



Universidade Federal
de Campina Grande

CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EQUALIZAÇÃO E SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS
TERMOGRÁFICAS APLICADAS À METODOLOGIA DE
INSPEÇÃO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

PROPONENTE:

RENATA GARCIA DUTRA DE OLIVEIRA

Campina Grande, Paraíba

Março de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EQUALIZAÇÃO E SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS
TERMOGRÁFICAS APLICADAS À METODOLOGIA DE
INSPEÇÃO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADORES:
PROFESSOR EDSON GUEDES DA COSTA, D.SC.
PROFESSOR WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.SC.

Campina Grande, Paraíba

Março de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

O48e Oliveira, Renata Garcia Dutra de.
Equalização e segmentação de imagens termográficas aplicadas à metodologia de inspeção de isoladores poliméricos / Renata Garcia Dutra de Oliveira. – Campina Grande, 2017.

99 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Waslon Terllizzie Araújo Lopes".

Referências.

1. Imagens Termográficas. 2. Isoladores Poliméricos. 3. Processamento Digital de Imagens. 4. Radiação Infravermelha. I. Costa, Edson Guedes da. II. Lopes, Waslon Terllizzie Araújo. III. Título.

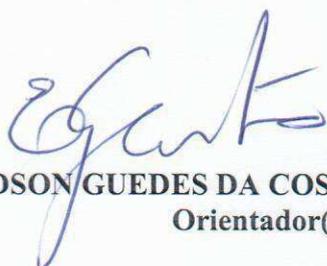
CDU 621.397(043)

**"EQUALIZAÇÃO E SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS TERMOGRÁFICAS APLICADAS À
METODOLOGIA DE INSPEÇÃO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS"**

RENATA GARCIA DUTRA DE OLIVEIRA

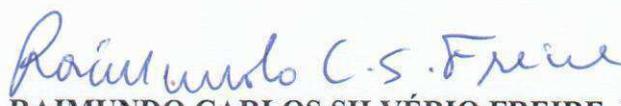
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/03/2017


WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFPB
Orientador(a)


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


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


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


RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*À minha mãe, Lucicleide, a
quem dedico todo meu amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me fornecer saúde, determinação e força para enfrentar esta jornada repleta de surpresas e desafios que foram vencidos.

À minha mãe, Lucicleide Garcia de Oliveira, que é a minha inspiração. Pelos ensinamentos, pela confiança, pelo incentivo, pela paciência, pelo amor, enfim, por estar presente em todos os instantes da minha vida. Sem a dedicação e o apoio dado por ela, eu não chegaria até aqui.

À minha irmã, Renally Garcia Dutra de Oliveira, pelo amor, pela amizade, por todos os momentos felizes que me proporciona, dando um sentido ainda maior para minha vida.

À minha avó, Bárbara Aranha, por todo carinho e orações.

A todos os amigos que fui presenteada nesta caminhada, companheiros de curso e de vida, que contribuíram para construção de quem sou hoje.

Aos professores Edson Guedes da Costa e Waslon Terllizzie Araújo Lopes pela paciência, orientação, apoio e empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Aos amigos que ajudaram bastante na realização deste trabalho, Camila Pires, Marcus Tullius, Bruno Almeida, Pedro Venske, Yorkismar de Andrade e Antonio Neto.

Aos meus colegas de pós-graduação que consciente ou inconscientemente ajudaram no meu desenvolvimento acadêmico nesta caminhada.

Ao corpo técnico do LAT, nas pessoas de Jennefer Pequeno e Higor da Costa, pelo auxílio na realização de experimentos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de toda a Universidade Federal de Campina Grande pela dedicação.

Por fim, agradeço a COPELE, CAPES e CNPq pelo auxílio financeiro.

RESUMO

A análise da variação de temperatura ao longo do isolador, por meio da termografia, pode consistir em um dos métodos mais eficazes de avaliação de isoladores em serviço, pois considera o efeito combinado da poluição, do estresse elétrico, defeitos internos e das condições ambientais. No entanto, analisar apenas de modo visual imagens termográficas é difícil e, muitas vezes, apenas os engenheiros especializados são capazes de fazer julgamentos corretos. Neste trabalho foi desenvolvida uma técnica para análise de imagens termográficas baseada em expansão não-linear de sinais, equalização de histogramas e análise de componentes principais com o objetivo de auxiliar no diagnóstico do nível de degradação de isoladores poliméricos. O processamento digital das imagens termográficas permitiu a obtenção dos valores de temperatura que indicam o comportamento térmico dos isoladores sob inspeção. Ensaio em laboratório foram realizados com isoladores poliméricos de 230 kV, com diferentes níveis de degradação, com a finalidade de captar imagens utilizando uma câmera de detecção de radiação infravermelha. Os resultados evidenciam a eficiência da metodologia desenvolvida, atuando de forma semiautomática no processamento digital de imagens termográficas, para obtenção do perfil térmico dos isoladores inspecionados. Com base nos produtos do processamento digital das imagens termográficas, tem-se uma melhor avaliação dos níveis de degradação em que se encontram os isoladores, além de auxiliar de forma eficiente a tomada de decisão para a classificação dos seus estados operacionais.

Palavras-chave: imagens termográficas, inspeção, isoladores poliméricos, processamento digital de imagens, radiação infravermelha.

ABSTRACT

The analysis of the temperature variation along the insulator through thermography can be one of the most effective methods of evaluating insulators in service, for it considers the combined effect of pollution, electrical stress, internal defects and environmental conditions. However, analyses based only on visual inspection of images are not enough. In fact, only specialized engineers are able to make correct judgments. In this work a computational routine was developed, based on the digital image processing. The routine utilizes the signal nonlinear expansion technique, histogram equalization and principal component analysis. The digital processing of the thermographic images is used to obtain the temperature values that indicate the thermal behavior of the insulators under inspection. Laboratory tests were performed with 230 kV polymeric insulators with different levels of degradation in order to capture images using an infrared radiation detection camera. The results demonstrate the efficiency of the digital thermographic imaging technique to obtain the thermal profile of the insulators inspected. Based on the products of the digital processing of the thermographic images, we have a better evaluation of the degradation levels of the insulators, besides efficiently support to the classification of the operational states of the insulators.

Keywords: thermographic images, inspection, polymeric insulators, digital image processing, infrared radiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estimativa da quantidade de isoladores poliméricos instalados.	17
Figura 2. Partes constituintes de um isolador polimérico.....	18
Figura 3. Imagem de um termograma de um isolador polimérico com anomalia térmica.	23
Figura 4. Espectro Eletromagnético.	24
Figura 5. Esquema simplificado de um detector de radiação infravermelha.....	26
Figura 6. Representação matricial de uma imagem digital. (a) Ponto destacado sobre a imagem; (b) Matriz de píxeis.....	30
Figura 7. (a) Representação da vizinhança – 4 de um píxel. (b) Representação da vizinhança – 8 de um píxel.	31
Figura 8. (a) Exemplo de uma imagem de 3 bits com dimensões 21 x 8, e (b) seu arquivo correspondente no formato PGM sendo visualizado em um editor de textos.	32
Figura 9. Diagrama esquemático das etapas do processamento digital de imagens.....	33
Figura 10. Equalização de histograma.....	35
Figura 11. Fluxograma da metodologia adotada.	52
Figura 12. Imagem termográfica de um isolador polimérico captada pelo termovisor..	53
Figura 13. Fotografia de um isolador polimérico utilizado nos ensaios.....	54
Figura 14. Diagrama do modelo de isolador polimérico utilizado nos ensaios.....	54
Figura 15. Fotografia do termovisor.....	55
Figura 16. Diagrama esquemático do arranjo experimental para detecção da radiação IF.	56
Figura 17. Fotografia do transformador em cascata utilizado nos ensaios em alta tensão.	57
Figura 18. Fotografia da montagem realizada para simular as condições de campo.	57
Figura 19. Diagrama do posicionamento das plataformas de medição (vista superior). 58	
Figura 20. Diagrama esquemático do processo de segmentação do isolador polimérico na imagem.	62
Figura 21. Fotografia do núcleo do isolador polimérico exposto (Isolador VIII).	66
Figura 22. Fotografia da poluição depositada na superfície do isolador polimérico (Isolador III).	66

Figura 23. Fotografia do terminal de conexão do isolador polimérico com corrosão acentuada (Isolador VI).	66
Figura 24. Fotografia do estado de degradação das aletas do isolador polimérico (Isolador VI).	67
Figura 25. Imagem em formato PGM obtida após a exportação da matriz de temperaturas.	68
Figura 26. Análise de sensibilidade para diferentes valores de μ no processo de melhoramento do contraste, (a) $\mu = 0,1$; (b) $\mu = 50$; (c) $\mu = 100$; (d) $\mu = 255$; (a'-d') são os histogramas das imagens (a-d), respectivamente.	69
Figura 27. Imagem resultante do processo de melhoramento do contraste.	71
Figura 28. Análise de sensibilidade para diferentes valores de μ no processo de equalização de histogramas, (a) $\mu = 0,1$; (b) $\mu = 50$; (c) $\mu = 100$; (d) $\mu = 255$	72
Figura 29. Isolador polimérico segmentado pela imagem binarizada.	73
Figura 30. Imagem alcançada após sobreposição da imagem segmentada na imagem $f(x,y)$	74
Figura 31. Fluxograma do processamento digital das imagens para extração do vetor de temperaturas do Isolador IV.	75
Figura 32. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador I.	76
Figura 33. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador II.	77
Figura 34. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador III.	77
Figura 35. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador IV.	78
Figura 36. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador V.	79
Figura 37. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador VI.	79
Figura 38. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador VII.	80
Figura 39. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador VIII.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT.	25
Tabela 2. Critérios de avaliação.	28
Tabela 3. Principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas abordados nessa dissertação.	48
Tabela 4. Continuação: Principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas abordados nessa dissertação.	49
Tabela 5. Informações técnicas dos isoladores poliméricos utilizados nos ensaios.	54
Tabela 6. Valores dos parâmetros ajustáveis no termovisor.	59
Tabela 7. Características dos isoladores.	67
Tabela 8. Dados estatísticos do comportamento térmico dos isoladores inspecionados.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMP	<i>Bitmap</i>
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CN	Corpo negro.
EPDN	Etileno-propileno-dieno
EPR	Etileno-propileno
FPA	<i>Focal Plane Array</i> (Matriz de Plano Focal)
IF	Infravermelho
JPG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análise de Componentes Principais)
PDI	Processamento digital de imagens.
PGM	<i>Portable Gray Map</i>
PNG	<i>Portable Network Graphics</i>
SIR	<i>Silicone Rubber</i> (Borracha de Silicone).
SVM	<i>Support Vector Machine</i> (Máquina de Vetores de Suporte)
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Organização do Trabalho.....	14
2	Fundamentação Teórica.....	16
2.1	Isoladores Poliméricos.....	16
2.2	Termografia e seus Fundamentos.....	22
2.3	Processamento Digital de Imagens.....	28
2.4	Operadores Estatísticos.....	39
3	Revisão Bibliográfica.....	41
4	Material e Métodos.....	51
4.1	Material.....	52
4.2	Métodos.....	55
5	Resultados.....	65
5.1	Inspeção Visual.....	65
5.2	Processamento Digital das Imagens Termográficas.....	68
5.3	Análise do Comportamento Térmico dos Isoladores.....	76
5.4	Sumarização dos Dados Estatísticos.....	81
6	Conclusão.....	84
6.1	Proposta para Trabalhos Futuros.....	85
	Referências.....	87
	Apêndice A – Radiação Infravermelha.....	93
	Apêndice B – Análise de Componentes Principais (PCA).....	98

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de transmissão devem operar idealmente de forma ininterrupta, visto que a sociedade e as agências reguladoras de energia elétrica requerem das empresas geradoras, distribuidoras e transmissoras de energia confiabilidade, qualidade e segurança nos serviços prestados. De modo geral, os principais motivos para a ocorrência de desligamentos no sistema elétrico estão associados às falhas ocasionadas nos isolamentos elétricos (MONTICELLI; GARCIA, 2003 apud GUEDES, 2015). Especificamente nos sistemas de transmissão, o isolamento elétrico é feito basicamente utilizando equipamentos conhecidos como isoladores.

Apesar dos isoladores poliméricos estarem em uso desde a década de 80, ainda persistem dúvidas a respeito de sua vida útil e de seus modos de falha que ocorrem com maior frequência (HALL, 1993; FLORENTINO, 2016). Isto decorre do fato dos polímeros serem compostos orgânicos que se degradam com o tempo e, por isso, fazer uso de uma metodologia de monitoramento e diagnóstico que permita as equipes de manutenção antecipar uma possível falha é fundamental.

Os índices de falhas nos isoladores podem ser associados à efetividade das inspeções e da manutenção das linhas de transmissão. E, dada a importância que os isoladores possuem para o sistema elétrico, as empresas devem usar técnicas que possibilitem a indicação do estado de degradação dos isolamentos, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de intervenções e, conseqüentemente, contribuir para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico.

Mesmo existindo diversas técnicas desenvolvidas para a inspeção de isoladores, não há ainda um consenso em relação a melhor técnica a ser aplicada, devido às diversas vantagens e desvantagens apresentadas por cada uma delas. Contudo, é desejável que as inspeções dos equipamentos sejam realizadas utilizando métodos não invasivos, permitindo sua aplicação durante o período de operação normal das linhas ou das subestações, isto é, sem necessitar da interrupção no fornecimento de energia elétrica para a realização da inspeção. Dentre as técnicas mais utilizadas de forma não invasiva, para a inspeção dos isoladores poliméricos, está a detecção de radiação infravermelha (QUEIRÓS, 2013).

A detecção de radiação infravermelha se destaca dos demais métodos devido à ausência de contato físico do instrumento de medição, chamado termovisor, com as instalações, uma vez que o trabalho é realizado com os equipamentos em pleno funcionamento. Acrescenta-se também como vantagem a possibilidade de realizar a inspeção em um número razoável de equipamentos em um curto período de tempo (ÁLVARES, 2008).

Segundo Neri (2005), a análise da variação de temperatura ao longo do isolador pode consistir em um dos métodos mais eficazes de avaliação de isoladores em serviço, pois esses resultados levam em consideração o efeito combinado da poluição, do estresse elétrico, defeitos internos e das condições ambientais. Assim, as medidas preventivas podem ser tomadas para evitar a ocorrência de quaisquer falhas.

No entanto, quando nas medições em campo ou mesmo em laboratório, as imagens termográficas podem apresentar baixo contraste devido à pequena diferença de temperatura entre o fundo da imagem e o objeto submetido a inspeção. Desta forma, analisar apenas de modo visual as imagens termográficas de isoladores poliméricos é difícil e, muitas vezes, apenas os engenheiros especializados são capazes de fazer julgamentos corretos.

O emprego das técnicas de processamento digital de imagens é útil para extração de dados e aprimoramento da análise de imagens termográficas. As técnicas permitem a minimização da subjetividade nos processos de análises dos termogramas de equipamentos elétricos sob inspeção, além de fornecer recursos que permitem o auxílio na detecção de falhas de tais equipamentos.

Diante do exposto, esta dissertação busca fornecer subsídios para avaliar a degradação dos isoladores poliméricos por meio do monitoramento da temperatura, de maneira que auxilie na indicação do momento mais adequado para realização de manutenções. Para tanto, técnicas de processamento de imagens termográficas de isoladores poliméricos foram utilizadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma técnica semiautomática de processamento digital de imagens, baseada na equalização e segmentação de imagens termográficas, para auxiliar na inspeção de isoladores poliméricos.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Melhorar a qualidade das imagens termográficas por meio do realce do contraste;
- Realizar a segmentação das imagens termográficas com o objetivo de separar o corpo do isolador do restante da imagem;
- Extrair das imagens termográficas um vetor com valores de temperatura correspondente ao eixo central do isolador polimérico;
- Fazer uso da estatística descritiva para sumarizar parâmetros térmicos relevantes ao diagnóstico dos isolares inspecionados;
- Identificar e analisar o comportamento térmico dos isoladores poliméricos inspecionados.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2, uma fundamentação teórica é apresentada com base nos principais temas envolvidos. Dentre eles estão a teoria referente aos isoladores poliméricos as diversas técnicas de inspeção de isoladores, dando maior destaque para a termografia, apresentando os fundamentos relacionados à detecção de radiação infravermelha (IF) e os principais conceitos sobre processamento digital de imagens.

No Capítulo 3, uma revisão bibliográfica é apresentada, versando sobre as principais contribuições que tratam do monitoramento das emissões de radiação IF de

equipamentos elétricos, dando maior destaque para os isoladores poliméricos, além do processamento digital de imagens termográficas.

Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados o material e os métodos empregados para o cumprimento do objetivo proposto. O modelo de isolador polimérico e o detector de radiação IF utilizados são discutidos, assim como a metodologia para obtenção das imagens termográficas, mediante os ensaios em laboratório, e os processamentos computacionais.

O Capítulo 5 é destinado à apresentação e à discussão dos resultados obtidos sobre o processamento digital das imagens termográficas.

Por fim, o Capítulo 6 destina-se a apresentar as conclusões da pesquisa de acordo com os objetivos alcançados, e os temas propostos para sua continuidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, inicialmente, é apresentada uma introdução sobre isoladores poliméricos e a sua importância no sistema de transmissão de energia elétrica. Além disso, são descritas a evolução dos isoladores, a composição e as principais vantagens e desvantagens dos isoladores poliméricos. Este capítulo também aborda as diversas técnicas de inspeção, dando maior destaque para a termografia, apresentando os fundamentos relacionados à detecção de radiação IF. Da mesma forma, este capítulo apresenta uma seção dedicada a apresentação dos principais conceitos sobre processamento digital de imagens, as operações envolvendo imagens e suas principais etapas. Por fim, a última seção é dedicada à descrição de operadores estatísticos utilizados.

2.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS

A função do sistema dos isolamentos elétricos é segregar áreas com diferentes níveis de tensão, seja entre partes energizadas ou entre uma parte energizada e a terra. Embora as linhas de transmissão sejam um dos elementos chave do sistema elétrico, sistemas isolantes são também utilizados nos mais diversos equipamentos que compõem o sistema elétrico, entre esses pode-se citar: buchas de transformadores de potência, câmeras de extinção de disjuntores, sistema de isolamentos dos enrolamentos dos transformadores, etc.

O isolamento das linhas de transmissão é feito, basicamente, pelo ar atmosférico e pelos isoladores. Os isoladores presentes nas linhas de transmissão possuem além da função de isolamento, propriedades mecânicas que o permitem suportar os esforços produzidos pelos condutores (peso e tração), os efeitos da variação de temperatura, do curto-circuito e do vento (GORUR; CHERNEY; BURNHAM, 1999).

Os isoladores poliméricos começaram a ser desenvolvidos na década de 1940, quando materiais orgânicos isolantes começaram a ser empregados na fabricação de isoladores de alta tensão, por serem materiais leves e resistentes a impacto (BRUINS, 1968 apud GUEDES, 2015). Porém, os processos de produção eram rudimentares e os

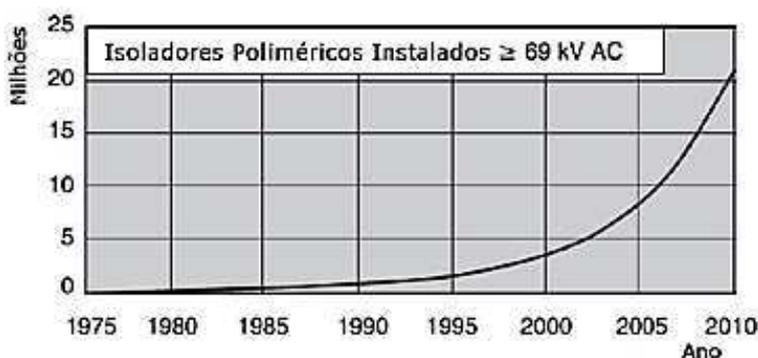
tipos de materiais utilizados tornavam os isoladores suscetíveis a grande degradação, tanto por exigências mecânicas como elétricas. Conseqüentemente, surgiram relatos de falhas estruturais e de isolamento que comprometiam a estabilidade dos sistemas elétricos.

A evolução dos isoladores poliméricos consistiu no desenvolvimento e teste de vários materiais, modelos e métodos de produção, onde foram atingidos padrões importantes para um funcionamento mais confiável e de longa duração, ultrapassando as dificuldades iniciais (QUEIRÓS, 2013).

Sendo assim, a utilização dos isoladores poliméricos em linhas de transmissão teve início, de fato, na década de 1980, quando surgiu sua primeira versão comercial (HALL, 1993). A partir de então, os isoladores poliméricos gradualmente estão substituindo os isoladores convencionais nas linhas de transmissão de energia e vêm adquirindo grande importância no sistema elétrico, especialmente em média e alta tensão. Isto se deve à rápida expansão na sua utilização, com crescimento de unidades instaladas em todo o mundo, principalmente nos últimos anos, conforme indicado por pesquisas realizadas entre fabricantes e centros de pesquisa (PIGINI, 2016).

Na Figura 1, é apresentado um gráfico que indica a estimativa da quantidade de isoladores poliméricos em operação ao longo dos anos. Em 2010, a estimativa era que cerca de 20 milhões de isoladores poliméricos estavam em utilização no mundo, o que representa um crescimento expressivo quando comparado às 300 mil unidades estimadas em 1985 (PIGINI, 2016), como destacado na Figura 1.

Figura 1. Estimativa da quantidade de isoladores poliméricos instalados.



Fonte: SCHMUCK et al., 2012 apud SOUZA, A., 2016.

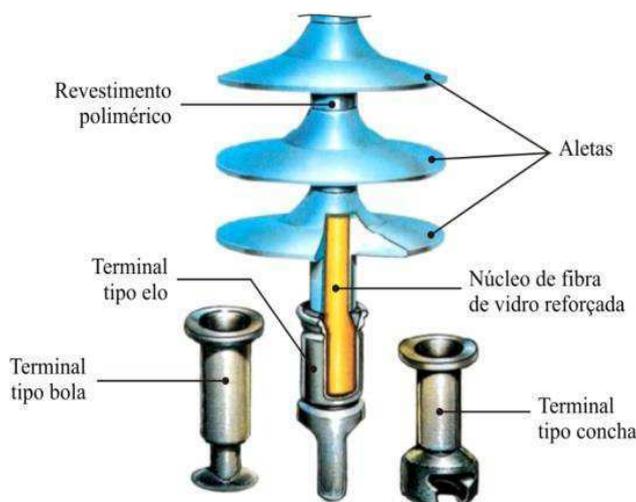
Pesquisas ainda apontam para intensificação destes números nos anos subsequentes devido ao crescimento de mercados como a China. O uso de isoladores

poliméricos aumentou significativamente ao longo dos últimos 20 anos e só na China, em 2014, um número estimado de isoladores foi de 7,1 milhões de unidades operando em linhas de transmissão de 110 kV ou superior (LIANG, 2016). Diante destes dados, constata-se a importância de estudos e desenvolvimento de técnicas que buscam monitorar os isoladores poliméricos, principalmente para identificação de falhas.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

Os isoladores poliméricos tipo bastão são constituídos por três partes fundamentais: o núcleo de fibra de vidro reforçada, o revestimento polimérico com as chamadas aletas (também denominadas de saias) distribuídas ao longo do corpo do isolador e os terminais de conexão. Os detalhes das partes que constituem o isolador polimérico podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2. Partes constituintes de um isolador polimérico.



Fonte: RODURFLEX, 2004 apud GUEDES, 2015.

2.1.1.1 NÚCLEO

O núcleo é constituído por uma haste de fibra de vidro reforçada e possui como característica servir de matriz para a deposição da borracha de silicone durante o processo de fabricação. Ele suporta os esforços mecânicos aos quais o isolador está sujeito, tais como: peso do condutor, vibrações eólicas, esforços provenientes de curto circuito e

contração do condutor devido à redução da temperatura (GORUR; CHERNEY; BURNHAM, 1999).

2.1.1.2 REVESTIMENTO

O material utilizado no revestimento que envolve o núcleo do isolador polimérico é, geralmente, fabricado com borracha de silicone (SIR), complementada com cargas ou enchimento. Também pode ser utilizado como revestimento o polímero de etilenopropileno (EPR) e etileno-propileno-dieno (EPDM). O revestimento permite que o núcleo fique protegido das condições externas degradantes, quais sejam: umidade, contaminantes químicos da poluição e radiação ultravioleta (UV). Além disso, é responsável por prover isolamento elétrica (ZHAO; BERNSTORF, 1998).

As saias são, geralmente, constituídas do mesmo material polimérico do revestimento. A sua função é aumentar a distância de escoamento entre as ferragens terminais, permitindo o gotejamento de modo a evitar a formação de caminhos condutivos em condições de névoa ou sob chuva. A distância de escoamento é a menor distância superficial entre as partes condutoras do isolador. O formato e dimensão das saias, assim como o tipo de material polimérico empregado, depende das condições de serviços e ambientais, do tipo de isolador e do fabricante.

2.1.1.3 TERMINAIS DE CONEXÃO

Os terminais de conexão se constituem de materiais metálicos de boa resistência mecânica. Estes possuem como característica principal servir de conexão e ancoragem entre a linha de transmissão de energia e a torre. O formato dos terminais de conexão também é importante para equalizar o campo elétrico em torno do mesmo, evitando possíveis descargas corona ou estresse elétrico no material. Anéis equalizadores de campo elétrico são vastamente utilizados em conjunto com as ferragens para tornar a distribuição de campo mais uniforme, principalmente em isoladores utilizados em linhas de subtransmissão com classe de tensão nominal igual ou superior a 69 kV (MENDONÇA, 2013).

2.1.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS

O emprego de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão vem crescendo a cada ano (PIGINI, 2014). Isto se deve ao fato destes materiais apresentarem inúmeras vantagens com relação aos isoladores convencionais (KIKUCHI et al., 1999).

Entre as principais vantagens, uma das características que se destaca é seu peso reduzido. O isolador polimérico apresenta dimensões reduzidas e massa aproximadamente 90% menor em comparação com os isoladores de vidro e porcelana (GUBANSKI, 2005). O peso reduzido torna a instalação e o transporte deste equipamento muito mais rápida devido à facilidade no manuseio. Consequentemente, há uma redução nos custos de mão de obra para a instalação do isolador polimérico. Além disso, o tempo gasto em seu processo de fabricação é considerado curto, dada a facilidade na usinagem, a fundição e cura a baixas temperaturas.

Entre outras características está a resistência ao vandalismo. A propriedade quebradiça dos isoladores convencionais torna-os alvo de vandalismos por meio de tiros de armas de fogo ou arremessos de projéteis, com especial ênfase nos isoladores de vidro, visto que estes estilhaçam e provocam um efeito visual (VOSLOO; MACEY; TOURREIL, 2006). Para algumas empresas de transmissão e distribuição de energia, o fato dos isoladores convencionais serem alvo de grande número de ataques por diversão, justifica a sua substituição por isoladores poliméricos, que quando submetidos a ação de vândalos, não ocorre mudança sonora ou física de grande impacto, mitigando a ação.

Outra característica, a hidrofobicidade é uma das mais importantes vantagens dos isoladores poliméricos. A hidrofobicidade é a propriedade que alguns materiais tem de repelir a água, evitando a formação de película de água. Isto impede ou dificulta a circulação da corrente de fuga nessas condições, o que melhora o desempenho dos isoladores poliméricos em ambientes poluídos (NÓBREGA, 2016).

Embora apresentem uma série de vantagens, os isoladores poliméricos apresentam algumas desvantagens quando comparados aos tradicionais isoladores cerâmicos. Apesar da contínua evolução na formulação de materiais e no processo de fabricação ter reduzido consideravelmente a ocorrência desses problemas, contribuindo para maior confiabilidade e expansão de seu emprego (SOUZA, A., 2016), ainda há uma série de preocupações quanto aos isoladores poliméricos, principalmente relacionada à dificuldade de identificação de falhas internas. Os isoladores poliméricos muitas vezes

não apresentam aparentemente indícios de que houve uma falha interna, dificultando a identificação por uma inspeção visual (HACKAM, 1999).

Por serem revestidos com material à base de polímeros, os isoladores poliméricos estão sujeitos a alterações químicas em seu revestimento, seja pelas condições ambientais ou pela formação de descargas em sua superfície, tornando a avaliação da expectativa de vida do isolador polimérico não trivial e seu comportamento em longo prazo desconhecido (HACKAM, 1999; SOUZA, A, 2016).

O envelhecimento precoce dos isoladores poliméricos é também uma das principais desvantagens e está normalmente associado à degradação contínua que ocorre na superfície do polímero, que pode conduzir a falhas com o tempo. Entre exemplos que contribuem para redução do tempo de vida útil estão a erosão e o trilhamento (SOUZA, A., 2016).

O processo de erosão consiste na perda irreversível de material polimérico na superfície do equipamento, reduzindo a espessura do revestimento que impede a entrada de umidade no núcleo e facilitando a ocorrência de falhas.

Por sua vez, o processo de trilhamento consiste na formação de um caminho condutor na superfície polimérica do isolador, com aparência carbonizada, decorrente das correntes de fuga superficiais (GORUR; CHERNEY; BURNHAM, 1999).

Atualmente, as inspeções realizadas em isoladores poliméricos, muitas vezes, não conseguem identificar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. Pesquisadores em diversas partes do mundo buscam desenvolver técnicas mais eficazes para detectar falhas em isoladores (BARROS, 2011). A seguir, serão apresentadas algumas das principais técnicas utilizadas para monitoramento e manutenção destes equipamentos.

2.1.3 INSPEÇÕES EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

Grande parte dos desligamentos de linhas de transmissão com tensão maior que 230 kV se deve a falha nos isolamentos (MONTICELLI; GARCIA, 2003 apud GUEDES, 2015). Por esta razão se faz necessário o monitoramento destes equipamentos por meio de inspeções com o objetivo de detectar defeitos.

Os índices de falhas nos isoladores também podem ser associados à efetividade das inspeções e da manutenção das linhas de transmissão. Sendo assim, as inspeções em isoladores geralmente são rotineiras e acompanham o plano de inspeção das linhas de

transmissão, nestas inspeções são avaliadas a integridade e as condições de operação dos isoladores.

Normalmente, quando alguma anormalidade é detectada, as empresas simplesmente substituem o isolador por um novo e não são feitos estudos adicionais para avaliar que tipo de problema ocorreu, pois não existe um procedimento padrão para a condução e análise dos resultados obtidos (QUEIRÓS, 2013).

Por outro lado, atualmente, métodos baseados na combinação de detecção de ruído ultrassônico (FLORENTINO, 2015), detecção de radiação IF (SOUZA, B., 2016), detecção de radiação UV (GUEDES, 2015), simulações de campos elétricos (FERREIRA, 2007), raio-X (SILVA, 2009), medição da corrente de fuga (MENDONÇA, 2016) e análise do espectro eletromagnético irradiado (ROCHA, 2014) de forma isolada ou em conjunto, tem cada vez mais sido empregados na identificação de isoladores com falhas ou na iminência de falhar.

As inspeções realizadas com o sistema elétrico em operação, isto é, de forma não invasiva são de grande importância para a confiabilidade do sistema elétrico, visto que avaliam o estado do isolador sem interrupção do fornecimento de energia e nas condições reais de serviço.

Dentre as técnicas mais utilizadas de forma não invasiva, para a inspeção dos isoladores poliméricos, está a detecção de radiação IF também conhecida por termografia.

2.2 TERMOGRAFIA E SEUS FUNDAMENTOS

Nesta seção é discutida a termografia de uma forma generalizada, posteriormente, há uma análise de alguns conceitos importantes para a sua compreensão.

2.2.1 PRINCÍPIO DA TERMOGRAFIA

Criada na década de 1960, a termografia é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas. É a técnica que estende o conceito de visão humano através do espectro infravermelho, que constitui uma faixa de frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com intensidade que de alguma forma tem relação com a sua temperatura (ÁLVARES, 2008).

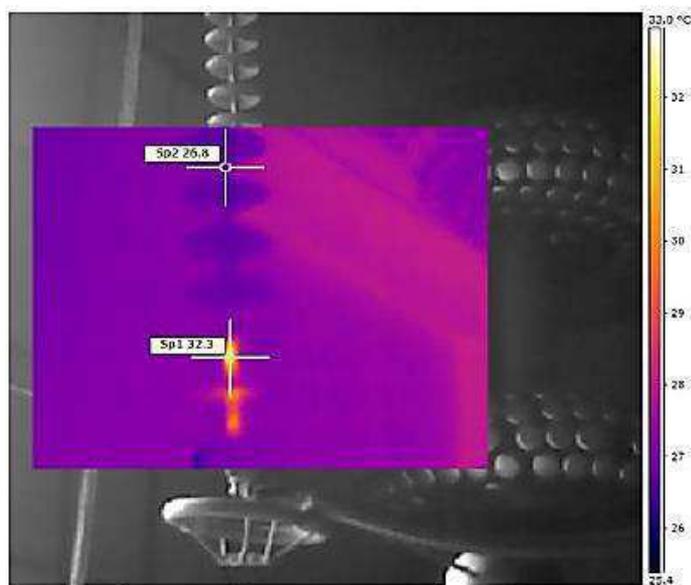
A temperatura absoluta ou a distribuição da temperatura externa podem refletir um comportamento interno. Desta forma, a imagem térmica no infravermelho ou termograma pode ser a representação térmica do que acontece no interior do alvo focalizado.

Os custos para a utilização da termografia em inspeções estão cada vez mais baixos, pois as empresas de transmissão e distribuição de energia a utilizam há bastante tempo, como técnica de manutenção preditiva para os equipamentos das subestações e linhas de transmissão. A maioria das concessionárias aplica a termografia como técnica rotineira para a detecção de anormalidades na operação dos isoladores.

De acordo com empresas de distribuição de energia, esta técnica tem se mostrado consistente para o diagnóstico do estado de equipamentos elétricos com riscos de falha, tornando possível a retirada desses equipamentos de operação de forma programada (WANDERLEY NETO, 2007).

O uso da termografia pode ser observado na Figura 3, em que é mostrada a imagem de um termograma com fusão da fotografia de um isolador polimérico de 230 kV. O termograma é apresentado na forma de pseudocolorização que fornece uma relação de cor com temperatura, pelo termograma apresentado na Figura 3 pode se constatar uma diferença de cor nas últimas saias do isolador e essa variação de cor pode indicar o prenúncio de ocorrência de falha (SOUZA, B., 2016).

Figura 3. Imagem de um termograma de um isolador polimérico com anomalia térmica.



Fonte: SOUZA, B., 2016.

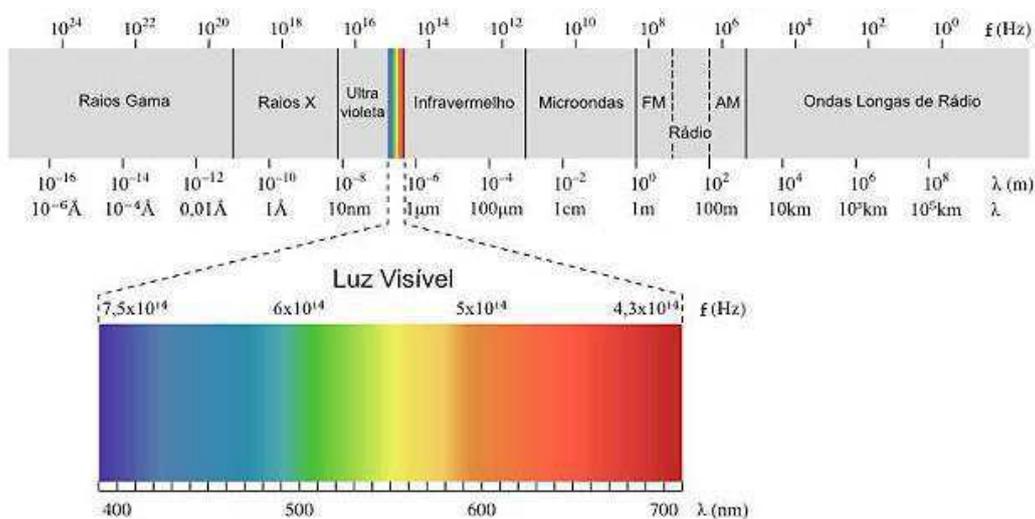
Em resumo, por meio da interpretação de termogramas, consegue-se identificar amplas faixas de temperatura. Neste contexto está inserido o uso da termografia usada para identificar a proximidade de ocorrência de falhas em isoladores poliméricos utilizados nas linhas de transmissão.

2.2.2 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha é uma característica comum a qualquer corpo com temperatura não nula. A termografia possibilita a detecção da radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado, que é invisível ao olho humano, e a transforma em imagens térmicas visíveis, com a possibilidade de convertê-las em leituras de temperatura (MALDAGUE; MOORE, 2001 apud SANTOS, 2006).

Dentro do espectro eletromagnético, ilustrado na Figura 4, a radiação infravermelha está localizada entre a região de radiação visível e a região de radiação de microondas e abrange comprimentos de onda que vão desde 0,78 μm até 1000 μm .

Figura 4. Espectro Eletromagnético.



Fonte: Adaptado de ALEXSYSTEMS, 2016.

O espectro infravermelho pode ainda ser dividido em sub-regiões e várias são as propostas publicadas na literatura (CHRZANOWSKI, 2001). Adota-se, atualmente segundo a ABNT (2016), uma classificação da faixa do infravermelho em cinco sub-regiões de comprimento de onda, como descritas pela Tabela 1.

Tabela 1. Divisão da radiação infravermelha adotada pela ABNT.

Região	Faixa de Comprimento de Onda
<i>Infravermelho muito próximo</i>	0,78 μm – 1 μm
<i>Infravermelho próximo</i>	1 μm – 3 μm
<i>Infravermelho médio</i>	3 μm – 6 μm
<i>Infravermelho distante</i>	6 μm – 15 μm
<i>Infravermelho muito distante</i>	15 μm – 1000 μm

Fonte: ABNT, 2016.

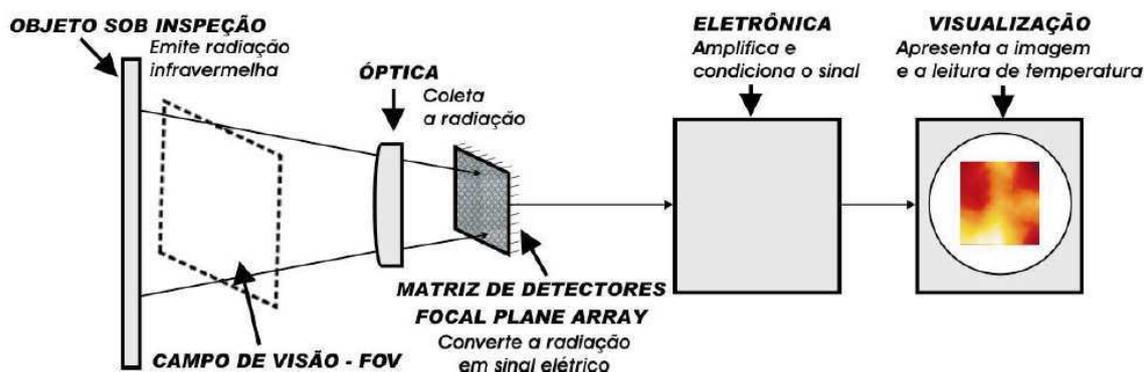
As ondas correspondentes à radiação infravermelha, assim como as radiações das diferentes regiões do espectro eletromagnético, propagam-se em linha reta, refletem, refratam, são absorvidas e viajam, no vácuo, a uma velocidade de aproximadamente 3×10^8 m/s (GONÇALVES, 2011). No Apêndice A é exibido mais alguns conceitos quanto a radiação infravermelha.

2.2.3 DETECÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

O termovisor é o principal equipamento utilizado para realização de inspeções termográficas. Por meio do termovisor a radiação emitida pelo equipamento inspecionado é detectada e convertida em imagem visível e em leituras de temperatura.

Os termovisores utilizam, como tecnologia de detecção, uma matriz e plano focal (*Focal Plane Array – FPA*) (ROGALSKI, 2012). O FPA é um dispositivo de sensoriamento de imagens que utiliza uma matriz bidimensional de detectores de radiação infravermelha. Cada elemento de detecção pode monitorar continuamente a emissão de radiação vinda do objeto sob inspeção (KAPLAN, 2007). Na Figura 5 é ilustrado o esquema simplificado de um detector de radiação infravermelha mostrando os elementos básicos da sua constituição e operação.

Figura 5. Esquema simplificado de um detector de radiação infravermelha.



Fonte: Adaptado de KAPLAN, 2007.

Em relação a detecção de radiação infravermelha, convém abordar os diversos aspectos que podem interferir na obtenção das imagens termográficas, a seguir, são apresentados os principais fatores que influenciam na detecção da radiação IF, bem como as principais vantagens e desvantagens da inspeção de equipamentos elétricos fazendo uso da termografia.

2.2.3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DETECÇÃO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Algumas precauções devem ser tomadas ao se realizar uma inspeção, visto que existem diversos fatores envolvidos que podem induzir a um diagnóstico incorreto ou até mesmo incapacitar a detecção do defeito.

Os principais fatores de influência em uma inspeção termográfica podem ser classificados como intrínsecos e extrínsecos. Os fatores intrínsecos estão relacionados ao modo de utilização do termovisor associado as características do equipamento sob inspeção. Por outro lado, os fatores extrínsecos estão relacionados às variáveis ambientais presentes no processo de detecção da radiação infravermelha emitida pelos equipamentos inspecionados (CRAVEIRO, 2008).

Aspectos como a qualidade da superfície e formato do equipamento elétrico, ângulo de visão e distância em relação a câmera de detecção, além da presença de poluição, oxidação e corrosão, fazem com que o valor da emissividade do objeto, submetido a inspeção, varie (EPERLY; HERBERTEIN; EADS, 1997). Como os termovisores não detectam a temperatura diretamente e sim a radiação, as leituras de temperatura fornecidas pelo termovisor tornam-se dependentes dos valores de emissividade.

O ambiente em que é realizada a inspeção termográfica exerce um importante papel nos resultados obtidos. A transmitância atmosférica, a radiação emitida pelo sol, a temperatura ambiente, o vento, a chuva e a umidade relativa do ar podem afetar de maneiras diferentes a distribuição térmica dos equipamentos sob inspeção, bem como a quantidade de radiação infravermelha que chega ao termovisor (SANTOS, 2006).

2.2.3.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TERMOGRAFIA

A principal vantagem da realização de inspeção por termografia é o fato de ser uma técnica não destrutiva e não invasiva a ser realizada a distância, indicada para o monitoramento de equipamentos operando sob altos níveis de tensão ou conduzindo uma corrente elevada (WANDERLEY NETO, 2007). Ou seja, devido à ausência de contato físico de instrumentos de medição com as instalações, a termografia estabelece um processo de coleta e análise de dados térmicos dotado de maior segurança.

Acrescenta-se também como vantagem um bom rendimento de inspeção, pois possibilita a cobertura de um número razoável de equipamentos em um curto período de tempo.

Além disso, um dos benefícios adquiridos pela utilização das imagens térmicas é a possibilidade de se fazer uma varredura completa da temperatura na superfície de todo o equipamento sob inspeção. Assim é possível detectar pontos de aquecimento normalmente imperceptíveis a olho nu (ÁLVARES, 2008).

Porém, uma das dificuldades encontradas para utilização deste método consiste em determinar com exatidão o valor de temperatura a partir do qual um determinado isolador pode ser considerado como degradado. No entanto, existem normas e recomendações de associações profissionais e de concessionárias de energia elétrica que estabelecem critérios de avaliação para determinar a necessidade e urgência de manutenção preventiva ou reparo. Na Tabela 2 é possível observar um exemplo de critérios de avaliações feitos pela *International Electrical Testing Association* para equipamentos elétricos que também pode ser utilizada para isoladores poliméricos (NETA MTS, 1997 apud EPPERLY; HERBERTEIN; EADS, 1997).

Tabela 2. Critérios de avaliação.

Diferenças de temperatura entre equipamentos similares, nas mesmas condições de carga	Diferença entre a temperatura do equipamento e o ambiente	Ação recomendada
1°C a 3°C	1°C a 3°C	Possível deficiência; justifica investigação.
4°C a 15°C	11°C a 20°C	Indica provável deficiência; reparar quando possível.
---	22°C a 40°C	Monitorar continuamente até que uma manutenção corretiva possa ser efetuada.
> 16°C	> 40°C	Reparar imediatamente.

Obs.: As temperaturas específicas variam dependendo do tipo de equipamento.

Fonte: NETA MTS, 1997 apud EPPERLY; HERBERTEIN; EADS, 1997.

O fato da termografia não selecionar apenas o objeto a ser inspecionado é também uma das desvantagens deste método, pois a presença de outras fontes de radiação infravermelha envolvidas no mesmo meio em que o objeto está inserido podem levar a erros de interpretação pelo termografista.

Diversas implementações têm sido realizadas com o intuito de melhorar o uso da termovisão, possibilitando a apresentação de um diagnóstico mais preciso. A utilização desta técnica requer determinados cuidados para se evitar que influências externas alterem os resultados. Como procedimento subsequente, pode-se ainda empregar técnicas de processamento de imagem para o aprimoramento da análise.

2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens (PDI) é uma subárea de grande relevância do processamento de sinais. Define-se como um conjunto de técnicas usadas na manipulação de imagens digitais no sentido de facilitar a extração de informações (ALBUQUERQUE, 2016).

Inicialmente, o termo imagem era associado apenas ao domínio da luz visível. Porém, atualmente, o termo imagem faz referência a uma grande quantidade de dados representados sob a forma bidimensional, como por exemplo, as imagens termográficas (GONZALES; WOODS, 2002).

Sendo assim, as imagens digitais, tal como os sinais, consistem em suportes físicos para uma determinada informação que pode ser uma medida, para o caso de sinais que representam fenômenos físicos.

2.3.1 IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem de um objeto é, em princípio, contínua tanto na sua variação espacial como nos níveis de cinza. Visando o seu processamento computacional a imagem deve ser digitalizada tanto no espaço quanto na amplitude. A digitalização das coordenadas espaciais é chamada amostragem da imagem e a digitalização da amplitude é chamada de quantização dos níveis de cinza (BRITO; CARVALHO, 1998).

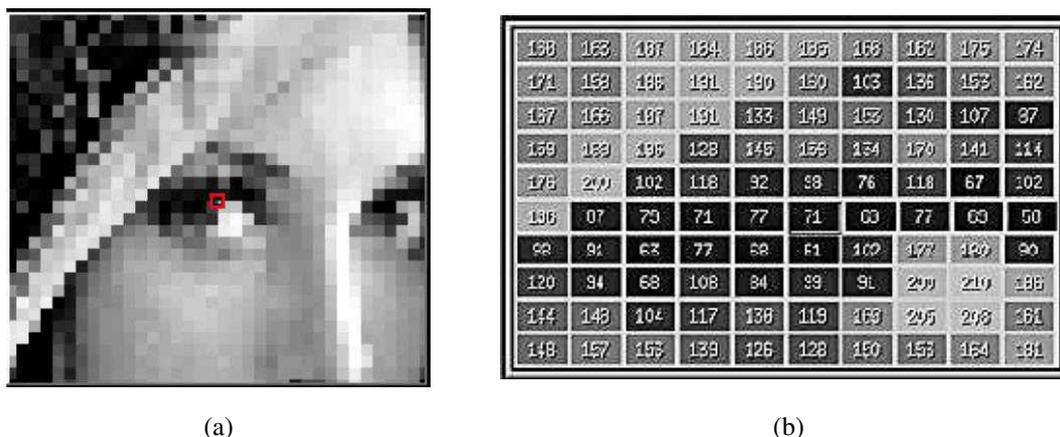
Uma imagem digital pode ser definida matematicamente como uma função bidimensional $f(x,y)$, em que x e y são as coordenadas espaciais e a amplitude f em qualquer par de coordenadas (x,y) é chamado intensidade ou nível de cinza da imagem naquele ponto (GONZALES; WOODS, 2002).

As imagens são compostas por um número finito de elementos denominados píxeis (elementos de imagem) representados na forma de uma matriz bidimensional $M \times N$, em que M representa o número de linhas e N o número de colunas. Deste modo, a matriz que representa os valores da função $f(x,y)$ para cada coordenada (x,y) pode ser representada na seguinte forma:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & \cdots & f(0,N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Na Figura 6 é mostrada a representação matricial de uma pequena região destacada. Os valores dos píxeis indicam a intensidade dos níveis de cinza da região definida por uma matriz 10×10 . Esta imagem está codificada com 8 bits por píxel. Assim, os valores de nível de cinza podem variar de 0 (preto) até 255 (branco).

Figura 6. Representação matricial de uma imagem digital. (a) Ponto destacado sobre a imagem; (b) Matriz de píxeis.



Fonte: FALCÃO; LEITE, 2000.

2.3.1.1 RESOLUÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

A capacidade de representação de informações visuais de uma imagem é definida por sua resolução (SOLOMON; BRECKON, 2011). Geralmente, a resolução de uma imagem pode ser decomposta em dois parâmetros principais: resolução espacial e a nível de bit. O primeiro refere-se ao tamanho da imagem ($M \times N$) e indica a quantidade de píxeis, sendo referido como resolução de píxel. O segundo parâmetro refere-se à quantidade bits utilizados para representar o sistema de cores/intensidades da imagem. Os parâmetros de qualidade e, portanto, de quantização de uma imagem estão completamente correlacionados aos parâmetros de resolução.

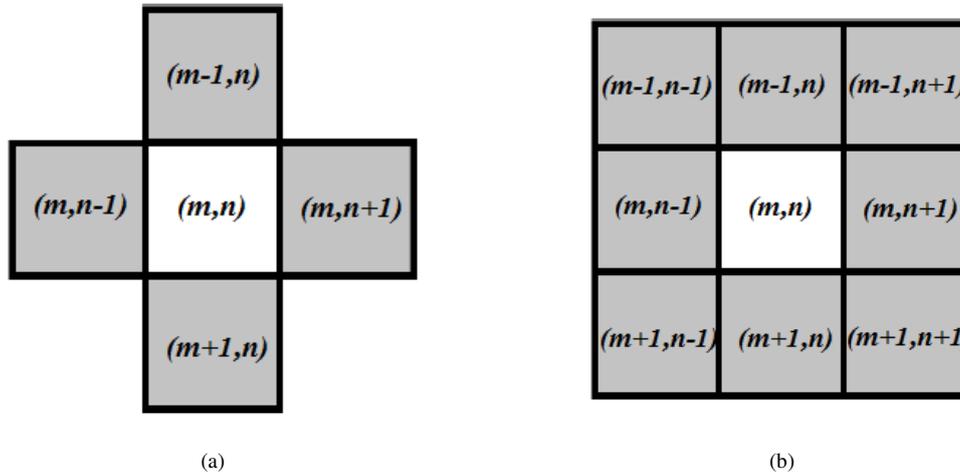
2.3.1.2 VIZINHANÇA DE PÍXEIS

Com o conhecimento da resolução de uma imagem é possível saber a quantidade de píxeis da imagem. Por meio de operações aritméticas, os píxeis podem ser correlacionados por intensidade de cor (nível de cinza, por exemplo). Esta tarefa requer a utilização de critérios de vizinhança entre os píxeis. Existem duas formas de vizinhança básicas para imagens bidimensionais, a vizinhança - 4 e a vizinhança - 8 (SOLOMON; BRECKON, 2011).

A vizinhança-4 relaciona um píxel aos seus vizinhos apenas nas coordenadas verticais e horizontais, de forma que a vizinhança é representada por 4 píxeis, como mostrado na Figura 7(a). A vizinhança-8 relaciona um píxel a todos os píxeis que fazem fronteira nas coordenadas verticais, horizontais e diagonais, de forma que 8 píxeis são

representados, como mostrado na Figura 7(b).

Figura 7. (a) Representação da vizinhança – 4 de um píxel. (b) Representação da vizinhança – 8 de um píxel.



Fonte: autoria própria.

2.3.1.3 HISTOGRAMA DE IMAGENS DIGITAIS

O histograma de uma imagem digital com níveis de cinza no intervalo $[0, L - 1]$ é definido por uma função discreta dada por (BATISTA, 2005):

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n}, \quad (2.2)$$

em que r_k é o k -ésimo nível de cinza, n_k representa o número de píxeis na imagem com este nível de cinza, n é o número total de píxeis da imagem, ou seja, $n = M \times N$ e $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$.

De forma simplificada, pode-se afirmar que o histograma de luminância de uma imagem representa a contagem dos níveis de cinza da imagem, podendo informar a distribuição dos píxeis dentro dos L níveis possíveis. O histograma pode ser considerado como uma função de distribuição de probabilidade (BATISTA, 2005), obedecendo aos axiomas e teoremas da teoria de probabilidades, *i.e.* que:

$$\sum_{k=0}^{L-1} p(r_k) = 1. \quad (2.3)$$

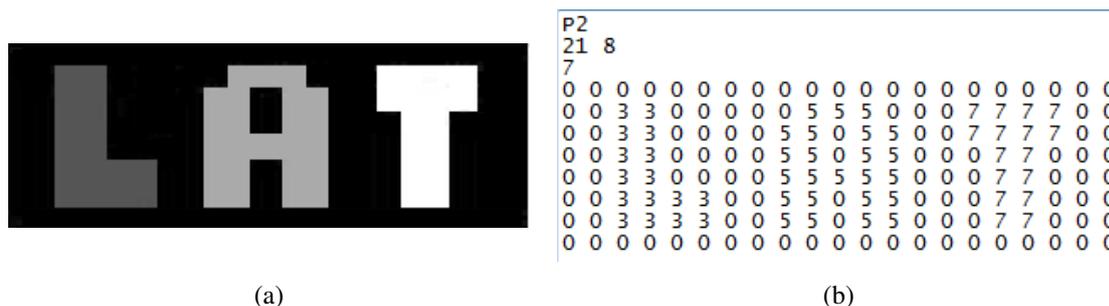
2.3.1.4 ESTRUTURA DOS ARQUIVOS DE IMAGENS NO FORMATO PGM

Existem diversos formatos de arquivo para armazenar uma imagem digital em um computador (exemplos: JPG, PNG, BMP etc.). No contexto desta dissertação, decidiu-se trabalhar com o formato de estrutura simples, o formato PGM (*Portable Gray Map*). Esse formato não usa algoritmos de compressão dos dados. O formato PGM é um arquivo texto que pode ser visualizado em um editor de textos. Cada imagem no formato PGM é composta por (MIRANDA, 2016):

- i. Uma primeira linha identificando o tipo de arquivo;
- ii. Opcionalmente, uma linha de comentários iniciada com o caractere '#';
- iii. Uma linha contendo as dimensões da imagem: o número de colunas (N) e o número de linhas (M);
- iv. Na sequência, a linha seguinte apresenta o valor máximo de intensidade presente na imagem;
- v. Por fim, tem-se os valores de intensidade dos píxeis que são armazenados percorrendo a matriz na ordem da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Na Figura 8 tem-se um exemplo de uma imagem e de seu arquivo texto correspondente no formato PGM tipo P2.

Figura 8. (a) Exemplo de uma imagem de 3 bits com dimensões 21 x 8, e (b) seu arquivo correspondente no formato PGM sendo visualizado em um editor de textos.



Fonte: autoria própria.

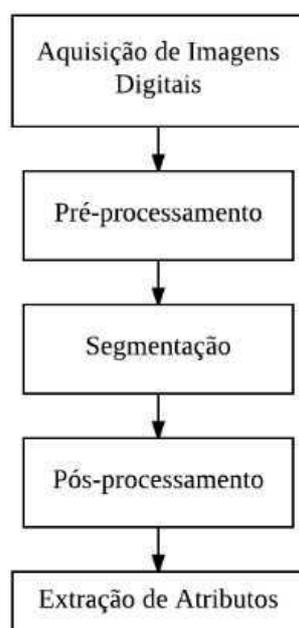
2.3.2 ETAPAS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens termográficas tem por função primordial, fornecer ferramentas para facilitar a identificação e extração das informações contidas nas imagens, para posterior interpretação. Assim, o PDI visa facilitar a extração de

informações e auxiliar na tomada de decisão.

O sistema de processamento de imagens é dividido em várias etapas (MARQUES FILHO e VIEIRA NETO, 1999). Um diagrama esquemático das etapas do processamento de imagens de uso genérico é ilustrado na Figura 9. E, nas seções seguintes serão descritas as principais técnicas de processamento de imagens, que no contexto desta dissertação, são mais relevantes.

Figura 9. Diagrama esquemático das etapas do processamento digital de imagens.



Fonte: autoria própria.

2.3.2.1 AQUISIÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

O processo de formação e digitalização de imagens é constituído por dois elementos. O primeiro deles é um dispositivo físico que deve ser sensível ao espectro de energia eletromagnético como, por exemplo, ao espectro da radiação infravermelha. Este dispositivo deve produzir em sua saída um sinal elétrico proporcional à quantidade de energia percebida. O segundo elemento é um digitalizador, dispositivo capaz de converter o sinal elétrico analógico da saída do sensor em um sinal digital (GONZALES; WOODS, 2002).

2.3.2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Após a aquisição das imagens, as técnicas de pré-processamento são aplicadas com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens. O melhoramento de imagem é obtido por meio de técnicas, tais como melhoramento do contraste e filtragem aplicadas com finalidades específicas enfatizando características de interesse ou recuperando imagens que sofreram algum tipo de degradação devido à introdução de ruído, perda de contraste ou borramento (ALBURQUERQUE, 2016).

A aplicação dessas técnicas, designadas como realce de imagem, são transformações radiométricas que modificam o valor dos níveis de cinza dos pontos da imagem (GONZALES; WOODS, 2002).

2.3.2.2.1 MELHORAMENTO DO CONTRASTE

Melhoramento de contraste busca melhorar a qualidade visual da imagem por meio da manipulação dos níveis de cinza. Segundo Mascarenhas e Velasco (1989) contraste consiste numa diferença local de luminância e pode ser definido como a razão dos níveis de cinza médios do objeto e do fundo.

O processo de melhoramento de contraste transforma a escala de cinza de forma pontual, ou seja, o novo valor do píxel depende somente do valor original. Uma função de transferência mapeia o valor de um píxel para um novo valor. Essa função é definida por:

$$g(x, y) = T(f(x, y)). \quad (2.4)$$

Em que $f(x, y)$ é o valor do nível de cinza original, T é uma função de transferência e $g(x, y)$ é o novo valor do píxel.

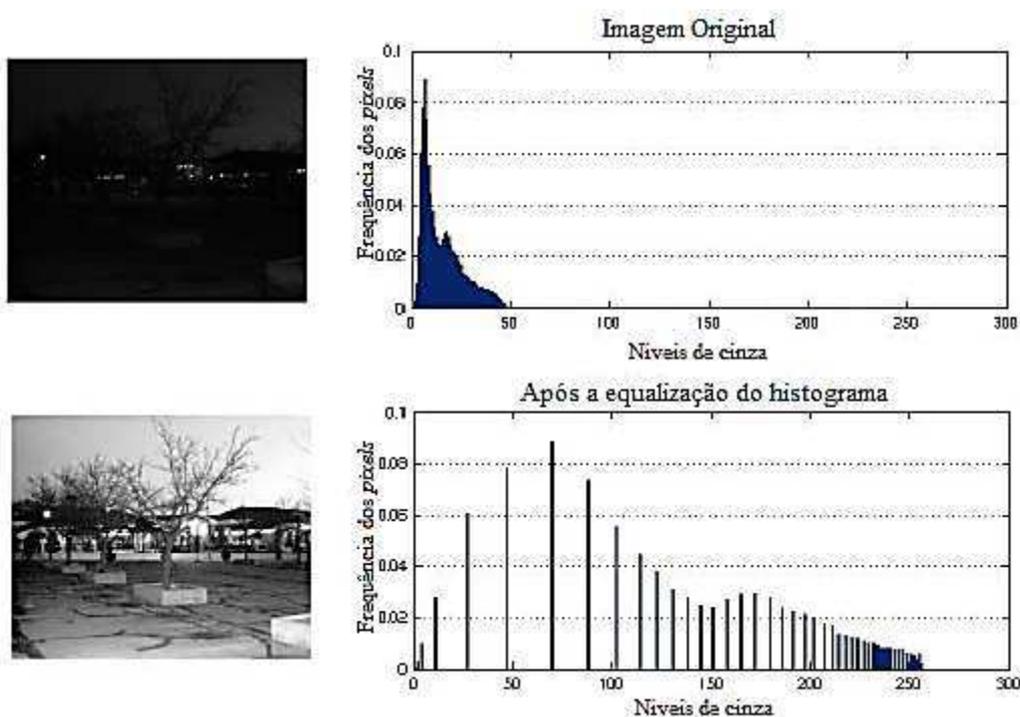
Uma forma de avaliar o contraste se faz por meio da análise do histograma da imagem, visto que o histograma de níveis de cinza representa uma descrição global da aparência da imagem. Quanto maior a distribuição dos valores dos níveis de cinza, melhor será o contraste da imagem.

2.3.2.2.2 EQUALIZAÇÃO DE HISTOGRAMAS

Uma das técnicas utilizadas para obtenção do melhoramento de contraste das imagens digitais é a equalização de histogramas (GONZALES; WOODS, 2002).

O objetivo da equalização de histograma é gerar uma imagem com uma distribuição de níveis de cinza uniforme. A técnica é útil para realçar diferenças sutis entre níveis de cinza próximos e leva, em muitos casos, a um aumento substancial no nível de detalhes perceptíveis (BATISTA, 2005), como ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Equalização de histograma.



Fonte: adaptado de JANANI; DINAKARAN, 2014.

A operação de equalização de histograma de uma imagem é proporcionada pela transformação dada por (SOLOMON; BRECKON, 2011):

$$T(r_k) = (L - 1) \sum_{i=0}^r p(r_i), \quad (2.5)$$

em que $p(r_i)$ é uma função de distribuição acumulada.

A motivação para essa transformação vem do fato de f (intensidade dos níveis de cinza da imagem original) e g (intensidade dos níveis de cinza da imagem equalizada) como variáveis aleatórias contínuas X, Y em $[0, L - 1]$ com Y definido por:

$$Y = T(X) = (L - 1) \int_0^X p_X(x) dx, \quad (2.6)$$

em que, p_X é a função densidade de probabilidade de f e T é a função de distribuição cumulativa de X multiplicada por $(L-1)$. Supondo, por simplicidade, que T é uma função diferenciável e invertível. Desta forma, pode ser mostrado que Y definido por $T(X)$ é uniformemente distribuído em $[0, L - 1]$, isto é:

$$p_Y(y) = \frac{1}{L - 1}. \quad (2.7)$$

Nota-se que:

$$\begin{aligned} \int_0^y p_Y(z) dz &= \text{probabilidade de } 0 \leq Y \leq y \\ &= \text{probabilidade de } 0 \leq X \leq T^{-1}(y) \\ &= \int_0^{T^{-1}(y)} p_X(w) dw. \\ \frac{d}{dy} \left(\int_0^y p_Y(z) dz \right) &= p_Y(y) = p_X(T^{-1}(y)) \frac{d}{dy} (T^{-1}(y)). \end{aligned}$$

Sabendo que $\frac{d}{dy} T(T^{-1}(y)) = \frac{d}{dy} y = 1$, então:

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=T^{-1}(y)} \frac{d}{dy} (T^{-1}(y)) = (L - 1) p_X(T^{-1}(y)) \frac{d}{dy} (T^{-1}(y)) = 1.$$

que significa $p_Y(y) = \frac{1}{L-1}$, que é uma distribuição uniforme no intervalo de definição da variável Y . Este resultado é independente da transformação inversa, o que é consideravelmente relevante pois a obtenção de $T^{-1}(y)$ pode não ser uma tarefa simples.

Em resumo, no processo de equalização de histograma é adotada a função cumulativa de probabilidades como função de transformação de níveis de cinza a ser aplicada na imagem original. Assim, este processo, é tal que tende a provocar na imagem

resultado uma distribuição de probabilidades uniforme, o seja, o histograma estaria equalizado com uma distribuição equitativa dos níveis de cinza.

2.3.2.2.3 *FILTRAGEM*

O processo de filtragem procura extrair informações como as bordas da imagem ou corrigir algumas degradações na imagem, tais como: borrões e ruídos inseridos pelo processo de aquisição ou na transmissão da imagem (GONZALES; WOODS, 2002).

2.3.2.2.4 *DETECÇÃO DE BORDAS*

O processo de detecção de bordas permite a análise de descontinuidades nos níveis de cinza de uma imagem. As bordas na imagem de interesse caracterizam os contornos dos objetos nela presentes, sendo úteis para a segmentação e identificação de objetos na imagem. As bordas podem ser entendidas como as posições dos píxeis vizinhos com mudanças bruscas de níveis de cinza. Há diversos métodos de detecção de borda por filtros espaciais, baseado no conceito de gradiente de funções bidimensionais, tais como os gradientes de Roberts, Prewitt e Sobel (BATISTA, 2002), além da possibilidade do uso da Transformada *Wavelet* para detecção de bordas (WALKER, 1999).

2.3.2.3 *SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS*

A segmentação consiste na separação da imagem em partes que a constituem e que a diferenciam entre si, ou seja, em grupos de píxeis que fornecem alguma informação (denominado de objeto) e em grupos de píxeis que podem ser desprezados. Os grupos de píxeis desprezados não são utilizados no processamento e são denominados de fundo (GONZALEZ e WOODS, 2002).

Esta etapa é considerada, dentre todas as etapas do processamento de imagens, a mais crítica do tratamento da informação. É na segmentação das imagens que são definidas as regiões de interesse para processamento e análises posteriores. Como consequência deste fato, quaisquer incertezas ou distorções presentes nesta etapa se refletem nas demais etapas, de forma a produzir ao final do processo resultados não desejados que podem contribuir de forma negativa para a eficiência de todo o processamento (ALBURQUERQUE, 2016).

Genericamente, a segmentação se dá pela aplicação de critérios que estabeleçam as diferenças a serem notadas pelo computador entre os objetos da imagem. Geralmente, utilizam-se características de intensidade, com a aplicação de um limiar (*threshold*), ou textura.

Um dos métodos de segmentação mais difundidos baseia-se na subdivisão de regiões correlatas pela posição e intensidade dos píxeis e é denominado segmentação por crescimento de região (*region growing*).

A segmentação por crescimento de região requer a utilização de píxeis sementes que servirão para comparação de similaridade entre píxeis vizinhos e posterior agregação à região da semente. Neste caso, o critério de agregação está submetido a uma faixa de tolerância entre as informações dos píxeis (SOLOMON; BRECKON, 2011).

A segmentação baseada no crescimento de região pode ser feita de duas formas: por varredura ou por busca em todas as direções. Ambos os métodos baseiam-se no fato das regiões a serem detectadas apresentarem propriedades locais aproximadamente constantes como, por exemplo, o nível de cinza (GONZALEZ e WOODS, 2002).

No crescimento por busca em todas as direções uma única região é crescida por vez. Na segmentação por varredura a imagem é percorrida da esquerda para direita e de cima para baixo comparando um píxel inicial da imagem com todos os outros píxeis, adicionando ou não os píxeis à região do ponto inicial.

2.3.2.4 PÓS-PROCESSAMENTO

O pós-processamento é a etapa que sucede a segmentação. Nesta etapa os principais defeitos ou imperfeições da etapa anterior são corrigidos. As correções são feitas através de técnicas de morfologia matemática com aplicação de filtros morfológicos que analisam quantitativamente os píxeis da imagem (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). A morfologia matemática é uma das grandes áreas do processamento digital de imagens. Fundamentalmente, tem-se duas linhas de descrição de seus métodos, os operadores booleanos de conjuntos (união, interseção, complemento etc.) e a noção de forma básica chamada de elemento estruturante (ALBUQUERQUE, 2016).

2.3.2.5 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

A extração de atributos é considerada a última etapa do processamento das

imagens. Consiste na extração das informações úteis da imagem previamente processada. Esta etapa pode ser feita de forma não automática, em que um especialista humano extrai informações baseando-se na inspeção visual da imagem ou de forma automática, feita por computador (ALBUQUERQUE, 2016).

2.4 OPERADORES ESTATÍSTICOS

Os operadores estatísticos possuem o objetivo básico de sintetizar vetores de dados que por meio de um ou alguns valores possam representar todos os dados do conjunto. Todo o conjunto é resumido em valores que representam uma visão global.

Nesta seção é apresentada uma descrição sucinta sobre os operadores estatísticos, calculados no desenvolvimento deste trabalho e que podem ser usados para a classificação de isoladores, tendo como base os valores de temperatura presentes ao longo do corpo do equipamento:

- *Valor de máximo*: corresponde ao valor máximo de um determinado conjunto de dados;
- *Amplitude*: é a diferença entre o maior valor e o menor valor de um determinado conjunto. Quanto maior a amplitude, mais heterogêneo será o conjunto de dados;
- *Variância*: A variância é a medida que determina o grau de dispersão (ou de concentração) de probabilidade em torno da média, ou seja, permite a medição da variabilidade dos valores em torno do valor médio das amostras dos comportamentos térmicos. A variância é calculada utilizando a expressão (HAUSCHILD; MOSCH, 1992):

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.8)$$

em que:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.9)$$

sendo \bar{x} , a média amostral dos valores de um determinado conjunto de dados, e x_i os valores individuais.

A utilização dos operadores estatísticos auxilia na sumarização das informações disponíveis sobre o comportamento da variável em questão, ou seja, resumir todo o conjunto por meio de um ou alguns valores que possam ser representativos para todos os dados. Ao utilizar um único valor obtém-se uma redução significativa do conjunto de dados e, conseqüentemente uma redução no esforço computacional.

No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica acerca do monitoramento de isoladores poliméricos, dando ênfase as técnicas de PDI termográficas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O grupo de pesquisa do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) possui pesquisadores dedicados ao trabalho de monitoramento de isoladores. Destacam-se algumas dissertações e tese desenvolvidas ao longo dos últimos anos.

Dissertações:

- Em 2005, **Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos**, de Max Gleison Gonçalves Neri (NERI, 2005);
- Em 2010, **Análise da Degradação de Isolamentos Poliméricos**, de André Dantas Germano (GERMANO, 2010);
- Em 2011, **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos**, de Warner Peixoto Pinheiro Barros (BARROS, 2011);
- Em 2014, **Classificação de Isoladores de Vidro de Alta Tensão a Partir do Espectro Eletromagnético Irradiado**, de Pedro Henrique Venske da Rocha (ROCHA, 2014);
- Em 2015, **Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy**, de Camila Pires Gouveia Guedes (GUEDES, 2015);
- Em 2015, **Análise de Sensibilidade do Método dos Vetores de Energia dos Centroides das Sub-Bandas Espectrais aplicado ao Monitoramento de Isoladores Poliméricos**, de Marcus Tullius Barros Florentino (FLORENTINO, 2015);
- Em 2016, **Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas**, de Bruno Almeida de Souza (SOUZA, B., 2016);
- Em 2016, **Análise da Corrente de Fuga de Isoladores Poliméricos para Classificação das Condições de Degradação com Auxílio de Lógica Fuzzy**, de Yorkismar de Andrade Mendonça (MENDONÇA, 2016).

Tese:

- Em 2011, **Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico**, de Tarso Vilela Ferreira. (FERREIRA, 2011).

Este capítulo descreve as principais pesquisas relacionadas ao monitoramento de equipamentos elétricos baseadas no uso da termografia, dando ênfase aos isoladores poliméricos, algumas destas pesquisas foram desenvolvidas pelo grupo de pesquisas do LAT. Deste modo, a revisão bibliográfica realizada abrange estudos relacionados à área de detecção da radiação infravermelha, isoladores poliméricos e processamento digital de imagens termográficas.

Posteriormente à comercialização dos primeiros termovisores, em meados da década de 1960, alguns estudos começaram a ser desenvolvidos e publicados. Inicialmente pesquisas que tinham como objetivo apresentar a nova tecnologia à sociedade civil e sua aplicação às diversas áreas do conhecimento humano. Entre estas pesquisas está o trabalho de Ferreti e Giorgi (1969), que cita a possibilidade do emprego da termografia em várias áreas e aponta a área médica e a área elétrica como áreas típicas para sua utilização.

Ferreti e Giorgi (1969) apresentaram a tecnologia de detecção de radiação IF e suas vantagens na aplicação em sistemas elétricos de alta tensão. Além disso, descreveram os resultados de uma inspeção termográfica realizada em subestações de 132 kV e 220 kV. Os autores fizeram uso de um critério baseado nos valores de temperatura para classificação dos componentes sobreaquecidos, foram avaliados cerca de 10.000 componentes e 381 (3,81%) foram diagnosticados com sobreaquecimento.

O estudo efetuado por Brice (1978) mostrou a importância da realização de manutenções preventivas em equipamentos elétricos energizados nas subestações de alta tensão. Algumas falhas dos equipamentos elétricos podem ser detectadas devido à visualização dos pontos quentes nos equipamentos em operação. Um método de localização destes pontos quentes é a detecção remota da radiação infravermelha emitida pelos equipamentos submetidos à inspeção. Em seu estudo, Brice (1978) fez uma revisão dos sistemas de detecção de radiação IF aplicáveis a estes casos. Em seguida, apresentou uma pesquisa de sistemas, adequados para realização de manutenções preventivas em equipamentos elétricos, disponíveis comercialmente. Por fim, Brice (1978) destacou os desenvolvimentos na tecnologia de detecção de radiação infravermelha.

Os pesquisadores Epperly, Heberlein e Eads (1997) em seu trabalho afirmaram que um programa de inspeção termográfica utilizando equipamento adequado e profissionais devidamente treinados pode ser extremamente efetivo para prevenir falhas potenciais em sistemas elétricos. O artigo contém uma breve descrição da termografia infravermelha e de suas vantagens e limitações. Além disso, os autores descreveram estudos de caso, citaram critérios para seleção de um termovisor adequado e apresentaram diferentes normas para determinar a urgência do reparo após a constatação da presença de defeito em equipamentos elétricos pela inspeção termográfica.

Devido à importância que os isoladores poliméricos possuem para o sistema elétrico, a pesquisa realizada por Bologna, Mahatho e Hoch (2002) buscou avaliar técnicas de inspeção utilizando medições de radiação infravermelha e de radiação ultravioleta emitidas pelos isoladores poliméricos. Para tanto, os autores realizaram em laboratório ensaios com dois isoladores poliméricos danificados. O primeiro isolador apresentava trilhamento de núcleo e o segundo apresentava erosão no revestimento.

Bologna, Mahatho e Hoch (2002) concluíram que a identificação do trilhamento do núcleo e erosão no revestimento de isoladores poliméricos pode ser realizada tanto pela utilização da técnica de detecção de radiação UV quanto pela utilização da técnica de detecção de radiação IF. Também, constataram que a sensibilidade das técnicas é aumentada pela presença da umidade na superfície do isolador, indicando a influência da variação de umidade durante as medições.

A dissertação de Neri (2005) teve como objetivo analisar diversas técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falha. As técnicas avaliadas fazem uso da medição de descargas parciais, em laboratório, da radiação ultravioleta, emitida pelas descargas de corona, e da radiação infravermelha, emitida pelos corpos aquecidos. Para tanto, foram avaliadas seis unidades de isoladores poliméricos de 69 kV, sendo que uma unidade apresentava total integridade e foi considerada como referência. As demais apresentavam diferentes tipos de defeitos. Em cada isolador foi implantado apenas um tipo de defeito e estes ocorriam basicamente na interface entre os materiais ou na superfície. As seis amostras de isoladores poliméricos foram submetidas a ensaios de medições de descargas parciais, medição de temperatura a seco, medição de temperatura com névoa e simulação de comportamento do campo elétrico. A análise dos resultados evidenciou que as técnicas de inspeção aplicadas eram promissoras.

Além disso, Neri (2005) verificou, a partir dos ensaios, a possibilidade de

classificação dos defeitos apresentados em baixa, média ou alta degradação. O isolador em que o defeito implantado foi a retirada do revestimento (2 cm de largura por 0,5 cm de comprimento), com a consequente exposição do núcleo, foi considerado de baixa degradação. Por outro lado, o defeito em que foi retirada a aderência entre o revestimento e o bastão, a partir da ferragem do lado fase, foi considerado o de maior degradação.

Neri (2005) concluiu, ainda, que os defeitos internos não podem ser relacionados com a atividade corona. Este é um fato esperado pois as descargas corona ocorrem em meio gasoso, com a rigidez dielétrica do ar sendo excedida localmente. Desse modo, o autor constatou que a inspeção de isoladores poliméricos associando os detectores de corona e infravermelho é uma promissora técnica para detecção de isoladores defeituosos.

Uma compreensão mais abrangente do trilhamento de núcleo dos isoladores poliméricos e sua formação foi estudada por Ferreira (2007). Ele propôs uma técnica de criação de indícios de trilhamento de núcleo e os seus fatores predominantes, incluindo a geração de calor e campo elétrico nas regiões de interesse do isolador. Na pesquisa foram utilizadas uma câmera de detecção de radiação ultravioleta e uma câmera de detecção de radiação infravermelha para inspecionar os níveis de descargas corona nas proximidades do isolador e as temperaturas superficiais no mesmo.

Além disso, várias configurações de anéis de equalização foram avaliadas por Ferreira (2007), com o objetivo de analisar a influência deles no comportamento térmico e elétrico dos isoladores. Os resultados mostraram que a não utilização de anéis de equalização é totalmente desaconselhada e que o anel recomendado pela empresa que vendeu os isoladores diminuiu sensivelmente os níveis de corona, mas não os gradientes térmicos. Além disso, o autor constatou que a forma de instalação do anel não influencia fortemente os padrões de temperatura e descargas corona. Assim, Ferreira (2007) projetou, construiu e avaliou um anel otimizado para ser aplicado em isoladores poliméricos de 230 kV, o qual melhorou o desempenho dos isoladores, apresentando-se como alternativa viável e funcional.

No trabalho de Costa et al. (2007) avaliou-se o desempenho de isoladores poliméricos classe 230 kV, utilizados em linhas de transmissão da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), empregando as seguintes técnicas de monitoramento: detecção de radiação IF e detecção de radiação UV. Foram utilizadas duas amostras de isoladores, um isolador novo e um envelhecido em campo. Este último, devido ao local onde se encontrava em operação, possuía um significativo acúmulo de poluição orgânica e limo. Posteriormente, a poluição e o limo foram retirados por meio

de uma lavagem e o mesmo isolador foi ensaiado novamente. Para cada situação dos isoladores frente a diferentes distribuições de campo elétrico, foram utilizadas diferentes configurações de anéis equalizadores.

Costa et al. (2007) concluíram que a poluição dos isoladores poliméricos tem influência direta no comportamento eletrotérmico do equipamento e, conseqüentemente, na vida útil do isolador. Além disso, os autores constataram que a aplicação de anéis de equalização bem dimensionados é fator decisivo na vida útil do isolador, pois são capazes de alterar o campo elétrico nas zonas de interação próximas à ferragem energizada e, por conseqüência, reduz as temperaturas.

Quando nas medições em campo ou mesmo em laboratório, as imagens termográficas podem apresentar baixo contraste devido à pequena diferença de temperatura entre o fundo da imagem e o objeto submetido a inspeção. Isto, conseqüentemente, ocasiona a dificuldade de reconhecimento e localização do equipamento elétrico na imagem termográfica. Pelo exposto e em virtude da importância da técnica de monitoramento de equipamentos elétricos baseada na detecção de radiação infravermelha, diversos pesquisadores realizaram estudos relacionados ao processamento digital de imagens termográficas na busca de desenvolverem uma ferramenta para melhoramento do contraste para pôr em evidência as regiões de interesse.

Os pesquisadores Choi et al. (2009), Lai et al. (2010) e Liang et al (2012) constataram que as imagens termográficas apresentam baixo contraste e atentaram para o fato de que o realce do contraste é um passo fundamental e deve ser aplicado como base no processamento digital de imagens termográficas. Diante disso, os autores propuseram novos algoritmos relacionados com a manipulação de histograma das imagens para alcançar um melhoramento no contraste das imagens termográficas.

Choi et al. (2009), Lai et al. (2010) e Liang et al (2012), com o objetivo de mostrar a validade dos algoritmos propostos, apresentaram resultados experimentais para várias imagens termográficas e, como resultado final, observou-se um aprimoramento significativo da qualidade visual das imagens.

Além do benefício da qualidade visual, o processamento digital de imagens pode ser utilizado para analisar quantitativamente as imagens termográficas. Diante disto, estudos realizados por Liu, Du e Yang (2012) buscaram estabelecer um método para avaliar a hidrofobicidade do revestimento de isoladores poliméricos. Para tanto, os pesquisadores fizeram uso do processamento digital de imagens termográficas para extração dos valores de temperatura ao longo do corpo do isolador. O método proposto

por Liu, Du e Yang (2012) relaciona os valores de temperatura, extraídos do PDI termográficas, com o nível de envelhecimento do revestimento dos isoladores poliméricos.

Liu, Du e Yang (2012) realizaram ensaios de envelhecimento artificial para obter amostras de isoladores com diferentes níveis de hidrofobicidade. Os experimentos realizados indicaram que há uma tendência crescente nos valores de temperatura com a diminuição da hidrofobicidade do revestimento dos isoladores poliméricos.

Seguindo a linha de pesquisa baseada no PDI para extração de dados de imagens termográficas, Albano et al. (2014) propuseram um novo método de ensaios em isoladores poliméricos direcionado à detecção de bandas secas na superfície do isolador. Em outras palavras, o estudo desenvolvido por Albano et al. (2014) busca caracterizar a formação das bandas secas e atividades de descargas (*flashover*) por meio do monitoramento de isoladores poliméricos. Para tanto, os autores realizaram ensaios em laboratório com uma amostra de isolador posicionada no interior de uma câmara de névoa salina. As atividades de descargas eram monitoradas utilizando uma câmara fotográfica de alta resolução e uma câmara de detecção de radiação IF.

Na mesma pesquisa, Albano et al. (2014) fizeram uso do processamento digital das imagens termográficas para identificar o aumento dos valores de temperatura ao longo do corpo do isolador e, conseqüentemente, por meio da correlação com os dados visuais, foi possível reconhecer e localizar as bandas secas na superfície do isolador inspecionado.

O trabalho desenvolvido por Irshad e Jaffery (2015) contém um estudo comparativo de vários métodos de segmentação de imagens. O objetivo principal dos autores era identificar a técnica mais adequada para aplicação em imagens termográficas. Segundo os autores, os cinco métodos de segmentação de imagens mais empregados, disponíveis na literatura, foram considerados para análise e comparação: Método de Otsu, Método de Kapur, *Fuzzy c-means* (FCM), Crescimento de Regiões e Limiarização Interativa. A comparação foi feita em termos de exatidão, precisão, sensibilidade e especificidade, ou seja, estes quatro parâmetros foram calculados para cada método.

Irshad e Jaffery (2015) concluíram que para detectar as áreas quentes em imagens termográficas, a segmentação por crescimento de regiões é o método mais exato e preciso. Os demais métodos implementados podem ser considerados adequados para segmentação de imagem visual, mas devido ao excesso de segmentação, isto é, identificação de áreas quentes não existentes na imagem, tornam-se métodos não apropriados para segmentação de imagens termográficas.

A dissertação de Souza, B. (2016) tem como objetivo propor uma técnica de classificação de isoladores indicando o seu nível de degradação, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de intervenções (trocas) e, conseqüentemente, contribuir para a redução das interrupções e aumentar a confiabilidade do sistema. Para tanto, o autor realizou ensaios, em laboratório, para medições da radiação infravermelha emitida por isoladores poliméricos.

Souza, B. (2016) utilizou isoladores poliméricos de 230 kV com diferentes níveis de degradação como objetos de teste. As imagens obtidas nos ensaios, por meio da câmera de detecção de radiação IF, foram processadas para extração dos valores de temperatura ao longo do corpo do isolador e eliminação de interferências. Após o PDI termográficas, com os resultados obtidos, foi proposto um sistema utilizando rede neural para classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos pelo seu grau de criticidade: isolador bom, isolador médio e isolador crítico. A técnica se mostrou promissora no auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não ao equipamento inspecionado.

Visando a realização do monitoramento e avaliação do estado térmico de isoladores em operação em linhas de transmissão, Zhao, Xu e Qi (2016) propuseram uma técnica para localização de isoladores a partir de imagens termográficas de modo automático. Para tanto, um modelo de classificação baseado em Maquinas de Vetores de Suporte (SVM - *Support Vector Machine*) foi utilizado para auxiliar na detecção da localização de isoladores nas imagens termográficas.

A taxa de assertividade do método proposto pelos pesquisadores foi de 89,10%. Além da alta exatidão de localização, os resultados obtidos mostraram que o método proposto por Zhao, Xu e Qi (2016) tem baixa complexidade computacional e baixo tempo de processamento para a detecção de vários isoladores com diferentes ângulos de posicionamento a partir de imagens termográficas.

Como consequência da revisão bibliográfica apresentada, constatou-se que os efeitos da temperatura na degradação dos isoladores poliméricos estão sendo estudados em diversas pesquisas. Além disso, os resultados obtidos ao longo do tempo, na busca da modelagem de um sistema que consiga analisar e determinar defeitos em isoladores poliméricos com a menor intervenção humana possível evoluiu significativamente, graças aos recursos do processamento digital de imagens. Porém, ainda não foi possível definir um modelo objetivo que consiga determinar com confiança o tempo de vida útil dos isoladores poliméricos.

A fim de sintetizar as contribuições dos trabalhos supracitados, a seguir são apresentadas nas Tabelas 3 e 4 as principais referências e contribuições abordadas nesta revisão bibliográfica.

Tabela 3. Principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas abordados nessa dissertação.

Pesquisadores	Estudos realizados/Contribuições
Ferreti e Giorgi (1969)	Buscaram apresentar a tecnologia de detecção de radiação IF à sociedade civil e como ela poderia ser aplicada às diversas áreas do conhecimento humano, dando ênfase a aplicação em sistemas elétricos de alta tensão.
Brice (1978)	Faz uma revisão dos sistemas de detecção de radiação IF aplicáveis a manutenções preventivas em equipamentos elétricos energizados nas subestações de alta tensão.
Epperly, Heberlein e Eads (1997)	Apresentam as principais vantagens e limitações do uso da termografia e indicaram diferentes normas para determinar a urgência do reparo após a descoberta de defeito em equipamentos elétricos pela inspeção termográfica.
Bologna, Mahatho e Hoch (2002)	Avaliaram técnicas de inspeção utilizando medições de radiação infravermelha e de radiação ultravioleta em isoladores poliméricos. Constataram que a presença de falhas pode ser identificada com o monitoramento da radiação IF emitida pelos isoladores poliméricos em operação.
Neri (2005)	Avaliou técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. Considerou a inspeção com detector de radiação IF como uma promissora técnica na detecção de isoladores defeituosos.
Ferreira (2007)	Estudou o mecanismo do processo de trilhamento de núcleo e constatou a necessidade de monitoramento da degradação de isoladores fazendo uso de técnicas de detecção de radiação IF.
Costa et al. (2007)	Avaliou o desempenho de isoladores poliméricos utilizando como uma das técnicas de monitoramento a detecção de radiação IF. Concluíram que a poluição dos isoladores poliméricos tem influência direta no comportamento eletrotérmico do equipamento e, conseqüentemente, na vida útil do isolador.

Fonte: autoria própria.

Tabela 4. Continuação: Principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas abordados nessa dissertação.

Pesquisadores	Estudos realizados/Contribuições
Choi et al. (2009)	
Lai et al. (2010)	Constataram que as imagens termográficas apresentam baixo contraste e atentaram para o fato de que o realce do contraste é um passo fundamental e deve ser aplicado como base no PDI termográficas.
Liang et al. (2012)	
Liu, Du e Yang (2012)	Buscaram estabelecer um método para avaliar a hidrofobicidade do revestimento de isoladores poliméricos. Fizeram uso do PDI termográficas para extração dos valores de temperatura ao longo do corpo do isolador.
Albano et al. (2014)	Propuseram um novo método de ensaios em isoladores poliméricos direcionado a detecção de bandas secas na superfície do isolador. Fizeram uso do PDI termográficas para identificar o aumento dos valores e temperatura ao longo do corpo do isolador.
Irshad e Jaffery (2015)	Realizaram um estudo comparativo de vários métodos de segmentação de imagens com o objetivo principal de identificar qual técnica é a mais adequada para aplicação em imagens termográficas. Concluíram que a segmentação por crescimento de regiões é o método mais exato e preciso para identificação de regiões quentes nas imagens termográficas.
Souza, B. (2016)	Utilizou isoladores poliméricos de 230 kV que estavam em campo, os isoladores foram monitorados utilizando um detector de radiação IF. Uma técnica foi proposta para classificar o estado de degradação dos isoladores fazendo uso do PDI termográficas.
Zhao, Xu e Qi (2016)	Propuseram uma técnica de alta taxa de assertividade para localização de isoladores a partir de imagens termográficas de modo automático.
Esta dissertação	Utilizou imagens termográficas de isoladores poliméricos de 230 kV com diferentes níveis de degradação. Uma técnica de PDI termográficas baseada na equalização e segmentação de imagens foi proposta para auxiliar na inspeção de isoladores poliméricos.

Fonte: autoria própria.

Este capítulo apresentou um resumo das principais pesquisas relacionadas ao monitoramento de equipamentos elétricos baseadas no uso da termografia e no PDI

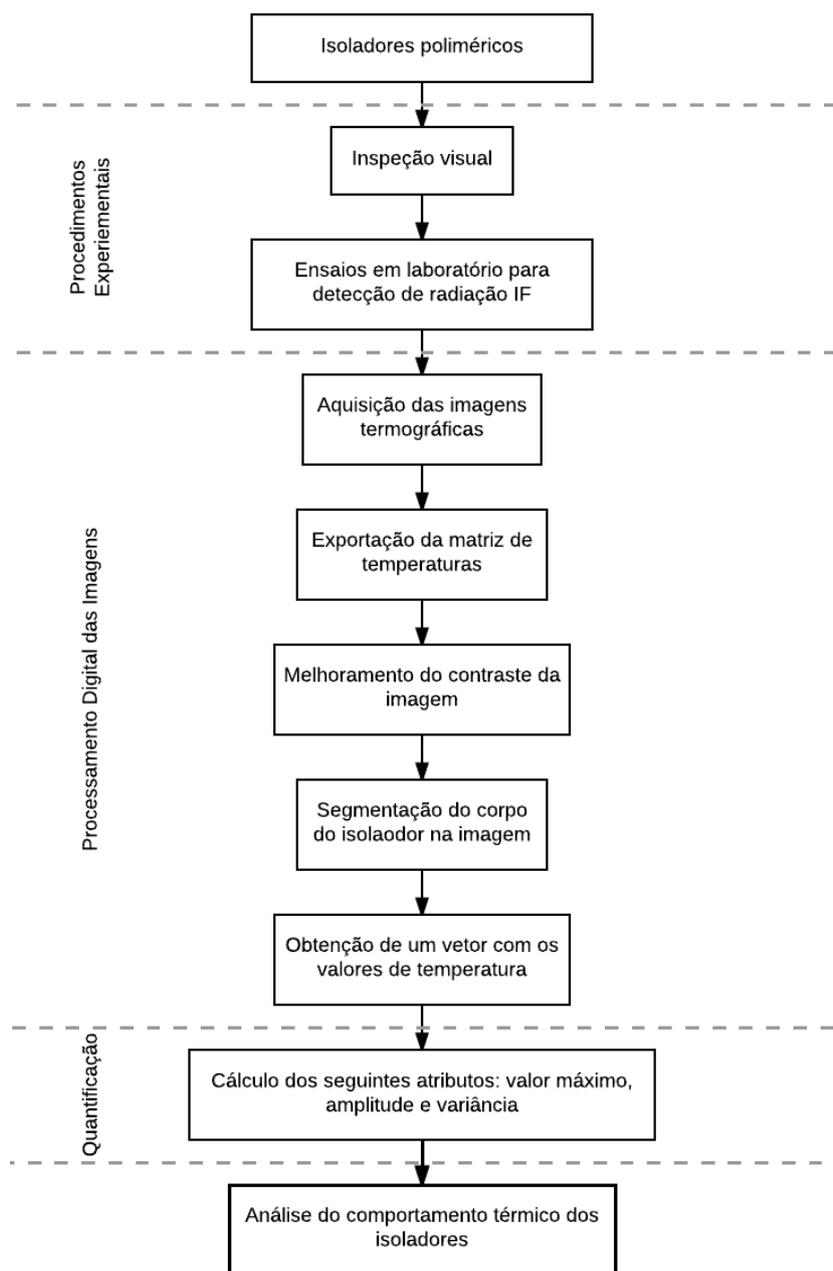
termográficas. O próximo capítulo será dedicado à descrição dos materiais utilizados e métodos aplicados no desenvolvimento desse trabalho.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos o material e os métodos empregados para o desenvolvimento da pesquisa. Na Seção 4.1 é relatado o material utilizado como objeto de teste. A metodologia desenvolvida é abordada na Seção 4.2, onde estão descritos os arranjos montados em laboratório para os ensaios experimentais, como também, as técnicas utilizadas no processamento digital das imagens para extração dos dados e análise quantitativa.

Um fluxograma que representa a metodologia adotada é apresentado na Figura 11. Como entrada do processo estão os isoladores poliméricos submetidos à inspeção. Os procedimentos experimentais são compostos por ensaios em laboratório para detecção da radiação infravermelha e inspeções visuais dos isoladores ensaiados. O processamento digital das imagens termográficas constitui-se da exportação da matriz dos valores de temperatura, seguido pelo melhoramento do contraste das imagens. Posteriormente, ocorre a segmentação do corpo do isolador nas imagens. O PDI termina com a obtenção de um vetor constituído pelos valores de temperatura pertencentes ao corpo dos isoladores. No processo de quantificação dá-se o cálculo dos seguintes atributos: temperatura máxima, amplitude dos valores de temperatura e variância. Por fim, a partir dos dados extraídos das imagens termográficas analisa-se o comportamento térmico dos isoladores.

Figura 11. Fluxograma da metodologia adotada.



Fonte: autoria própria.

4.1 MATERIAL

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho são as imagens termográficas de isoladores poliméricos de 230 kV. O processo de aquisição das imagens ocorreu por meio de ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

(OLIVEIRA, 2015; SOUZA, B., 2016), contudo sempre houve a participação da autora nos ensaios elétricos. As imagens foram captadas com o auxílio de um detector de radiação infravermelha. Na Figura 12 é apresentada uma imagem termográfica típica de um isolador polimérico obtida nos ensaios laboratoriais.

Figura 12. Imagem termográfica de um isolador polimérico captada pelo termovisor.



Fonte: SOUZA, B., 2016.

4.1.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Os isoladores poliméricos ensaiados em laboratório foram cedidos pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) com diferentes estados de degradação. Do total dos isoladores, oito foram selecionadas, levando em consideração seus níveis de degradação, para realização dos ensaios. Os isoladores submetidos aos ensaios foram rotulados de I a VIII. Um dos isoladores é mostrado na Figura 13.

A classe de tensão dos isoladores é de 230 kV. Cada isolador possui um peso de 8,8 kg e suporta uma carga mecânica de 222 kN. Os isoladores utilizados para aquisição das imagens termográficas constituem-se de um núcleo de fibra de vidro reforçada com resinas, revestimento de borracha de silicone, com 21 aletas e terminais tipo concha/bola. Além disso, a distância total de escoamento é 6,53 m e a distância de arco a seco é 2,08 m (LAPP INSULATORS, 2014 apud FLORENTINO, 2015). Essas informações estão resumidas na Tabela 5.

Figura 13. Fotografia de um isolador polimérico utilizado nos ensaios.



Fonte: FLORENTINO, 2015.

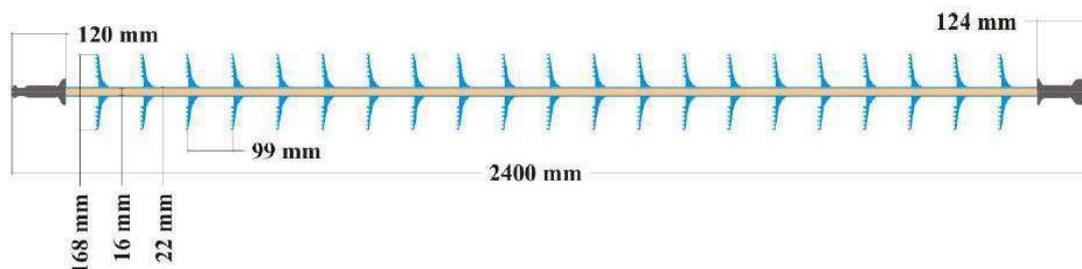
Tabela 5. Informações técnicas dos isoladores poliméricos utilizados nos ensaios.

Tensão nominal	Peso	Carga mecânica nominal	Quantidade de aletas	Distância de arco a seco	Distância de escoamento
230 kV	8,8 kg	222 kN	21	2,08 m	6,534 m

Fonte: FLORENTINO, 2015 apud LAPP INSULATORS, 2014.

As características e dimensões do modelo do isolador polimérico são mostradas na Figura 14 (FERREIRA, 2007).

Figura 14. Diagrama do modelo de isolador polimérico utilizado nos ensaios.



Fonte: FERREIRA, 2007.

4.1.2 DETECTOR DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A captação das imagens é realizada com uma câmera especial de detecção de emissões de radiações infravermelhas, cujo modelo é o T300, fabricante FLIR e com faixa espectral de 7,5 a 13 μ m. As imagens são armazenadas com resolução de 240x320 píxeis no instante da medição. Na Figura 15 pode ser visto a fotografia do equipamento citado.

Figura 15. Fotografia do termovisor.



Fonte: FLIR, 2016.

4.2 MÉTODOS

Os métodos utilizados para realização deste trabalho dividem-se em três etapas principais. A primeira etapa resume-se na realização de uma inspeção visual minuciosa em cada isolador separadamente, de modo a identificar e registrar os danos existentes.

A segunda etapa consiste na realização dos ensaios em laboratório para aquisição das imagens termográficas.

A última etapa refere-se à elaboração e ao processamento de um algoritmo computacional que extrai atributos das imagens termográficas de isoladores poliméricos sob tensão. A entrada do algoritmo é constituída pelos termogramas obtidos durante ensaio de medição e fornece como resultados vetores de dados correspondente aos valores de temperatura do corpo dos isoladores ensaiados, bem como a sumarização dos dados estatísticos dos valores de temperatura adquiridos após o processamento.

4.2.1 INSPEÇÃO VISUAL

Na primeira etapa deste trabalho, uma inspeção visual foi realizada com cada um dos isoladores utilizados nos ensaios. Foram avaliadas as condições do revestimento do núcleo, das aletas, das ferragens e das emendas entre as ferragens e o núcleo, além das condições de poluição depositadas nas superfícies dos isoladores.

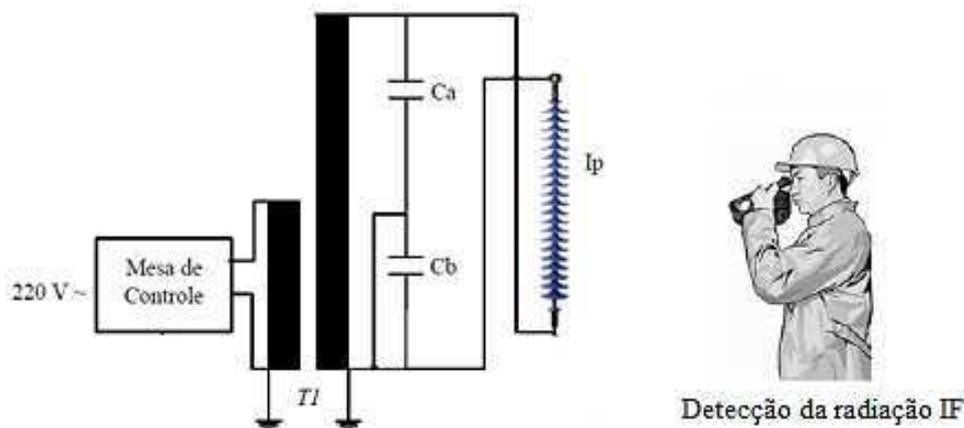
4.2.2 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS

Nesta seção são descritos os métodos empregados nas medições, em laboratório, para aquisição das imagens termográficas.

4.2.2.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os ensaios para aquisição das imagens termográficas foram realizados nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Uma representação do arranjo experimental do circuito de medição da radiação infravermelha pode ser visualizada na Figura 16. A mesa de controle, alimentada em 220 V, é responsável por controlar os níveis de tensão do circuito com o auxílio do divisor de tensão capacitivo, representado pelos capacitores C_a e C_b . O transformador de 600 kV / 600 kVA, representado por T_1 , é alimentado por uma subestação externa e eleva a tensão para os níveis adequados ao experimento. Um isolador polimérico, representado por I_p , é submetido à tensão, e a radiação IF é detectada pelo termovisor.

Figura 16. Diagrama esquemático do arranjo experimental para detecção da radiação IF.



Fonte: autoria própria.

Figura 17. Fotografia do transformador em cascata utilizado nos ensaios em alta tensão.

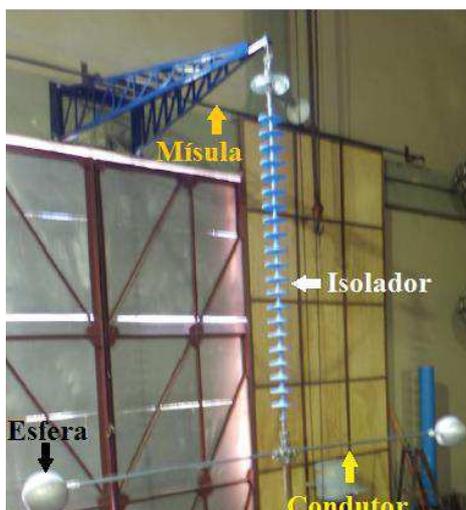


Fonte: FLORENTINO, 2015.

De modo a realizar os ensaios em condições mais próximas possíveis às existentes nas linhas de transmissão, foi desenvolvida uma estrutura de suporte ao isolador polimérico para simular a mísula de uma torre autoportante. A estrutura foi fixada a 6 m de altura do chão, respeitando as limitações impostas pelo ambiente dos ensaios.

Além disso, para simular a linha de transmissão, um condutor metálico oco de 3 m de comprimento por 25 mm de diâmetro foi utilizado. Em suas extremidades, foram fixadas esferas metálicas ocas, com o intuito de suavizar o campo elétrico na região. Na Figura 18 são mostradas a mísula, o condutor e as esferas.

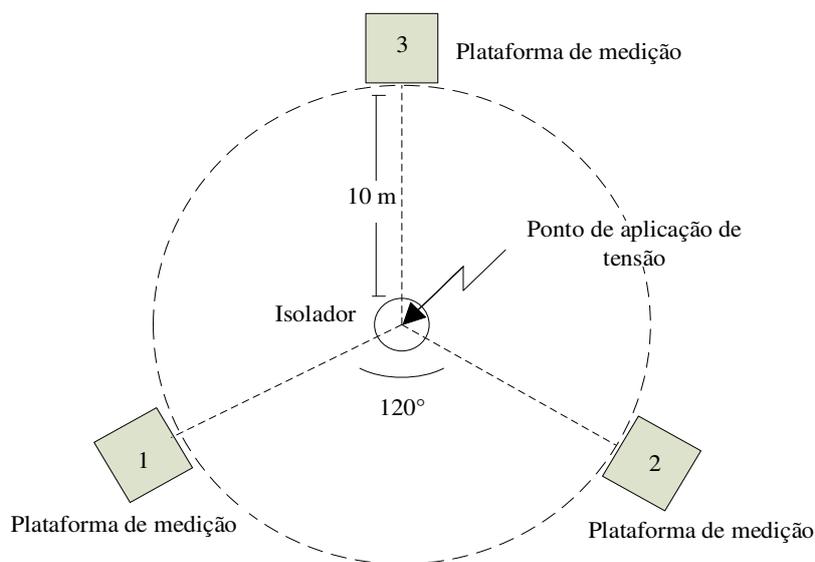
Figura 18. Fotografia da montagem realizada para simular as condições de campo.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2015.

Para que a detecção da IF abrangesse todo o entorno do isolador, as medições foram realizadas em três plataformas, representadas por 1, 2 e 3, posicionadas a 120° entre si, como mostrado no diagrama na Figura 19. Cada uma delas fica a uma distância de 10 m do ponto de aplicação de tensão no isolador. A escolha dessa distância, de detecção da radiação IF, foi feita por questões de segurança e para avaliar a qualidade da detecção a uma distância similar à que seria utilizada em campo (OLIVEIRA, 2015).

Figura 19. Diagrama do posicionamento das plataformas de medição (vista superior).



Fonte: FLORENTINO, 2015.

4.2.2.2 ENSAIOS

Ao finalizar a montagem do experimento, foram iniciados os ensaios na tensão nominal de operação (fase-terra), ou seja, aproximadamente 133 kV, de modo que se consiga simular as condições operacionais similares as do campo. Após a energização do isolador polimérico foi necessário a espera de um período de duas horas até que se iniciassem as medições de fato. Este tempo é fundamental para que o isolador alcance o equilíbrio térmico.

Como dito na Seção 2.2.3.1, a detecção da radiação infravermelha é diretamente influenciada pela temperatura ambiente, umidade relativa, temperatura de reflexão, distância do termovisor em relação ao objeto inspecionado e emissividade. Contudo, todos estes parâmetros são ajustáveis no termovisor.

Para as medições, os parâmetros referentes à emissividade, distância de medição e temperatura refletida foram ajustados conforme mostrado na Tabela 6. Tais valores foram determinados de acordo com dados encontrados na literatura (ALVARES, 2008; ITC, 2010 apud SOUZA, B., 2016). Fazendo uso de um termohigrômetro digital portátil, posicionado próximo ao isolador no instante da realização dos ensaios, foi possível determinar a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.

Tabela 6. Valores dos parâmetros ajustáveis no termovisor.

Parâmetro	Valor
Emissividade	0,94
Distância de medição	10 m
Temperatura refletida	20 °C

Fonte: ALVARES, 2008; ITC, 2010 apud SOUZA, B., 2016.

Com a utilização do termovisor foram capturadas 48 imagens após o ensaio de oito isoladores poliméricos, ou seja, duas imagens de cada ponto de medição para cada isolador. Posteriormente estas imagens foram agrupadas e armazenadas em um banco de dados.

4.2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS

A utilização do detector de radiação infravermelha para captação das imagens termográficas permite a obtenção dos valores de temperatura ao longo do corpo do isolador sob inspeção, porém juntamente com estes dados, também, são detectadas interferências no fundo da imagem, interferências provocadas por falhas de conexões e lâmpadas acesas, por exemplo.

Desse modo, a aplicação de um algoritmo computacional para o processamento das imagens termográficas é necessária, visando a quantificação da radiação infravermelha emitida apenas pelo isolador polimérico. O tratamento das imagens permite a localização do corpo do isolador e a seleção de um vetor de dados correspondentes aos valores de temperatura ao longo do equipamento sob inspeção e detecção.

Nas seções a seguir o algoritmo terá seu desenvolvimento lógico explicado e suas principais sub-rotinas serão mostradas. No capítulo de resultados será mostrado cada passo apresentado.

4.2.3.1 EXPORTAÇÃO DA MATRIZ DE TEMPERATURAS

Em uma imagem termográfica, cada píxel corresponde a uma determinada temperatura. As imagens termográficas utilizadas, no desenvolvimento desse trabalho, possuem resolução de 240x320 píxeis que corresponde a uma matriz de temperaturas com 240 linhas e 320 colunas. A matriz contempla toda a imagem térmica, ou seja, além do objeto em estudo a imagem também capta possíveis reflexos de objetos e lâmpadas acesas.

Inicialmente, utilizou-se o *software FLIR QuickReport Versão 1.2*, disponibilizado juntamente com a Câmara Termográfica Industrial *FLIR T300*, para analisar os dados captados. O *software*, além de possuir outras funções, proporciona a exportação da matriz de temperaturas da imagem termográfica para o *Microsoft Office Excel*, isto é, transforma o mapa térmico da imagem capturada pelo termovisor em uma matriz A_{ij} , em que $i = 240$ e $j = 320$, sendo cada elemento um dado de temperatura da imagem.

Em seguida, a matriz constituída pelos valores de temperatura da imagem que, inicialmente, está em formato *Excel* (.XLS) é transformada para o formato PGM fazendo uso de um algoritmo desenvolvido em na linguagem de programação C. Desse modo, as imagens em formato PGM serão os objetos de processamento. As demais rotinas do trabalho foram desenvolvidas na plataforma Matlab® e são mostradas a seguir

4.2.3.2 MELHORAMENTO DO CONTRASTE

As imagens termográficas, comumente, apresentam baixo contraste devido à pequena diferença de temperatura entre o fundo da imagem e o objeto submetido a inspeção. Isto, conseqüentemente, ocasiona a dificuldade de reconhecimento e localização do isolador polimérico na imagem termográfica. Portanto, aplica-se uma técnica para melhoramento do contraste para pôr em evidência as regiões de interesse.

Inicialmente, fez-se uso da função de transferência correspondente a expansão da Lei de μ , expressa na Equação 4.1, com o objetivo de realizar o realce do contraste

ampliando e normalizando a variação dos níveis de cinza da imagem. A Lei de μ é bastante utilizada no processo de expansão de sinais de voz com o propósito de expansão para posterior transmissão em sistemas telefônicos (ALENCAR, 2000).

O processo de realce do contraste no domínio espacial busca a realização da ampliação dos sinais. Além disso, a função de transferência, neste caso, é utilizada para normalização do valor de cada píxel da imagem para um novo valor. Neste processo, alterou-se a escala de valores dos píxeis da imagem para a faixa de 0 (preto) a 255 (branco).

$$g(x, y) = 255 \cdot \left(\frac{1}{\mu}\right) \cdot \left((1 + \mu) \left(\frac{f(x,y)}{\max(f(x,y))}\right) - 1 \right). \quad (4.1)$$

$$\forall 0 \leq x < i, 0 \leq y < j$$

Pela Equação 4.1 tem-se a imagem obtida após a extração da matriz de temperatura corresponde a função $f(x,y)$, a imagem resultante do processo de expansão dos sinais da imagem é representada pela função $g(x,y)$ e a constante μ , que pode variar de 0,1 a 255. No capítulo de resultados será feita a análise de sensibilidade, por meio de comparação visual dos histogramas das imagens resultantes, para diferentes valores de μ .

Em seguida, aplicou-se a técnica de equalização de histograma com o objetivo de gerar uma imagem com uma distribuição de níveis de cinza uniforme. A melhoria da imagem se dá como uma maneira de diminuir a dificuldade em identificar regiões para posterior segmentação. A imagem resultante do processo de equalização passa ser representada por uma função denominada $h(x,y)$.

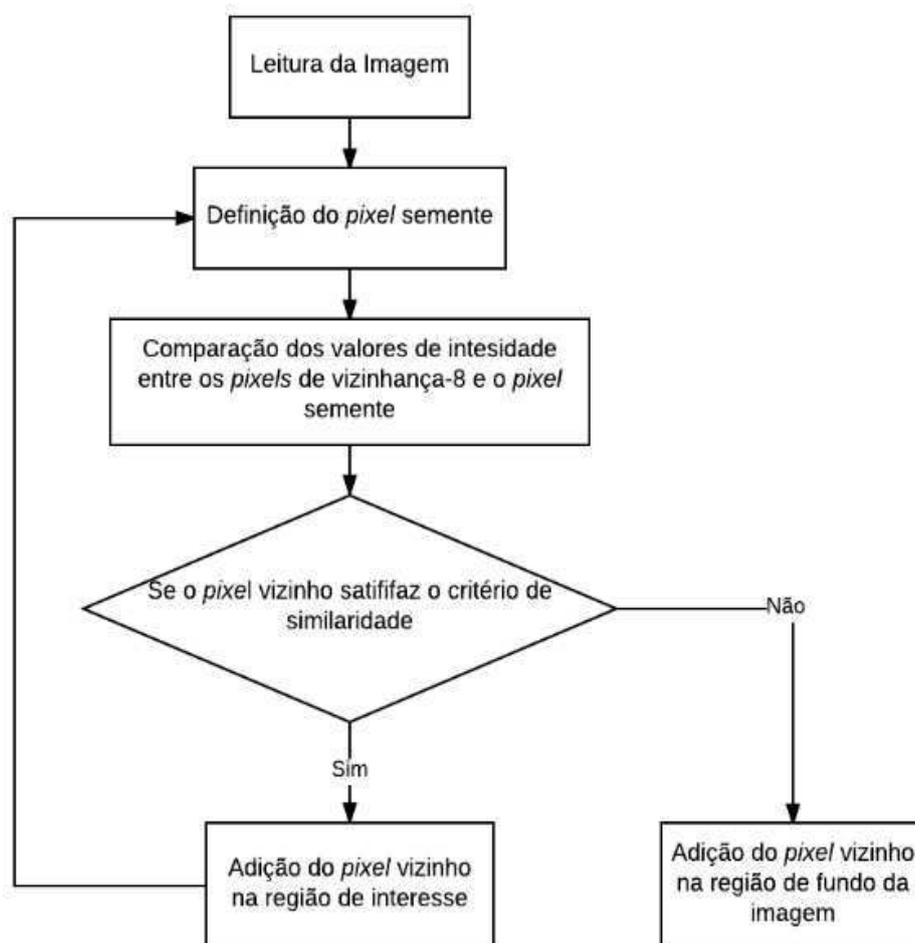
4.2.3.3 SEGMENTAÇÃO

A segmentação da imagem se dá pelo processo de crescimento de regiões, em que um píxel semente pertencente a região da imagem que representa o isolador é escolhido pelo usuário.

A partir da localização do píxel semente, sua intensidade é extraída e comparada com as intensidades dos píxeis de vizinhança-8 por um critério de similaridade. O critério de similaridade define-se por uma faixa de tolerância calculada a partir da média dos valores de intensidades dos píxeis de vizinhança-8 da semente escolhida pelo usuário. Ao final das comparações, se os píxeis vizinhos atenderem o critério similaridade, serão adicionados na região do isolador a ser segmentada e o píxel semente passa a receber uma nova localização. Porém, os píxeis vizinhos que não satisfazem o critério de similaridade

são atribuídos a região correspondente ao fundo da imagem. Um diagrama esquemático do processo de segmentação é mostrado na Figura 20.

Figura 20. Diagrama esquemático do processo de segmentação do isolador polimérico na imagem.



Fonte: autoria própria.

Sendo $h(x,y)$ a imagem resultante do processo de equalização de histogramas, $k(x,y)$ representa a imagem binária alcançada após a extração da região correspondente ao isolador polimérico. Como mostrado na Equação 4.2, T_1 e T_2 correspondem aos valores limites da faixa de tolerância estabelecidas pelo critério de similaridade do método crescimento de regiões.

$$k(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } T_1 \leq h(x,y) \leq T_2 \\ 0, & \text{se } h(x,y) < T_1 \text{ ou } h(x,y) > T_2 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\forall 0 \leq x < i, 0 \leq y < j.$$

Desta forma, todos os valores de píxel da imagem $g(x,y)$ são definidos como 1 (branco) quando os valores de píxel pertencem ao intervalo $[T_1, T_2]$. Por outro lado, os valores de píxel são definidos como 0 (preto) quando eles não pertencem ao intervalo $[T_1, T_2]$.

As segmentações realizadas pelo algoritmo baseiam-se na premissa de que as regiões correspondentes ao plano de fundo e o isolador na imagem tem valores de intensidade de cinza bem definidos. No entanto, em alguns casos, devido a presença de objetos no fundo da imagem e variações de temperatura ao longo do isolador, pode-se obter imagens resultantes com falsos positivos e negativos na segmentação do corpo do isolador na imagem.

Para mitigação do problema de falsa segmentação, desenvolveu-se uma técnica de varredura de todos os píxeis da imagem segmentada, onde busca-se identificar o formato do isolador na imagem, em seguida, realiza-se o corte das regiões que não são de interesse. Por fim, utiliza-se um filtro baseado em reconstrução morfológica para o preenchimento das regiões que não foram corretamente segmentadas.

Após o processo de segmentação para obtenção da imagem binarizada, definida matematicamente pela função $k(x,y)$, aplica-se a técnica de sobreposição de imagens. A técnica de sobreposição de imagens empregada neste trabalho, é definida matematicamente pela Equação 4.3, em que obtêm-se os valores de temperatura pertencentes apenas ao corpo do isolador polimérico.

$$l(x,y) = \begin{cases} f(x,y), & \text{se } k(x,y) = 1 \\ 0, & \text{se } k(x,y) = 0. \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\forall 0 \leq x < i, 0 \leq y < j.$$

Sendo $l(x,y)$ uma imagem formada por uma matriz com 240 linhas e 320 colunas, onde todos os píxeis que não fazem parte da região correspondente ao isolador polimérico possuem valor nulo.

4.2.4 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Para analisar o perfil de temperatura ao longo do corpo do isolador polimérico, deve-se fazer com que a matriz, que contém apenas os valores de temperatura do isolador, possa ser significativamente representada por um vetor. Assim, um algoritmo para

obtenção de um vetor resultante da matriz que forma a imagem $I(x,y)$, obtida após o processo de sobreposição e definida pela Equação 4.3, foi desenvolvido.

Os maiores valores de temperatura no isolador polimérico em operação encontram-se localizados na coluna central do equipamento. Deste disso, o vetor, que contém os valores de temperatura que indicam o comportamento térmico do isolador, deve estar posicionado no centro da região correspondente ao isolador polimérico na imagem.

Por esta razão, a média das coordenadas dos píxeis que indicam os valores de temperatura do isolador foi calculada para identificação da posição do central das coordenadas. E, por meio do método Análise de Componentes Principais (PCA – *Principal Component Analysis*) o eixo principal, referente a coluna central do isolador, foi detectado. No Apêndice B são discutidos os conceitos relativos ao método estatístico PCA.

Em seguida, tendo como base o vetor, constituído pelos valores de temperatura, que indica o comportamento térmico do isolador, os seguintes operadores estatísticos foram calculados: ponto máximo, amplitude e variância.

O objetivo de utilização dos operadores estatísticos é oferecer, a um possível classificador, valores específicos do vetor de temperatura. Os valores podem conter informações relevantes dos isoladores inspecionados e ao mesmo tempo, reduzir de forma eficiente a quantidade de dados a serem processados e, desse modo, minimizar o esforço computacional do classificador.

A informação de amplitude dos vetores de temperatura pode atribuir ao sistema de classificação padrões mais heterogêneos. No caso da variância a informação apresentada ao classificador é o nível de dispersão dos valores do conjunto em relação ao valor central.

No capítulo a seguir serão apresentados os resultados do algoritmo aplicados às amostras de imagens termográficas dos isoladores poliméricos.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a inspeção visual dos isoladores poliméricos de acordo com as características de degradação. Em seguida, serão apresentados os resultados alcançados em todas as etapas do PDI termográficas. Por fim, a sumarização dos dados estatísticos dos valores de temperatura adquiridos após o processamento.

5.1 INSPEÇÃO VISUAL

Os isoladores poliméricos, submetidos aos ensaios de medição da radiação IF, foram sujeitos a um processo de inspeção visual, conforme descrito anteriormente no capítulo que trata sobre a metodologia dos ensaios.

A seguir, são apresentadas algumas imagens adquiridas durante a inspeção visual para caracterização dos estados de degradação dos isoladores. Desta forma, os aspectos físicos de alguns isoladores poliméricos utilizados nos ensaios podem ser observados nas Figuras 21, 22, 23 e 24.

Na Figura 21, é apresentada uma fotografia da região de exposição do núcleo do Isolador VIII. Na Figura 22, está destacada a poluição depositada na superfície do Isolador III. Na Figura 23, uma fotografia da corrosão acentuada do terminal de conexão do Isolador VI é apresentada. Na Figura 24, destaca-se a ocorrência de degradação nas aletas do Isolador VI.

Figura 21. Fotografia do núcleo do isolador polimérico exposto (Isolador VIII).



Fonte: autoria própria.

Figura 22. Fotografia da poluição depositada na superfície do isolador polimérico (Isolador III).



Fonte: autoria própria.

Figura 23. Fotografia do terminal de conexão do isolador polimérico com corrosão acentuada (Isolador VI).



Fonte: autoria própria.

Figura 24. Fotografia do estado de degradação das aletas do isolador polimérico (Isolador VI).



Fonte: autoria própria.

As características físicas gerais dos isoladores poliméricos submetido aos ensaios de medição da radiação IF estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7. Características dos isoladores.

Isolador	Revestimento do Núcleo	Aletas	Poluição	Terminais de Conexão	Emendas
I	Não exposto, revestido	Conservadas, sem poluição	Sem poluição	Não degradados, não corroídos	Fechadas
II	Não exposto, revestido	Conservadas, sem poluição	Sem poluição	Pouco corroídos	Fechadas
III	Não exposto, revestido, poluído	Conservadas (uma com fratura), com poluição	Com poluição	Não degradados, não corroídos	Fechadas
IV	Não exposto, revestido, poluído	Com fraturas, com poluição	Com poluição	Corroídos	Presença de umidade
V	Exposto, poluído	Com fraturas, com poluição	Muita poluição	Corroídos	Presença de umidade
VI	Apresenta fraturas, poluição	Apresenta rasgos, com muita poluição	Muita poluição	Corroídos	Fechadas
VII	Apresenta fraturas, exposto e poluição	Com fraturas, com poluição	Muita poluição	Pouco corroídos	Fechadas
VIII	Exposto e poluído	Conservadas (uma com fratura)	Muita poluição	Não degradados, não corroídos	Fechadas

Fonte: autoria própria.

5.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS

Os resultados apresentados nesta seção compõem-se, essencialmente, das imagens obtidas durante as etapas do processamento digital das imagens termográficas. Dessa forma, para facilitar a compreensão da metodologia, os resultados estão apresentados em subseções para cada uma das etapas do processamento.

5.2.1 EXPORTAÇÃO DA MATRIZ DE TEMPERATURAS

A exportação da matriz de temperaturas das imagens termográficas captadas pela câmera de detecção de radiação infravermelha foi realizada por meio dos *softwares* FLIR QuickReport Versão 1.2 e Microsoft Office Excel. A partir da exportação da matriz de temperaturas, foi possível obter os dados de entrada do algoritmo de PDI, referente as imagens em formato PGM. Na Figura 25 é apresentada uma imagem em formato PGM, em que o valor de cada píxel corresponde a um dado de temperatura da imagem. Esta imagem representa um grupo de amostras obtidas em escala de cinza.

Figura 25. Imagem em formato PGM obtida após a exportação da matriz de temperaturas.



Fonte: autoria própria.

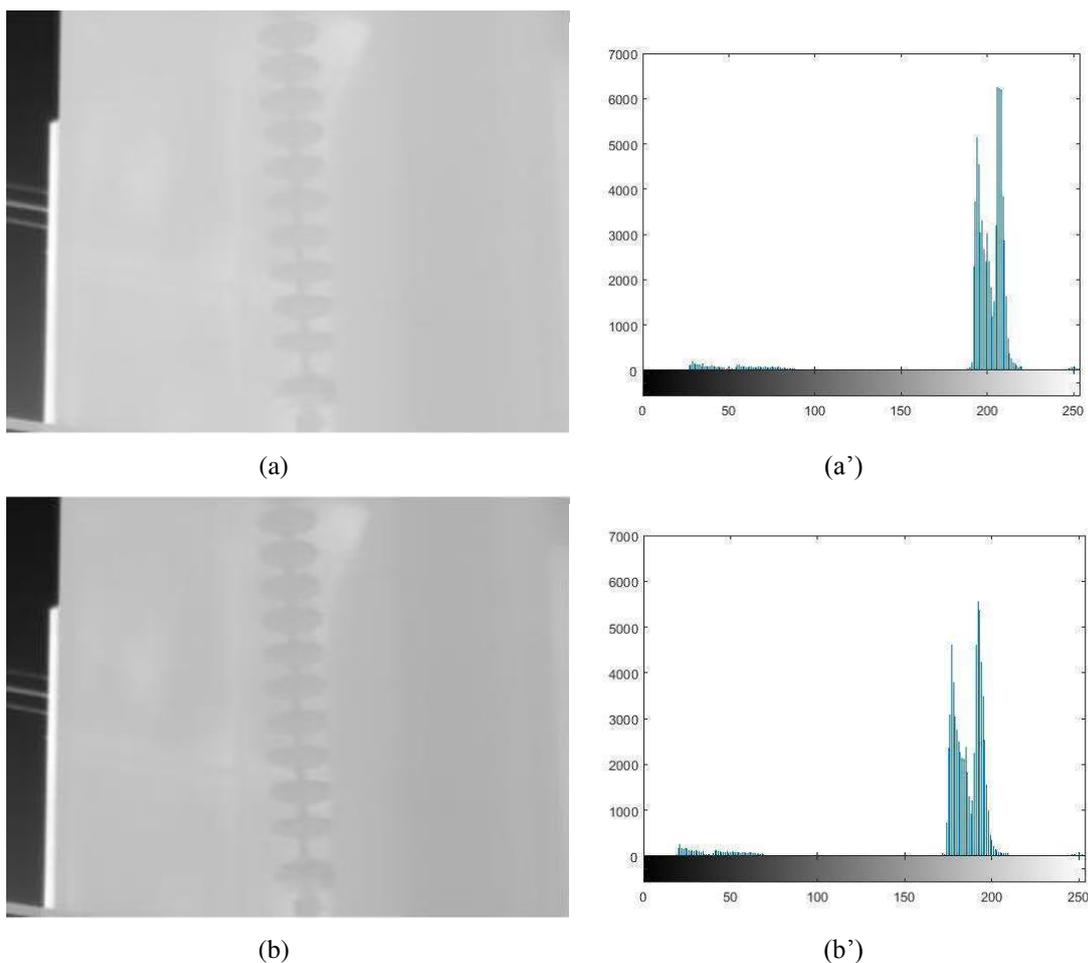
Observando a imagem mostrada na Figura 25, constata-se a o baixo contraste na imagem, ou seja, diferenças sutis entre as regiões escuras e claras na imagem, e a necessidade de destacar as regiões de interesse para posterior segmentação.

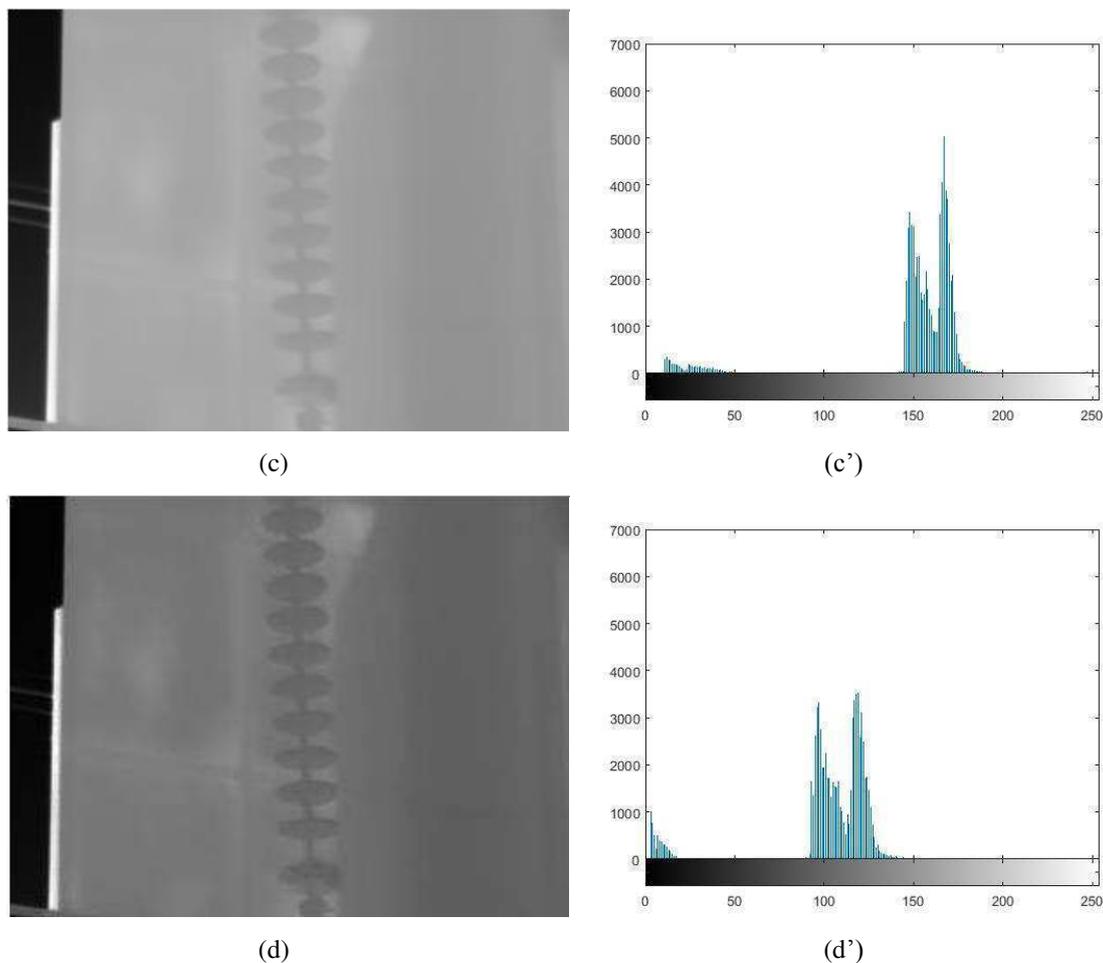
5.2.2 MELHORAMENTO DO CONTRASTE

O objetivo da realização do processo de melhoramento do contraste da imagem se dá como uma maneira de diminuir a dificuldade em identificar regiões para posterior segmentação. Isto é, aplica-se uma técnica para melhoramento do contraste para realçar as regiões de interesse.

Desta forma, fez-se uso da função de transferência correspondente a expansão da Lei de μ . No entanto, esta função de transferência, expressa na Equação 4.1, apresenta a constante μ , cujo valor pode variar de 0,1 a 255. Na Figura 26 são apresentadas as imagens e seus respectivos histogramas resultantes do processo de melhoramento de contraste, devido à expansão de sinais da imagem, para diferentes valores de μ .

Figura 26. Análise de sensibilidade para diferentes valores de μ no processo de melhoramento do contraste, (a) $\mu = 0,1$; (b) $\mu = 50$; (c) $\mu = 100$; (d) $\mu = 255$; (a'-d') são os histogramas das imagens (a-d), respectivamente.





Fonte: autoria própria.

As imagens mostradas na Figura 26 indicam os resultados obtidos com a manipulação de contraste fazendo uso da transferência radiométrica em cada píxel, com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Realizou-se a operação ponto a ponto, independentemente da vizinhança. Nas Figuras 26(a) e 26(a') apresentam-se os resultados para $\mu = 0,1$. O valor baixo da constante μ indica um processo de normalização de píxeis de modo linear.

No entanto, a imagem mostrada na Figura 26(d) e seu respectivo histograma, apresentado na Figura 26(d'), indicam o aumento do contraste de feições claras (altos níveis de cinza) da imagem quando empregado o processo de expansão de sinais para $\mu = 255$. Constata-se que houve melhoramento do contraste mesmo havendo um deslocamento geral para a região de níveis mais escuros.

Portanto, a partir da análise das imagens apresentadas na Figura 26 constata-se que há o destaque nos detalhes da região de interesse na imagem, apresentando, desta forma, realce no contraste a medida que o valor da constante μ aumenta. Além disso, por

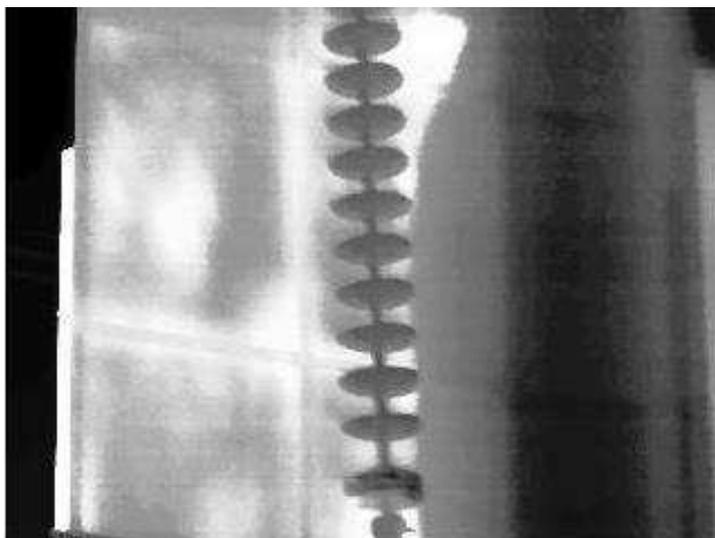
meio da análise dos histogramas alcançados, constata-se a expansão da faixa dinâmica, ou seja, a distribuição dos níveis de cinza na imagem se dá de modo mais uniforme para maiores valores de μ . Portanto, o valor de $\mu = 255$ foi atribuído para o grupo de imagens consideradas para realização deste trabalho.

O processo de expansão do sinal da imagem também proporcionou a normalização do valor de cada píxel da imagem para um novo valor. Isto é, alterou-se a escala de valores dos píxeis da imagem para a faixa de 0 (preto) a 255 (branco).

Em seguida, aplicou-se a técnica de equalização de histogramas para obter um aumento substancial no nível de detalhes perceptíveis. Uma vez que o processo de equalização de histograma expande os níveis de cinza ao longo de todo intervalo, obtém-se o realce do contraste da imagem e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade da imagem sob os critérios subjetivos do olho humano.

Na Figura 27 é apresentada a imagem equalizada após a aplicação da técnica de equalização de histogramas.

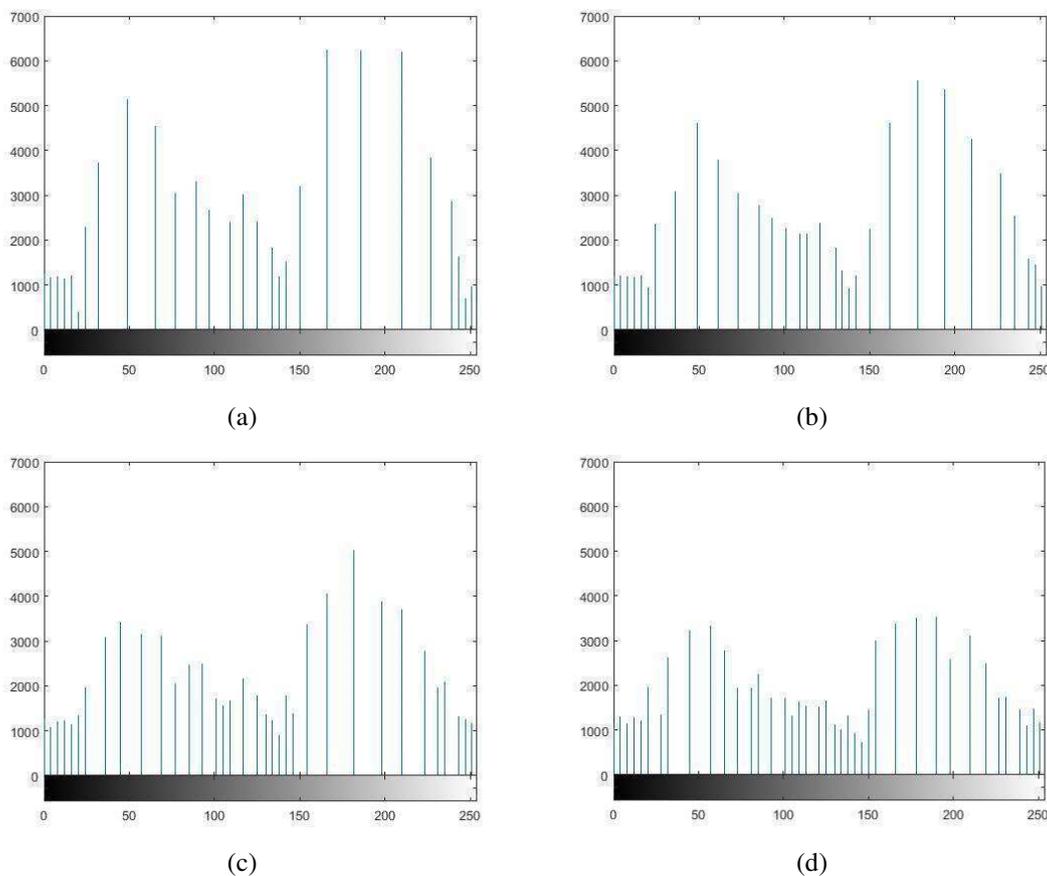
Figura 27. Imagem resultante do processo de melhoramento do contraste.



Fonte: autoria própria.

Para aprimoramento da análise da técnica de equalização de histogramas é mostrado na Figura 28 os histogramas das imagens, resultantes do processo de expansão de sinais com diferentes valores de μ , submetidas ao processo de equalização.

Figura 28. Análise de sensibilidade para diferentes valores de μ no processo de equalização de histogramas, (a) $\mu = 0,1$; (b) $\mu = 50$; (c) $\mu = 100$; (d) $\mu = 255$.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 28(a) é apresentado o histograma da imagem resultante do processo de expansão de sinais para $\mu = 0,1$ após a etapa de equalização. Neste caso, pelo fato da constante μ possuir um valor baixo, obteve-se um processo de normalização de píxeis de modo linear. Assim, a distribuição dos níveis de cinza da imagem não é ampliada, apresentando pouca variação no sinal da imagem. Com a aplicação da técnica de equalização de histogramas, o sinal da imagem é ampliado na escala de níveis de cinza (0 a 255), porém os valores de níveis de cinza encontram-se concentrados e espaçados em grandes intervalos.

Contudo, na Figura 28(d), onde é apresentado o histograma da imagem resultante do processo de expansão de sinais para $\mu = 255$ após a etapa de equalização, observa-se a diminuição da concentração de píxeis em níveis de cinza específicos, ou seja, o sinal da imagem mantém-se ampliado na escala de níveis de cinza, mas com distribuição espaçada em intervalos menores. Assim, tal situação permite melhor identificação dos detalhes da imagem.

Portanto, a partir da análise dos histogramas apresentadas na Figura 28 constata-se que a expansão do sinal, para $\mu = 255$, permitiu maior eficiência na equalização da imagem, obtendo como resultado do processo de melhoramento de contraste e um histograma mais plano com destaque da região de interesse na imagem termográfica.

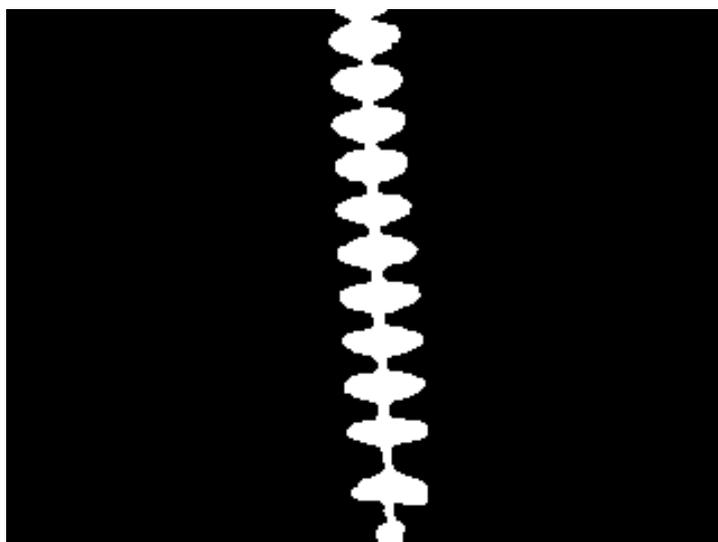
Além disso, constata-se a importância da equalização de histogramas no processamento digital das imagens, por proporcionar maior facilidade na atuação da etapa de segmentação.

5.2.3 SEGMENTAÇÃO

Após o processo de melhoramento do contraste, foi realizado o procedimento de segmentação das imagens, que consistiu no uso da técnica de crescimento de regiões, onde necessita-se que o usuário indique um píxel semente. O píxel semente deve estar contido na região correspondente ao isolador polimérico na imagem. Este processo justifica a necessidade de obtenção de imagens com melhor qualidade, uma vez que existe a dependência dos critérios subjetivos do olho humano, também, por esta razão, a técnica desenvolvida é denominada semiautomática.

Na segmentação os píxeis que não fazem parte da região da imagem que constitui o isolador passam a receber valor nulo. O resultado da segmentação do isolador polimérico destacado na imagem, resultante do processo de equalização, apresentada na Figura 27 é mostrado na Figura 29.

Figura 29. Isolador polimérico segmentado pela imagem binarizada.



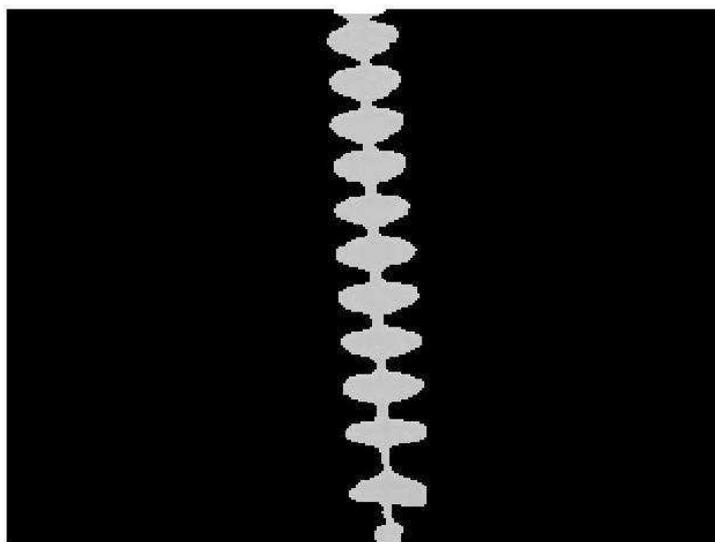
Fonte: autoria própria.

Para obtenção dos valores de temperatura pertencentes apenas ao corpo do isolador polimérico, isto é, sem a presença de interferência, fez-se uso da técnica de sobreposição de imagens, definida matematicamente pela Equação 4.3, e do método PCA.

A sobreposição na imagem $f(x,y)$, decorrente do processo de exportação da matriz de temperaturas, é também realizada para efeito visual e avaliativo. Ela permite o destaque do objeto segmentado do restante da imagem, como se pode observar no resultado apresentado na Figura 30.

Como resultado final do PDI termográficas, obteve-se os valores de temperatura que indicam o perfil térmico do equipamento sob inspeção. A partir da extração dos valores de temperatura, localizados na coluna central do isolador, é possível realizar a análise do comportamento térmico dos isoladores inspecionados.

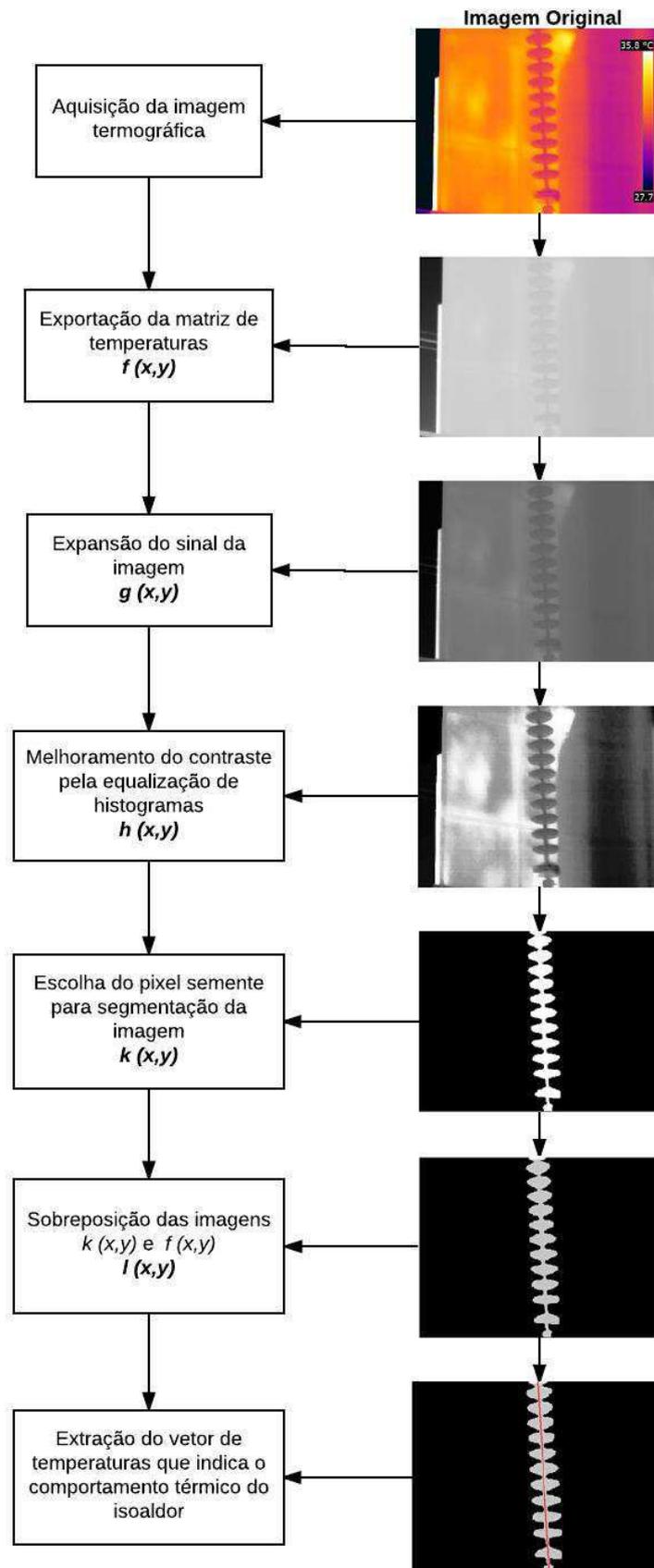
Figura 30. Imagem alcançada após sobreposição da imagem segmentada na imagem $f(x,y)$.



Fonte: autoria própria.

As imagens de todos os isoladores ensaiados, neste trabalho, foram processadas de acordo com as etapas descritas. Um fluxograma contendo os resultados obtidos em todas as etapas do processamento digital das imagens termográficas do Isolador IV, para fins de exemplificação, é mostrado na Figura 31.

Figura 31. Fluxograma do processamento digital das imagens para extração do vetor de temperaturas do Isolador IV.



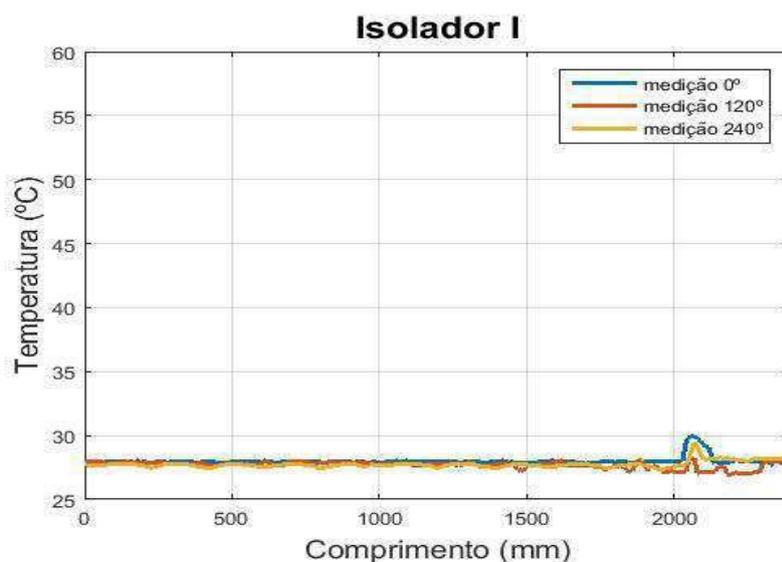
Fonte: autoria própria.

5.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS ISOLADORES

Para análise dos perfis térmicos dos isoladores ensaiados geraram-se os gráficos mostrados nas Figuras 32 a 39. Nos gráficos o eixo referente à abscissa indica o comprimento do isolador polimérico, em que 0 mm corresponde ao terminal terra e 2400 mm corresponde ao terminal fase do isolador.

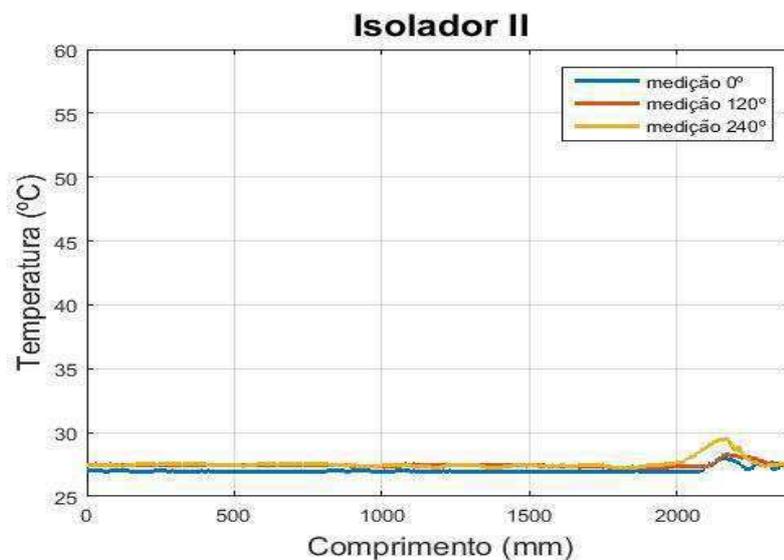
Na Figura 32, 33 e 34 são exibidos o gráfico do perfil de temperatura dos Isoladores I, II e III, respectivamente. Por meio dos gráficos é possível observar o comportamento térmico dos isoladores para os três ângulos de medição: 0°, 120° e 240°. Pode-se notar que ao longo de todo o corpo dos isoladores não houve grande variação de temperatura, ficando com variações menores que 3°C para todos os ângulos de medições.

Figura 32. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador I.



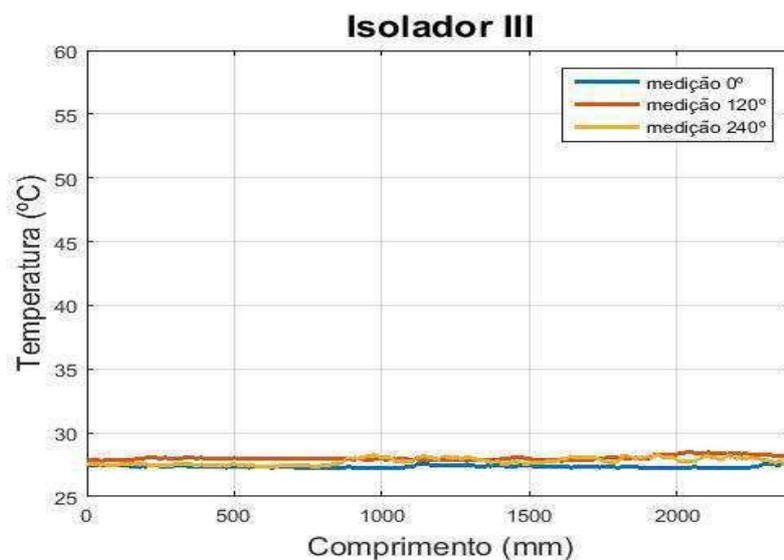
Fonte: autoria própria.

Figura 33. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador II.



Fonte: autoria própria.

Figura 34. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador III.

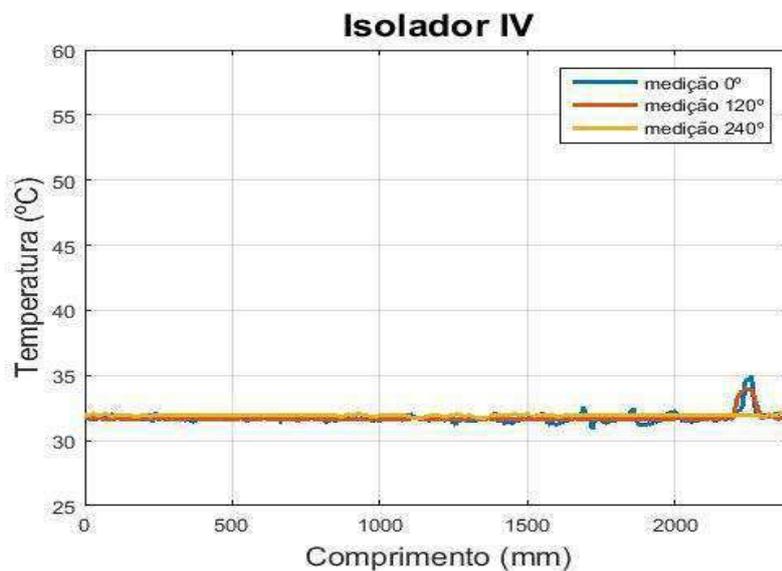


Fonte: autoria própria.

O gráfico mostrado na Figura 35 fornece informações quanto a variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador IV. Pode-se observar que a temperatura ultrapassou os 3°C ao longo do corpo do isolador. Embora a sobrelevação seja em apenas em um dos ângulos de medição, recomenda-se o acompanhamento do isolador com futuras medições de modo que seja assistida a evolução de temperaturas com decorrer do tempo. Essa sugestão tem como base normas de associações profissionais, como, a *International Electrical Testing Association* (NETA MTS, 1997 apud EPPERLY;

HERBERTEIN; EADS, 1997) que estabelece critérios para avaliação de isoladores (SOUZA, B., 2016).

Figura 35. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador IV.



Fonte: autoria própria.

Apesar dos Isoladores V e VI apresentarem diversos indícios de degradação, como indicado na Tabela 7, não foram verificados aumento de temperatura significativos ao longo dos corpos dos isoladores ensaiados. Nas Figuras 36 e 37 são apresentados os gráficos que indicam o comportamento térmico dos Isoladores V e VI, respectivamente. Pode-se constatar que a maior diferença entre os valores de temperatura ao longo do corpo dos isoladores é inferior a 3°C.

Figura 36. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador V.

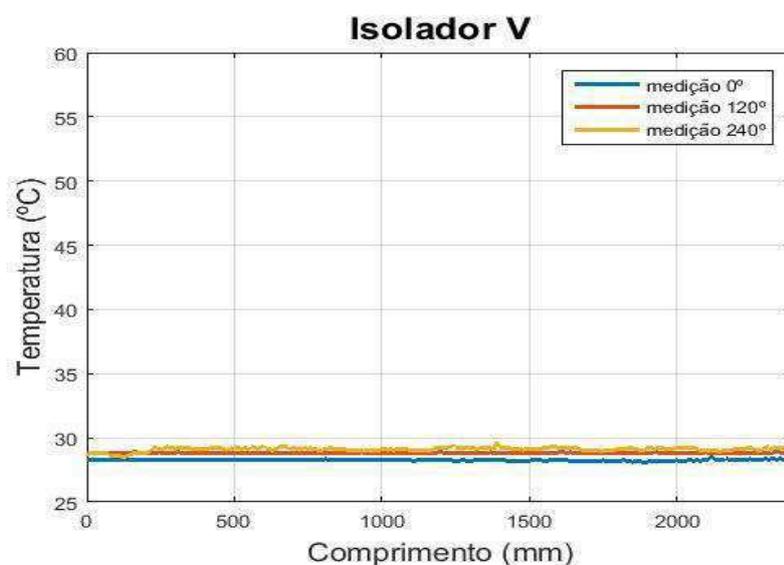
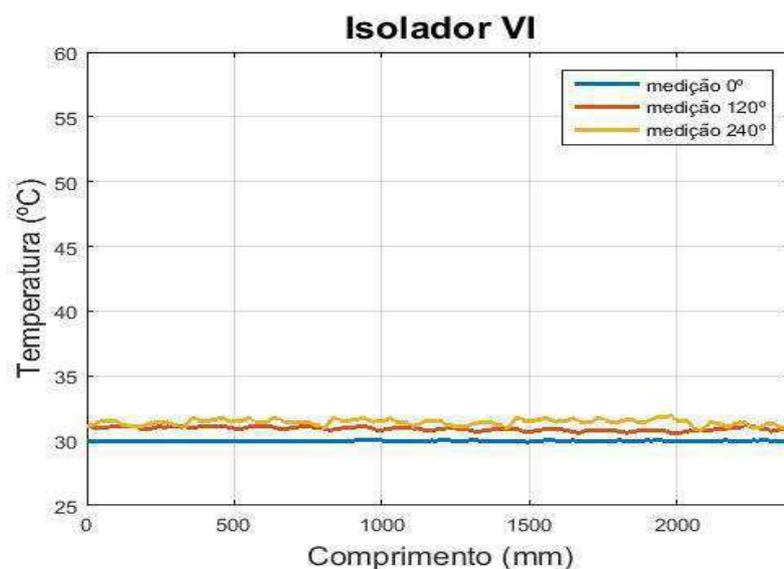
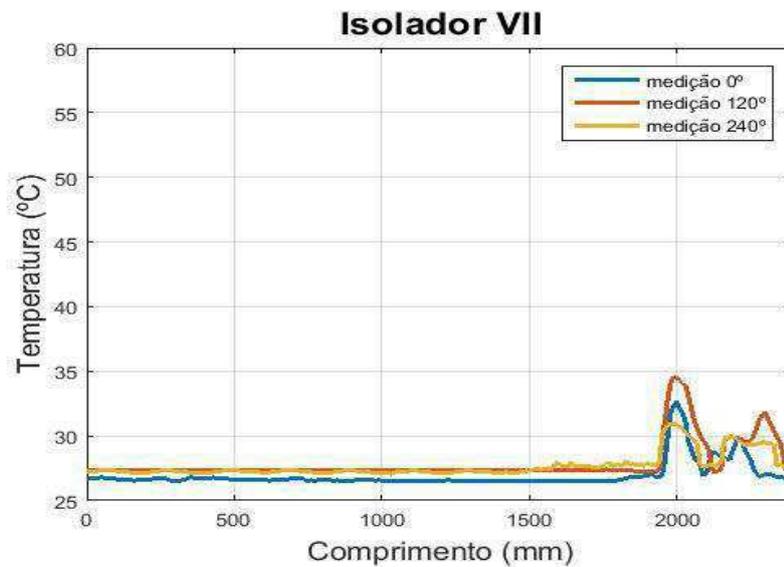


Figura 37. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador VI.



Na Figura 38 é exibido o gráfico do perfil de temperatura do Isolador VII para os três ângulos de medição: 0°, 120° e 240°. Pode-se observar a presença de uma variação de temperatura considerável ao longo do corpo do isolador. Por meio da análise do resultado alcançado, após o processamento da imagem termográfica captada na plataforma de medição localizada no ângulo de 120°, no ensaio do Isolador VII, constata-se uma variação de temperatura próxima a 8°C.

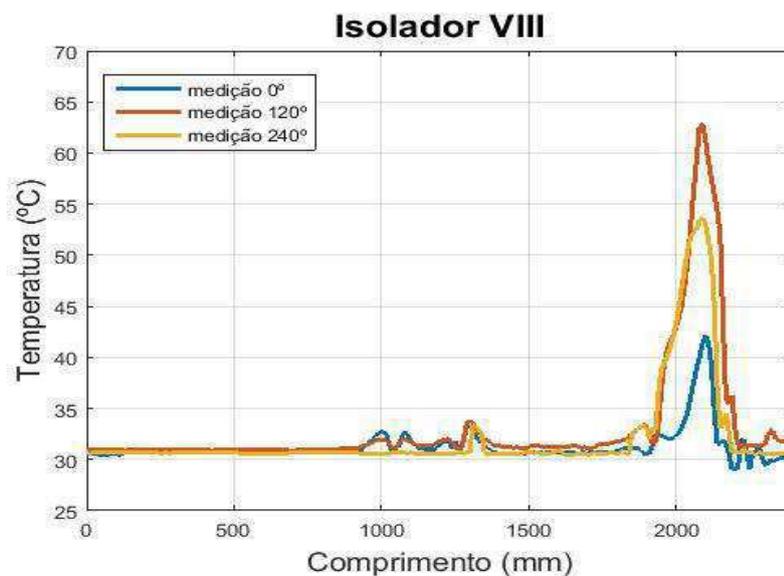
Figura 38. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador VII.



Fonte: autoria própria.

O gráfico apresentado na Figura 39 reflete o perfil térmico do Isolador VIII. Pode-se observar grandes variações de temperatura ao longo do corpo do isolador inspecionado. Analisando o gráfico, constata-se a existência de variações de temperatura maiores que 30°C a depender do ângulo de medição. Para esta situação, recomenda-se a troca imediata do isolador.

Figura 39. Gráfico da variação de temperatura ao longo do corpo do Isolador VIII.



Fonte: autoria própria.

Por meio da análise dos gráficos correspondentes ao comportamento térmico dos isoladores inspecionados, constata-se a que as temperaturas mais altas estão localizadas próximas ao terminal fase dos isoladores.

5.4 SUMARIZAÇÃO DOS DADOS ESTATÍSTICOS

A utilização das medidas da estatística descritiva auxilia na sumarização das informações disponíveis sobre o comportamento da variável em questão, ou seja, resumir todo o conjunto por meio de um ou alguns valores que possam ser representativos para todos os dados. Ao utilizar um único valor, obtém-se uma redução significativa do conjunto de dados e, conseqüentemente, uma redução no esforço computacional quando se objetiva a utilização de um classificador, por exemplo.

Na Tabela 8, as características gerais do comportamento térmico de cada um dos isoladores submetidos aos ensaios são apresentadas. Os dados foram obtidos a partir do processamento das imagens captadas nos três ângulos de medição. Em destaque encontram-se os piores casos para cada isolador, ou seja, as medições que contém os maiores valores de temperatura máxima, amplitude dos valores de temperatura e variância.

A partir da análise da Tabela 7, que indica as características físicas dos isoladores, e da Tabela 8, que apresenta os dados estatísticos referentes ao comportamento térmico dos isoladores, constatou-se que os parâmetros obtidos, até então pelo processamento digital das imagens termográficas, não apresentaram completa correlação com as características físicas dos isoladores.

Um exemplo que pode servir para ilustrar essa observação é o Isolador V, que, como pode ser visto na Tabela 7, possui características físicas de degradação mais acentuadas, quando comparado aos Isoladores VII e VIII. Contudo, quando se analisa o comportamento dos isoladores por IF, sumarizados na Tabela 8, observa-se que o Isolador V apresentou parâmetros estatísticos de um isolador pouco degradado, diferentemente dos Isoladores VII e VIII que apresentaram parâmetros estatísticos de isolador bastante degradado.

Ao mesmo tempo, observando os dados referentes aos Isoladores I e II, estes apresentam características físicas condizentes com isoladores em ótimo estado de conservação. Entretanto, na análise dos parâmetros das imagens IF tais isoladores

apresentaram comportamentos de isoladores relativamente degradados. Isso se justifica pelo fato da termografia permitir a detecção de falhas internas dos equipamentos inspecionados.

Desta forma, constata-se que a técnica de simples inspeção visual dos isoladores se apresenta ineficiente, evidenciando a necessidade de se utilizar métodos com maior grau de confiabilidade, tais como a medição da radiação infravermelha.

Tabela 8. Dados estatísticos do comportamento térmico dos isoladores inspecionados.

Isolador	Ângulo de Medição (°)	Temp. Máxima (°C)	Amplitude (°C)	Variância
	0	30,01	2,34	0,0992
I	120	28,21	1,23	0,0679
	240	29,45	2,10	0,0655
II	0	27,99	1,09	0,0445
	120	28,29	1,07	0,0333
	240	29,51	2,30	0,1702
III	0	27,57	0,37	0,0079
	120	28,54	0,73	0,0306
	240	28,56	0,99	0,0729
IV	0	34,96	4,06	0,1819
	120	34,07	2,52	0,1250
	240	32,24	0,53	0,0042
V	0	28,52	0,41	0,0033
	120	28,94	0,15	0,0006
	240	29,62	1,08	0,0253
VI	0	30,08	0,17	0,0014
	120	31,20	0,60	0,0196
	240	31,93	1,13	0,0505
VII	0	32,67	6,19	1,0615
	120	34,64	7,43	2,2444
	240	30,96	3,88	0,8060
VIII	0	42,18	13,15	3,1847
	120	62,86	31,98	36,4215
	240	53,59	23,22	22,5719

Fonte: autoria própria.

Observando os valores na Tabela 8, verifica-se que os resultados das medições para o mesmo isolador, a partir dos três ângulos de medição, apresentam valores

significativamente distintos, isto evidencia a necessidade de se efetuar a medição de radiação IF em vários ângulos, conforme realizado neste trabalho.

No presente capítulo foi verificado os resultados da pesquisa obtidos com a inspeção visual, o processamento digital das imagens termográficas, além da análise do comportamento térmico dos isoladores. No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros sobre isoladores poliméricos.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma técnica semiautomática de processamento digital de imagens, baseada na equalização e segmentação de imagens termográficas, para auxiliar na inspeção de isoladores poliméricos. Os resultados computacionais obtidos evidenciam que:

- O emprego das técnicas de expansão de sinais e equalização de imagens foi bastante eficaz no processo de melhoramento da qualidade das imagens termográficas, realçando o contraste e possibilitando a identificação das regiões de interesse nas imagens;
- O processo de segmentação das imagens termográficas, onde foi separado o corpo do isolador do restante da imagem, possibilitou a eliminação de interferências, tais como lâmpadas acesas e objetos do laboratório presentes no fundo da imagem, de modo eficiente;
- O uso do método estatístico de análise de componentes principais, para identificação do eixo central do isolador polimérico na imagem termográfica, permitiu a extração de um vetor com os valores de temperatura que representam significativamente o perfil térmico dos isoladores inspecionados;
- A sumarização dos dados estatísticos dos valores de temperatura, adquiridos após o processamento das imagens termográficas, permitiu a redução das informações contidas nos vetores de temperatura, que correspondem à parâmetros térmicos relevantes para o diagnóstico dos isoladores poliméricos. Desta forma, proporciona-se uma redução no esforço computacional, de modo eficaz, quando se objetiva a utilização de um classificador, por exemplo;
- A análise do comportamento térmico de todos os isoladores inspecionados foi realizada, visto que as rotinas de PDI foram desenvolvidas para adequar as imagens termográficas, obtidas nos ensaios laboratoriais, de modo eficiente e quantificar os atributos de temperatura dos isoladores inspecionados;

- Com uso da técnica de expansão dos sinais obteve-se maior eficiência no processo de equalização das imagens, em termos de realce de contraste, devido a ampliação das variações de níveis de cinza das imagens processadas;
- A equalização das imagens termográficas possibilitou a ampliação da distribuição dos sinais da imagem em toda a escala de níveis de cinza, tornando-se uma etapa indispensável para não obtenção de falsa segmentação.

Pelo exposto, conclui-se assim, que a utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho permite a minimização do fator de subjetividade (experiência do inspetor) nos processos de análises dos termogramas dos isoladores poliméricos inspecionados, além de auxiliar na inspeção dos isoladores em operação para indicação do momento mais adequado para realização de manutenções.

Os resultados computacionais apresentados, neste trabalho, evidenciam que os estudos desenvolvidos contribuem para o aprimoramento de ferramentas e modelos utilizados na inspeção por detecção de radiação infravermelha.

Com a apresentação das conclusões obtidas por meio desta dissertação, podem ser destacadas algumas perspectivas de trabalhos futuros. As perspectivas estão apresentadas na subseção a seguir.

6.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- i. Criação de um protótipo para embarcar as técnicas desenvolvidas. A construção de um protótipo pode ser útil como passo inicial para obtenção de um produto comercial para análise de isoladores poliméricos;
- ii. Otimizar a técnica de PDI para identificação automática do isolador para segmentação. Com o estudo e implementação de outras técnicas de processamento digital de imagens é possível melhorar o desempenho do sistema proposto;
- iii. Implementação de inteligência artificial, tais com a rede neural artificial e algoritmos genéticos para diagnóstico dos isoladores inspecionados. O uso

da inteligência artificial é adequado para diminuir custos relativos ao emprego de especialistas no diagnóstico de isoladores;

- iv. Análise da aplicabilidade da técnica para outros equipamentos do sistema elétrico. As técnicas desenvolvidas neste trabalho podem ser adaptadas na análise de outros equipamentos elétricos, tais como os para-raios, buchas de transformadores de potência, câmara de extinção de disjuntores, sistema de isolamentos dos enrolamentos dos transformadores, muflas, buchas de passagem, cadeias de isoladores convencionais etc.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15424**: Ensaios não destrutivos – Termografia – Terminologia, 2016.

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**. ICHVE – International Conference on High Voltage Engineering and Applications, 2014.

ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de Imagens: Métodos e Análises**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT. Rio de Janeiro - Brasil. Disponível na internet via URL: <http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/cap3webfinal.pdf>. Data de acesso: 18 de junho de 2016.

ALENCAR, M. S. **Telefonia Digital**. Ed. Érica, 2000.

ALEXSYSTEMS. **Radiação e Energia**. Disponível na internet via URL: <http://alexsystems1.blogspot.com.br/>. Data de acesso: 01 de dezembro de 2016.

ÁLVARES, R. C. **Diagnóstico De Falhas em Para-raios Utilizando Termografia**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

AZO SENSORS. **Understanding the Fundamentals of Thermal Imaging**. Disponível na internet via URL: <http://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=672>. Data de acesso: 01 de dezembro de 2016.

BARROS, W. P. P. **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011.

BATISTA, L. V. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Nota de Aula, 2005.

BOLONGNA, F.; MAHATHO, N.; HOCH, D. A. **Infra-red and Ultra-violet Imaging Techniques Applied to the Inspection of Outdoor Transmission Voltage Insulators**. Africon Conference in Africa, 2002.

BRICE, C. W. **Infrared Detection of Hot Spots in Energized Transmission and Distribution Equipment**. Electric Power Systems Research, v. 1, n. 2, p. 127 – 130, 1978.

BRITO, S. F; CARVALHO, J. M. **Sistemas de Processamento Digital de Imagens para Fins Didáticos/Científicos: Estudo, Seleção e Implementação de Algoritmos de Segmentação**. Relatório de iniciação científica. UFPB, 1998.

CHOI, B.; YOON, J. **Adaptive Contrast Enhancement Based on Temperature and Histogram for an Infrared Image**. 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009.

CHRZANOWSKI, K. **Non-Contact Thermometry – Measurement Errors**. SPIE PL, Research and development Treaties, v. 7, Warsaw, 2001.

COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; NERI, M. G. G.; CAVALCANTI, M. N. **Desempenho de Isolador Polimérico por Medição de Temperatura e Corona**. XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

CRAVEIRO, M. A. C. **Desenvolvimento de um Sistema para Avaliação dos Fatores de Influência Sobre Análises Termográficas em Subestações Desabrigadas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2008.

EPPERLY, R.A; HEBERLEIN, G.E.; EADS, L.G. **A Tool for Reliability and Safety: Predict and Prevent Equipment Failures with Thermography**. The IEEE Incorporated Industry Applications Society 44th Annual, 1997.

FALCÃO, A. X.; LEITE, N. J. **Fundamentos de Processamento de Imagem Digital**. Apostila do Curso de Tópicos em Processamento de Imagens, IC, Unicamp, São Paulo, 2000.

FERREIRA, T. V. **Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011.

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

FERRETI, G.; GIORGI, A. **A New Type of Pyrometer Employed for Preventive Maintenance in Electric Utilities**. L'Energia Elétrica, n. 12, 1969.

FLIR. **FLIR T300 Specifications**. Disponível na internet via URL: <http://www.transcat.com/media/pdf/FLIRT300data.pdf>. Data de acesso: 29 de dezembro de 2016.

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, Campina Grande, PB, 2015.

GERMANO, A. D. **Análise da Degradação de Isolamentos Poliméricos**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

GONÇALVES, M. A. **Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com Recurso a Termografia**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Portugal, 2011.

GONZALEZ, R.; WOODS, P. **Digital Image Processing**. Prentice Hall, 2nd edition. 2002.

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

GRIMM, A. M. **Radiação Solar e Terrestre**. Disponível na internet via URL: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>. Data de acesso: 01 de dezembro de 2016.

GUBANSKI, S. **Modern Outdoor Insulation - Concerns and Challenges**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 21, n. 6, p. 9 –11, 2005.

GUEDES, P. G. G. **Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2015.

HACKAM, R. **Outdoor HV Composite Polymeric Insulators**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. v. 6, n. 5, p. 557-585, 1999.

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

HAUSCHILD, W.; MOSCH, W. **Statistical Techniques for High-voltage Engineering**. IET, 1992

HOLST, G. C. **Common Sense to Approach to Thermal Imaging**. Washington, DC, USA.: SPIE Optical Engineering Press, 2000.

IRSHAD; JAFERRY, Z. A. **Performance Comparison of Image Segmentation Techniques for Infrared Images**. 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). p. 1 – 5, 2015.

JANANI, V.; DINAKARAN, M. **Infrared Image Enhancement Techniques – A Review**. 2nd International Conference on Current Trends in Engineering and Technology, ICCTET'14, 2014.

JONES, R. V. **Some Turning-Points in Infra-Red History**. Radio and Electronic Engineer. v. 42, n. 6, p. 117 – 126, 1972.

KAPLAN, H. **Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment**. SPIE press, 2007.

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

LAI, R.; YANG, Y.; WANG, B.; ZHOU, H. **A Quantitative Measure Based Infrared Image Enhancement Algorithm Using Plateau Histogram**. Optics Communications, v. 283, n. 21, p. 4283-4288, 2010.

LIANG, K.; MA, Y.; XIE, Y.; ZHOU, B.; WANG, R. **A New Adaptive Contrast Enhancement Algorithm for Infrared Images Based on Double Plateaus Histogram Equalization**. *Infrared Physics & Technology*, v. 55, n. 4, p. 309-315, 2012.

LIANG. **A Look to the Future of Composite Insulator Technology**. Disponível na internet via URL: <http://www.inmr.com/look-future-composite-insulator-technology/>. Data de acesso: 18 de junho de 2016.

LIU, Y.; DU, B. X.; YANG, Z. **Infrared Characteristics of Surface Discharges in Dynamic Dropping Test for Hydrophobicity Evaluation of Polymeric Insulator**. ICHVE – International Conference on High Voltage Engineering and Applications, 2012.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: BRASPORT, 1999.

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

MENDONÇA, P. L. **Diagnóstico de Falhas Elétricas e Mecânicas em Isoladores Compósitos de Classe de Tensão de 69 Kv Através de Radiografia Computadorizada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, PE, 2013.

MENDONÇA, Y. A. **Análise da Corrente de Fuga de Isoladores Poliméricos para Classificação das Condições de Degradação com Auxílio de Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

MIRANDA, P. **Introdução à Computação**. Universidade de São Paulo. Disponível na internet via URL: http://www.vision.ime.usp.br/~pmiranda/mac110_1s14/EPs/ep02/pgm_ppm.pdf. Data de acesso: 12 de dezembro de 2016.

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

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

NÓBREGA, R. B. **Avaliação de uma Nova Carga na Composição de Revestimentos Externos Aplicados em Isoladores de Alta Tensão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B. **William Herschel, os Raios Invisíveis e as Primeiras Ideias Sobre Radiação Infravermelha**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 4, 2014.

OLIVEIRA, R. G. D. **Relatório de Estágio Supervisionado**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2015.

PIGINI, A. **Hv Composite Insulators: Market Size & Reliability**. Disponível na internet via URL: <http://www.inmr.com/composite-insulators-market-size-reliability/>. Data de acesso: 18 de junho de 2016.

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, Portugal, 2013.

ROCHA, P. H. V. **Classificação Dos Isoladores de Vidro de Alta Tensão a partir do Espectro Eletromagnético Irradiado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2014.

ROGALSKI, A. **History of Infrared Detectors**. Opto–Electronics. Rev. 20, n 3, p. 279–308, 2012.

SANTOS, L. **Termografia Infravermelha em Subestações Desabrigadas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2006.

SILVA, P. P. J. C. G. P. O. **Inspeção da Degradação nos Isoladores Compósitos de Linhas de Transmissão Através de Ensaios não Destrutivos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

SOLOMON, C.; BRECKON, T. **Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach With Examples in Matlab**. John Wiley & Sons, 2011.

SOUZA, A. L. **Efeito Corona em Isoladores Poliméricos Sob Condições Adversas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2016.

SOUZA, B. A. **Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

TIPLER, P.; MOSCA, G. **Physics for Scientists and Engineers**, 2008. Ed, v. 6.

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

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

WANDERLEY NETO, E. T. **Monitoramento e Diagnóstico de Para-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.

ZHAO, T.; BERNSTORF, R. A. **Ageing Tests of Polymeric Housing Materials for Nonceramic Insulators**. Electrical Insulation Magazine. IEEE, v. 14, n. 2, p. 26 - 33, 1998.

ZHAO, Z.; XU, G.; QI, Y. **Representation of Binary Feature Pooling for Detection of Insulator Strings in Infrared Images**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 23, n. 5, p. 2858 - 2866, 2016.

APÊNDICE A – RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha foi descoberta, em 1800, pelo astrônomo inglês Sir William Herschel. Sabendo que a luz do Sol era uma fonte de calor e que, segundo Newton, continha todas as cores do espectro visível, decidiu tentar determinar quais ou qual era a responsável pelo aquecimento dos corpos (JONES, 1972).

Herschel realizou então um conjunto de experiências usando, basicamente, um termômetro e um prisma para a decomposição das cores do espectro visível. Com isto pretendia medir a temperatura de cada cor fazendo-as incidir individualmente sobre o termômetro. Durante este processo notou que abaixo do vermelho o termômetro registava maiores temperaturas. Num olhar mais atento, descobriu que, de fato, a temperatura mais elevada ocorria exatamente para além do vermelho, numa zona em que a radiação não era visível. Assim apelidou essa radiação invisível de raios caloríferos, que atualmente é conhecida como radiação infravermelha e que é parte integrante do espectro eletromagnético (OLIVEIRA; SILVA, 2014).

ALGUNS CONCEITOS FÍSICOS

Alguns conceitos importantes para o estudo das leis da radiação infravermelha (HOLST, 2000):

- *Corpo negro (CN)*: Trata-se de um corpo hipotético capaz de absorver toda radiação incidente sobre ele.
- *Emissividade (ϵ_λ)*: É definida como a razão entre a energia emitida por um determinado corpo, num determinado comprimento de onda, e a correspondente energia emitida por um CN à mesma temperatura do corpo considerado. Portanto, $\epsilon_{CN} = 1$.
- *Absortância (α_λ)*: É a razão entre a quantidade de energia absorvida e o total de energia que incide sobre um volume de matéria, para um dado comprimento de onda. Portanto, $\alpha_{CN} = 1$.
- *Refletância (r_λ)*: É a relação entre a energia refletida para o hemisfério de origem e a radiação incidente, para um dado comprimento de onda. Pela definição de CN, $r_{CN} = 0$.

- *Transmitância* (τ_λ): É a relação entre a energia transmitida e o total incidente, para um dado comprimento de onda. Um CN tem $t_{CN} = 0$.

Pela Lei da Conservação de Energia a soma das porções da radiação absorvida, refletida e transmitida deve ser igual ao valor da radiação emitida pela fonte. Deste modo, para um corpo negro, os coeficientes de absorção, reflexão e transmissão podem ser calculados da seguinte forma:

$$\alpha_\lambda + r_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (\text{A.1})$$

LEIS DA RADIAÇÃO

LEI DE PLANCK

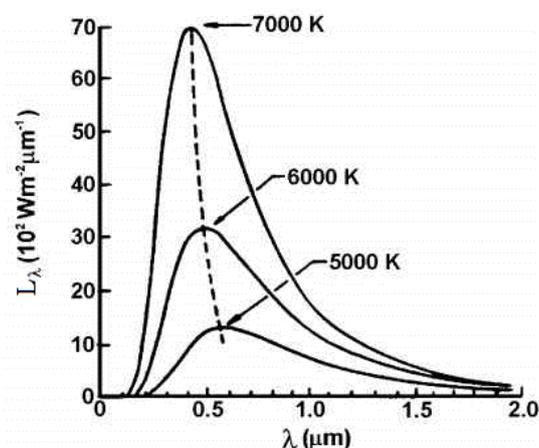
A Lei de Planck estabelece a distribuição espectral associada à máxima radiância espectral que pode ser emitida por um corpo em equilíbrio termodinâmico à uma dada temperatura. A energia emitida por um corpo negro depende de sua temperatura e do comprimento de onda em questão. Matematicamente é dada por:

$$L_{\lambda_{CN}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad (\text{A.2})$$

em que $L_{\lambda_{CN}}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) é a radiância espectral do corpo negro, c ($m \cdot s^{-1}$) velocidade da luz no vácuo $\cong 3 \times 10^8$ ($m \cdot s^{-1}$), h (J.s) é a constante de Planck = $6,6262 \times 10^{-34}$ (J.s), k ($J \cdot K^{-1}$) é a constante de Boltzmann = $1,3807 \times 10^{-23}$ ($J \cdot K^{-1}$), T (K) é a temperatura absoluta do corpo negro e λ (m) é o comprimento de onda.

Utilizando a Fórmula de Planck e considerando as curvas para várias temperaturas obtém-se o gráfico mostrado na Figura A.1 que relaciona a temperatura, o comprimento de onda e a radiância espectral.

Figura A.1. Radiância espectral de um corpo negro para temperaturas de 5000 K a 7000 K conforme a lei de Planck.



Fonte: Adaptado de GRIMM, 2016.

Observa-se pela Figura A.1, que a radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda, além disso, constata-se que com qualquer comprimento de onda, a magnitude da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura. Por fim, é possível concluir que a região espectral em que a radiação é concentrada depende da temperatura.

LEI DE WIEN

A Lei de Deslocamento de Wien estabelece uma relação de proporcionalidade inversa entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda associado ao máximo relativo da respectiva função de Planck. Ou seja, a derivada, em função do comprimento de onda, da função de Planck é nula para o comprimento de onda cuja emitância é máxima.

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} E_{\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_{m\acute{a}x}.$$

Portanto, para o comprimento cuja emitância espectral seja máxima, tem-se:

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = \text{cte} = 2,897756 \times 10^{-3} \quad (\text{A.3})$$

Ou

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,897756 \times 10^{-3}}{T}. \quad (\text{A.4})$$

Nas Equações A.3 e A.4 $\lambda_{m\acute{a}x}$ (m) é o comprimento cuja emitância espectral é máxima e T (K) corresponde a temperatura absoluta do corpo negro.

A Equação A.4 mostra que à medida que a temperatura do corpo negro aumenta, o comprimento de onda, cuja emitância espectral é máxima, diminui. A constante encontrada é denominada Constante de Wien e é dada em metro x Kelvin

A linha pontilhada presente da Figura A.1 representa o lugar geométrico da radiancia máxima para diferentes temperaturas, de acordo com a Lei do Deslocamento de Wien.

LEI DE STEFAN-BOLTZMANN

A Lei de Stefan-Boltzmann estabelece uma relação de proporção direta entre a radiancia emitida por um corpo negro, já integrada sobre todo espectro eletromagnético, e a quarta potência da temperatura deste corpo. Matematicamente é dada por:

$$E = \sigma T^4, \quad (\text{A.5})$$

em que E ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) é a radiancia total, σ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) é a constante de Stefan-Boltzmann = $5,67051 \times 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) e T (K) corresponde a temperatura absoluta do corpo negro.

LEI DE KIRCHHOFF

A emissividade de um corpo, para um dado comprimento de onda, dividida pela absorvância deste mesmo corpo, para o mesmo comprimento de onda, é igual a emissividade de um corpo negro, como mostrado na Equação A.6. Isto é, a energia absorvida por um corpo a uma dada temperatura em um determinado comprimento de onda é igual a energia emitida por esse corpo a esta mesma temperatura e a este mesmo comprimento de onda.

$$\frac{\epsilon_{\lambda}}{a_{\lambda}} = 1 = \epsilon_{CN_{\lambda}}. \quad (\text{A.6})$$

Para um corpo não negro, a emissividade é menor que 1. Neste caso a emitância é dada matematicamente por:

$$\epsilon_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \cdot \epsilon_{CN_{\lambda}}. \quad (\text{A.7})$$

Na Equação A.7 ϵ_λ é a emitância do corpo, $\epsilon_{CN\lambda}$ é a emitância de um corpo negro e ϵ_λ corresponde a emissividade do corpo.

Desta forma, o cálculo da emissividade para um corpo real pode ser efetuado por meio da Lei de Stefan-Boltzmann da Equação A.5, mas com a alteração expressa na Equação A.8.

$$E = \epsilon_\lambda \sigma T^4. \quad (\text{A.8})$$

Na Tabela A.1 a seguir são aprestados alguns valores de emissividade encontrados na literatura (HOLST, 2000).

Tabela A.1. Valores de emissividade para alguns materiais.

Material	Emissividade
Água destilada	0,96
Alumínio (anodizado, opaco)	0,97
Alumínio (polido)	0,04 – 0,06
Borracha	0,97
Madeira	0,8 – 0,9
Papel	0,92 – 0,94
Pele humana	0,98
Fibra de vidro	0,91

Fonte: HOLST, 2000.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A análise de componentes principais é um método que tem por finalidade básica, a análise dos dados visando sua redução, eliminação de sobreposições e a escolha das formas mais representativas de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais.

A PCA é um método estatístico que busca identificar a relação entre características extraídas de dados. A componente principal é o arranjo que melhor representa os dados e a componente secundária é perpendicular a componente principal. Em geral, espera-se que as componentes principais (em número menor do que o de variáveis originais) compreendam a maior parte da variação total no conjunto de dados original tal que a dimensionalidade efetiva dos dados possa ser reduzida (SOLOMON; BRECKON, 2011).

O objetivo da utilização da PCA para elaboração deste trabalho deve-se ao fato da mesma propiciar a determinação do eixo principal do isolador dentro da imagem termográfica.

TEORIA DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Considera-se N observações de M variáveis ($N \geq M$). Denota-se por x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) a observação da i -ésima variável da qual foi subtraída a média. O objetivo é a definição de um conjunto de novas variáveis descorrelacionadas y_i , que sejam uma apropriada combinação linear de x_i . Assim:

$$y_i = \sum_{j=1}^M a_{ij} x_j, \quad \text{B.1}$$

em que os coeficientes a_{ij} devem ser determinados. O conjunto de M equações lineares expresso pela Equação B.1 pode ser reescrito na forma matricial compacta como:

$$\vec{y} = \mathbf{R}\vec{x}, \quad \text{B.2}$$

em que $\vec{y} = [y_1, y_2 \dots y_M]^T$, $\vec{x} = [x_1, x_2 \dots x_M]^T$ e \mathbf{R} é uma matriz de coeficientes desconhecidos. Constata-se que as variáveis x_i , tiveram suas médias subtraídas e, portanto, são variáveis de média zero, de modo que $\langle \vec{y} \rangle = \mathbf{R} \langle \vec{x} \rangle = 0$. Por definição, para novas variáveis representadas por \vec{y} , a matriz de covariância $C_{\vec{y}}$ é dada por:

$$C_{\vec{y}} = \langle \vec{y} \vec{y}^T \rangle = \mathbf{R} \langle \vec{x} \vec{x}^T \rangle \mathbf{R}^T = \mathbf{R} C_{\vec{x}} \mathbf{R}^T, \quad \text{B.3}$$

em que os colchetes angulares denotam média de *ensemble* calculada sobre as observações no vetor de dados. Exige-se que as novas variáveis sejam descorrelatadas. Isto é equivalente a exigir que a matriz de covariância $C_{\vec{y}}$ nas novas variáveis seja diagonal. Assim, deve-se formar a matriz de covariância $C_{\vec{x}} = \langle \vec{x} \vec{x}^T \rangle$ sobre os dados originais e determinar uma matriz de diagonalização \mathbf{R} , tal que:

$$C_{\vec{y}} = \langle \vec{y} \vec{y}^T \rangle = \mathbf{R} C_{\vec{x}} \mathbf{R}^T = \mathbf{\Lambda} \text{ matriz diagonal.} \quad \text{B.4}$$

Afortunadamente, a determinação de tal matriz é simples. A Equação B.3 descreve o problema de autovalor/autovetor, que pode ser resolvido com procedimentos numéricos bem estabelecidos. As colunas de \mathbf{R} são os autovetores ortogonais que produzem a diagonalização de $C_{\vec{x}}$, e os elementos diagonais de $\mathbf{\Lambda}$ são os correspondentes autovalores. Do ponto de vista de cálculo, os passos da solução são os seguintes:

- Formar a matriz de covariância das amostras $C_{\vec{x}} = \langle \vec{x} \vec{x}^T \rangle$;
- Usar isso como uma matriz de entrada a uma rotina de decomposição de autovalor/autovetor que retornará os autovalores nas matrizes \mathbf{R} e $\mathbf{\Lambda}$, respectivamente;
- As novas variáveis (eixos) podem, então, ser prontamente calculados com a Equação B.2.

Nessa abordagem, a PCA efetua a rotação do sistema de coordenadas original para definir novas variáveis ou novos eixos, que são combinações lineares das variáveis originais. Assim, calcula-se os *eixos principais* (SOLOMON; BRECKON, 2011).