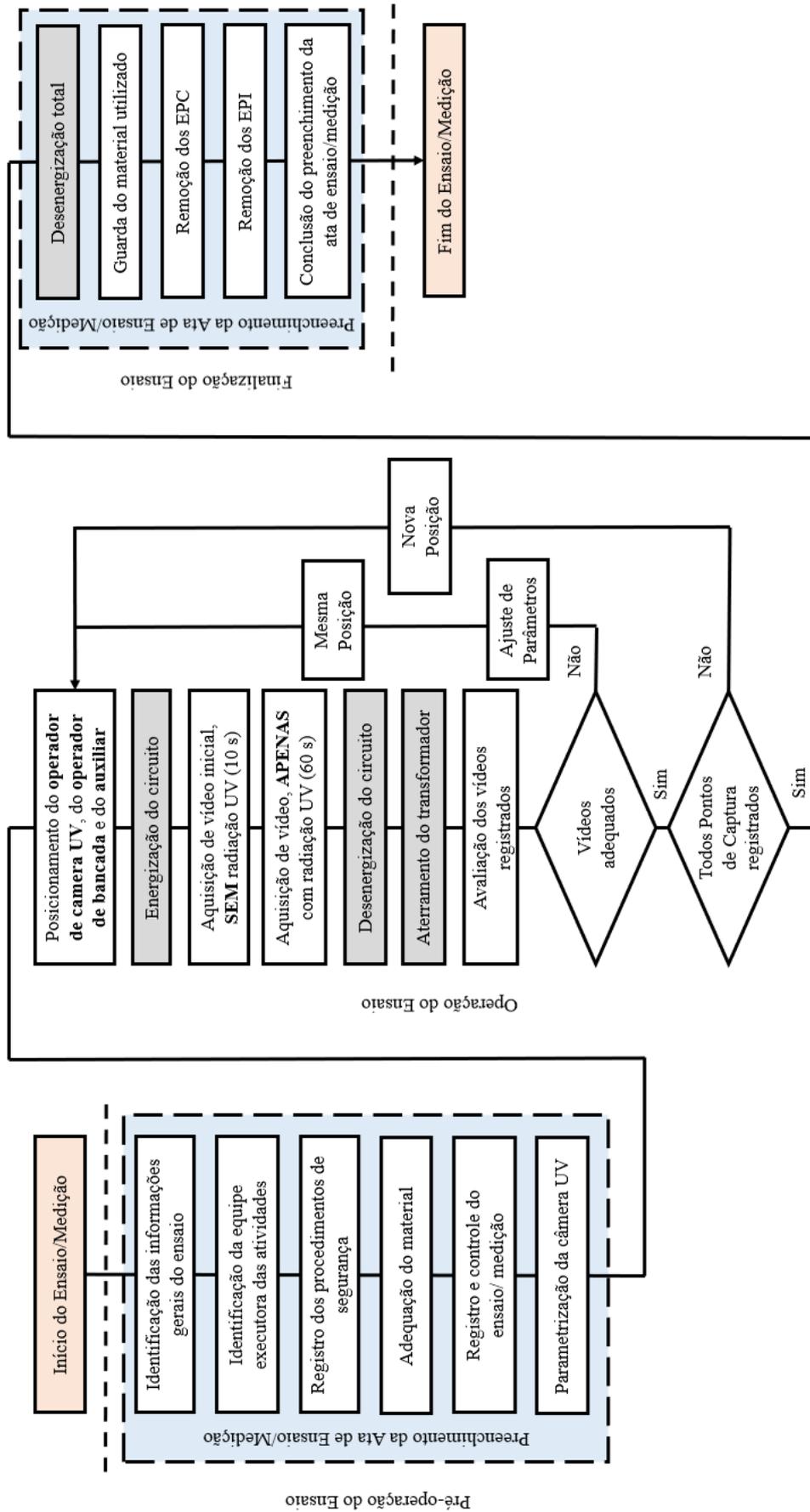
Em contrapartida, as medições em campo não precisa de montagem circuito de energização (conforme apresentado na Figura 5.2). Além disso, caso sejam realizados apenas monitoramentos não invasivos (ou seja, sem intervenção direta ao objeto de teste) não há necessidade entrar em contato com regiões energizadas e as aquisições são realizadas em muito menos tempo que intervenções do ensaio em laboratório e de forma mais segura para os operadores.

A seguir, um diagrama de metodologia de ensaio é apresentada.

6. DIAGRAMA DE METODOLOGIA DE ENSAIO

Na Figura 6.1 pode ser visualizada toda a **Metodologia de Ensaio**, que é válida tanto para ensaios em laboratório quanto para medições em campo. As diferenças observadas para os dois tipos de procedimento estão relacionadas, principalmente, a ausência do circuito do gerador AT para medições de campo. As etapas **exclusivas** dos ensaios em laboratório estão destacadas em cinza. Nas medições em campo, não há operador de bancada.

Figura 6.1. Diagrama completo da metodologia de ensaio.



REFERÊNCIAS

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J. M.; PHILLIPS, A. J. **Daylight Corona Discharge Imager**. In: High Voltage Engineering Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467), Vol. 4, pp 349 – 352, August 1999.

NR 06. **Equipamento de Proteção Individual EPI**. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). 2001.

NR 10. **Segurança em Instalações e serviços em Eletricidade**. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). 2004.

OFIL SYSTEMS. **What Is Corona?** Disponível em: <<http://www.ofisystems.com/technology/corona.html>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

ANEXO II

MODELO EM BRANCO E EXEMPLO PREENCHIDO DE ATA DE
ENSAIO/MEDIÇÃO



MONITORAMENTO DE RADIAÇÃO UV EM COMPONENTES DE ALTA TENSÃO

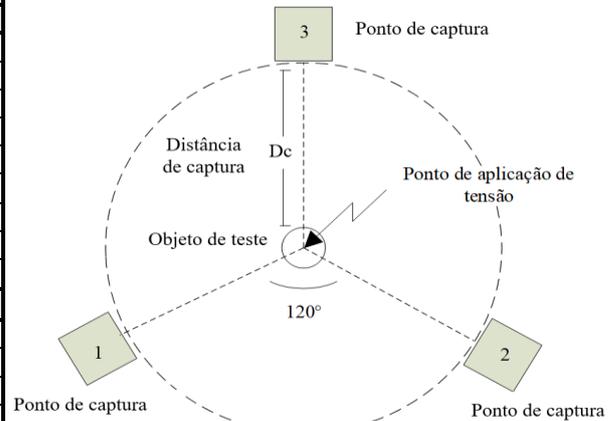
Responsável Técnico:			
Local de Realização		Data	
Descrição do Procedimento			
Identificação do Objeto Teste:			
Registro do vídeo UV			

Etapa 1 - Identificação da equipe executora		Etapa 4 - Registro e controle do ensaio/medição			
Operador de câmera UV		Hora	Temperatura	Pressão	URA (%)
Cargo/Ocupação					
Operador de bancada ¹		Tensão	Rr	Rc	Dc
Cargo/Ocupação					

Etapa 5 - Parâmetros da câmera UV	
Auxiliar 1	
Cargo/Ocupação	
Auxiliar 2	
Cargo/Ocupação	
Auxiliar 3	
Cargo/Ocupação	
	Tempo de captação

Disposição espacial genérica

Etapa 2 - Verificação dos procedimentos de segurança		
Medidas de Proteção Coletiva	Ok	NA ²
Desenergização dos equipamentos		
Delimitação de PE, ZR, ZC e ZL		
Isolação das partes energizadas		
Aterramento das massas.		
Disposição de barreiras, obstáculos e sinalização		
Uso de coletes reflexivos e fitas de demarcação		
Uso de coberturas isolantes e cones de sinalização		
Uso de conjuntos para aterramento temporário		
Uso de detectores de tensão para BT e AT		
Medidas de Proteção Individual	Ok	NA ²
Cintos de segurança com trava-quebras		
Capacete contra impactos e choques elétricos		
Botas contra choques elétricos		
Óculos de segurança		
Protetores faciais		
Braçadeiras ou mangas de segurança		
Luvas de cobertura		
Bolsas para içamento de ferramentas		



Etapa 6 - Finalização do ensaio	
Lista de controle final	Ok
Desenergização efetuada ¹	

Etapa 3 - Adequação do material	Ok	NA ²
Câmera UV		
Placa de captura de vídeo		
Computador portátil		
Gerador de AT ¹ e bancada ¹		
Barômetro		
Termo-higrômetro		
Bateria/Inversor de frequência		
Extensões de tomadas		
Plataforma/andaime		
Equipamento de Comunicação		
Tripé e/ou suporte da câmera UV		

Observações

--	--	--

Considerações Gerais

¹Somente necessário em ensaios de laboratório.

²Os itens que não são aplicáveis e não estão disponíveis devem ser marcados na coluna NA.

Local para rubrica datada da equipe executora

--



ATA DE ENSAIO/MEDIÇÃO nº 021



MONITORAMENTO DE RADIAÇÃO UV EM COMPONENTES DE ALTA TENSÃO

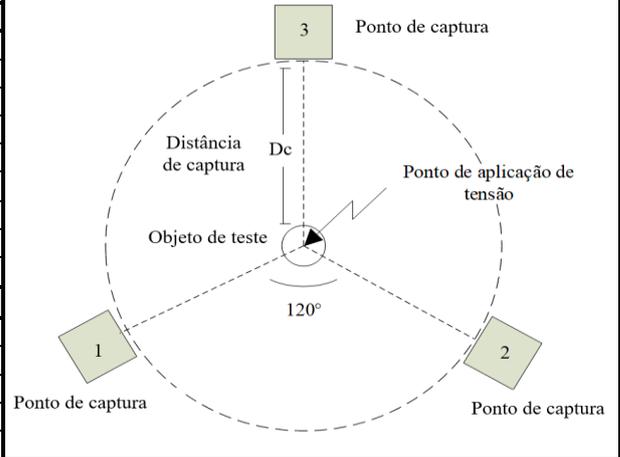
Responsável Técnico:	Prof. Antonio José da Silva		
Local de Realização	Laboratório de Alta Tensão da UFCG	Data	13/05/2021
Descrição do Procedimento	Teste de aplicação de tensão nominal em isoladores poliméricos de 230 kV		
Identificação do Objeto Teste:	Isolador Polimérico IR01 com poluição salina 15 mS/cm		
Registro do vídeo UV	Video_021_IR01_15mS.mpg		

Etapa 1 - Identificação da equipe executora		Etapa 4 - Registro e controle do ensaio/medição			
Operador de câmera UV	José da Silva	Hora	Temperatura	Pressão	URA (%)
Cargo/Ocupação	Aluno Doutorado LAT/UFCG	14:30	27 °C	762 mmHg	70%
Operador de bancada ¹	João da Costa	Tensão	Rr	Rc	Dc
Cargo/Ocupação	Aluno Doutorado LAT/UFCG	133 kV	1,20 m	3,20 m	10,00 m

Etapa 5 - Parametrização da câmera UV	
Auxiliar 1	Maria de Lima
Cargo/Ocupação	Aluna Mestrado LAT/UFCG
Auxiliar 2	Pedro de Sousa
Cargo/Ocupação	Aluno PIBIC LAT/UFCG
Auxiliar 3	-
Cargo/Ocupação	-
Modelo	Daycor II
Fabricante	Ofil Systems
Ganho	150
Tempo de captação	60 segundos

Disposição espacial genérica

Etapa 2 - Verificação dos procedimentos de segurança		
Medidas de Proteção Coletiva	Ok	NA ²
Desenergização dos equipamentos	x	
Delimitação de PE, ZR, ZC e ZL	x	
Isolação das partes energizadas	x	
Aterramento das massas.	x	
Disposição de barreiras, obstáculos e sinalização	x	
Uso de coletes reflexivos e fitas de demarcação	x	
Uso de coberturas isolantes e cones de sinalização		x
Uso de conjuntos para aterramento temporário	x	
Uso de detectores de tensão para BT e AT	x	
Medidas de Proteção Individual	Ok	NA ²
Cintos de segurança com trava-quedas		x
Capacete contra impactos e choques elétricos	x	
Botas contra choques elétricos	x	
Óculos de segurança	x	
Protetores faciais	x	
Braçadeiras ou mangas de segurança		x
Luvas de cobertura		x
Bolsas para içamento de ferramentas		x



Etapa 3 - Adequação do material		Ok	NA ²
Câmera UV	x		
Placa de captura de vídeo	x		
Computador portátil	x		
Gerador de AT ¹ e bancada ¹	x		
Barômetro	x		
Termo-higrômetro	x		
Bateria/Inversor de frequência		x	
Extensões de tomadas	x		
Plataforma/andaime	x		
Equipamento de Comunicação	x		
Tripé e/ou suporte da câmera UV		x	

Etapa 6 - Finalização do ensaio	
Lista de controle final	Ok
Desenergização efetuada ¹	x
Material utilizado adequadamente guardado	x
EPC adequadamente guardados	x
EPI adequadamente guardados	x

Observações	
A mesma equipe executora realizou medição de corrente de fuga e medições usando o termovisor. O ensaio durou aproximadamente duas horas.	
Após 1 hora de ensaio, o operador de bancada precisou se ausentar e o auxiliar 2 assumiu o seu posto.	

Considerações Gerais

¹Somente necessário em ensaios de laboratório.

²Os itens que não são aplicáveis e não estão disponíveis devem ser marcados na coluna NA.

Local para rubrica datada da equipe executora

--