



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

CAMILA PIRES GOUVEIA GUEDES

CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO DE ISOLADORES  
POLIMÉRICOS PELOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO UV E A LÓGICA *FUZZY*

Campina Grande, Paraíba

Julho de 2015

CAMILA PIRES GOUVEIA GUEDES

CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO DE ISOLADORES  
POLIMÉRICOS PELOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO UV E A LÓGICA *FUZZY*

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Julho de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

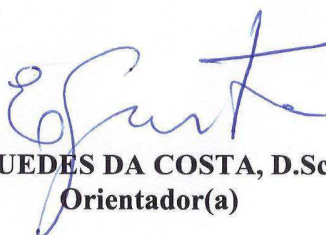
- G924c Guedes, Camila Pires Gouveia.  
Classificação das condições de degradação de isoladores poliméricos pelos níveis de radiação UV e a lógica *Fuzzy* / Camila Pires Gouveia Guedes. – Campina Grande, 2015.  
132 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.
- "Orientação: Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc."  
Referências.
1. Isoladores Poliméricos. 2. Degradação. 3. Radiação UV. 4. Inspeção. 5. Umidade. 6. Lógica *Fuzzy*. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.315.6(043)

**"CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO DE ISOLADORES  
POLIMÉRICOS PELOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO UV E A LÓGICA FUZZY"**

**CAMILA PIRES GOUVEIA GUEDES**

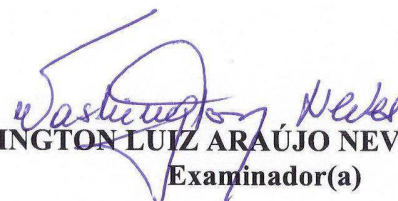
**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 02/07/2015**



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



**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG**  
**Examinador(a)**



**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
**Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedico este trabalho ao meu pai e à memória da minha mãe.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu bom Deus por se fazer sempre tão presente em minha vida, principalmente nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço, também, à minha querida família por todo o suporte: Isa, Lú, Aída, Carol, Gabriel, Jô e meus cunhados. Por todos os votos de confiança em mim depositados e por toda a torcida para que esta etapa fosse vencida.

Agradeço à memória da minha mãe, por muito ter me ajudado nos momentos mais difíceis, quando eu fazia minhas orações pedindo para que os problemas que surgissem fossem superados. Minhas orações sempre foram atendidas e eu sei que ela sempre intercedia por mim.

Agradeço à minha pequena sobrinha Alice, por cada abraço e beijo, cada gesto de carinho, sem nem mesmo saber o quanto eu estava precisando. Agradeço, também, ao pequeno Pietro, por ter trazido ainda mais amor à minha vida.

Agradeço ao meu amor, Marconni, pela ajuda concedida neste trabalho e durante a realização dos ensaios. Agradeço, também, por se fazer tão presente em minha vida, me amparando nos momentos de dificuldade e me dando todo o amor desse mundo. Meus dias são mais felizes contigo!

Agradeço ao meu pai e grande professor, Edson, por ser exemplo de pessoa generosa, honesta e íntegra, de quem eu muito me orgulho e em quem eu tento me espelhar. Agradeço-o, também, como orientador, pela grande contribuição dada no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos técnicos do LAT por toda a ajuda na montagem dos experimentos. Em especial a Igor, pelas inúmeras trocas de isolador realizadas e pela disposição em sempre ajudar.

Agradeço aos companheiros de ensaio, York, Bruno, Renata, Pedro e Marcus Tullius, por toda contribuição dada à realização deste trabalho. Agradeço, ainda, a Filipe Lucena, André Germano e Jalberth pela preocupação com o andamento do trabalho.

Agradeço à colaboração de Girlene por ter estado sempre disposta a me ajudar no processamento das imagens, pois mesmo estando atarefada e cansada arranjava um tempo para tirar minhas dúvidas. Obrigada por todos os "vai dar tudo certo". De mesmo modo, agradeço a Antônio Neto pela ajuda concedida.

Agradeço, ainda, a Newton por todo o esforço em consertar o detector de descargas parciais e todo o tempo despendido para tanto.

Agradeço aos meus grandes amigos, sem citar nomes, pela amizade, carinho, atenção e preocupação. Agradeço a força e o incentivo dados.

À CHESF, agradeço pelo fornecimento dos isoladores poliméricos, objetos de teste deste trabalho, e sem os quais o mesmo não seria possível.

A todos, meu MUITO OBRIGADA!

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor uma técnica de classificação de isoladores poliméricos que possibilite a indicação do seu estado de degradação em operação, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de intervenções (trocas) e, conseqüentemente, contribuir para a redução das interrupções. A técnica se baseia na análise da radiação ultravioleta (UV) emitida por isoladores ensaiados. Foram utilizados isoladores poliméricos de 230 kV com diferentes níveis de degradação como objetos de teste. As imagens UV obtidas durante os ensaios foram submetidas a uma técnica de processamento de imagens, de modo a minimizar os ruídos existentes. Diante dos resultados obtidos, foi proposto um sistema lógico *Fuzzy* para classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos a partir da medição da radiação UV e a umidade relativa do ar. A técnica se mostrou promissora no auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não ao equipamento inspecionado.

**Palavras-chave:** isoladores poliméricos, degradação, radiação UV, inspeção, umidade, lógica *Fuzzy*.



## **ABSTRACT**

The objective of this work is to propose a polymeric insulators classification technique to enable an indication of their state of degradation in operation, in order to determine the most appropriate time to carry out interventions (exchanges) and thus contribute to contribute to the reduction of interruptions. The technique relies on analysis of ultraviolet (UV) radiation emitted by insulators tested. Polymeric insulators of 230 kV were used with different levels of degradation as test objects. UV images obtained during test were subjected to an image processing technique so as to minimize existing noise. Based on these results, it proposed a fuzzy logic system for classifying the state of degradation of polymeric insulators from UV radiation measurement and the relative humidity. The technique has shown considerable promise in helping to make decisions about the need for intervention or not in inspected equipment.

**Keywords:** polymeric insulators, degradation, UV radiation, inspection, humidity, Fuzzy logic.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Uso da câmera detectora de ultravioleta na inspeção de isoladores.....	19
Figura 2 - Imagem obtida pelo DRUV durante ensaio.....	19
Figura 3 - Isolador polimérico.....	21
Figura 4 - Estrutura molecular da borracha de silicone. ....	22
Figura 5 - Fotografia da lavagem de isoladores em linha de transmissão. ....	23
Figura 6 - Forma de uma gota de água em uma superfície hidrofóbica A e em uma superfície hidrofílica B.....	24
Figura 7 - Isoladores com superfície hidrofóbica.....	25
Figura 8 - Trilhamento de núcleo em isolador polimérico. ....	26
Figura 9 - Erosão em isolador polimérico.....	27
Figura 10- Fratura frágil em isolador polimérico.....	28
Figura 11 - Tipos de descargas parciais em arranjos básicos: (a) descargas corona, (b) descargas superficiais e (c) descargas internas. ....	29
Figura 12 - Espectro típico de uma descarga corona no ar. ....	30
Figura 13 - Princípio de funcionamento da câmera DayCor. ....	31
Figura 14 - Ocorrência do efeito corona em um eletrodo ponta-plano.....	31
Figura 15 - Diagrama esquemático das etapas do processamento de imagens.....	33
Figura 16 - Exemplo de pré-processamento: (a) imagem original corrompida com ruído gaussiano, (b) imagem após a aplicação de um filtro mediana para redução do ruído e (c) imagem final, após a aplicação de um filtro passa-altas para realce dos contornos.....	34
Figura 16 - Aplicação da segmentação: (a) Imagem original em níveis de cinza, (b) Imagem segmentada através de uma binarização e (c) Imagem segmentada por detecção de bordas. ....	35
Figura 17 - Classificação da idade de um indivíduo através da (a) lógica <i>Fuzzy</i> e da (b) lógica booleana.....	37
Figura 18 - Função de pertinência triangular.....	39
Figura 19 - Função de pertinência trapezoidal.....	40
Figura 20 - Exemplo de variável linguística.....	42
Figura 21 - Sistema lógico <i>Fuzzy</i> .....	42
Figura 22 - Fotografia dos isoladores poliméricos fornecidos pela CHESF. ....	49

Figura 23 - Representação gráfica do isolador de 230 kV a ser utilizado nos ensaios e suas dimensões.....	50
Figura 24 - Representação do anel equalizador a ser utilizado nos ensaios.....	50
Figura 25 - Fotografia do transformador a ser utilizado nos ensaios. ....	52
Figura 26 - Fotografia da montagem realizada para simular as condições de campo. ....	53
Figura 27 - Plataforma de suporte para utilização do DayCor. ....	54
Figura 28 - Diagrama esquemático da montagem do experimento.....	54
Figura 29 - Fotografia do arranjo para medição das descargas corona. ....	55
Figura 30 - Posicionamento das plataformas durante os ensaios. ....	56
Figura 31 - Termohigrômetro utilizado para medição da umidade e temperatura. ....	59
Figura 32 - Fotografia dos aspectos físicos dos isoladores poliméricos com diferentes estados de degradação: (a) crítico, (b) desgaste médio e (c) novo. ....	62
Figura 33 - Exposição do núcleo do (a) isolador 10 e do (b) isolador 11.....	66
Figura 34 - Isolador polimérico de 230 kV: (a) imagem da câmera UV, (b) soma das 10 imagens binárias após processamento e (c) imagem ponderada.....	67
Figura 35 - Gráfico da correlação entre as descargas corona (pontos/min) e a concentração de pixels da fâcula. ....	69
Figura 38 - Funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada Dcorona. ....	74
Figura 39 - Funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada Umidade. ....	75
Figura 40 - Funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada Degradação.....	76
Figura 41 - Tela de interface do sistema <i>Fuzzy</i> : isolador novo com Dcorona = 10 e Umidade =65. ....	77
Figura 42 - Tela de interface do sistema <i>Fuzzy</i> : isolador novo com Dcorona = 40 e Umidade =65. ....	77
Figura 43 - Tela de interface do sistema <i>Fuzzy</i> : saída <i>Fuzzy</i> para concentração de 301 pixels e umidade de 71%. ....	78
Figura 44 - Tela de interface do sistema <i>Fuzzy</i> : saída <i>Fuzzy</i> para concentração de 123 pixels e umidade de 57%. ....	79

Figura 45 - Tela de interface do sistema <i>Fuzzy</i> : estado de degradação para concentração de pixels de 180 e umidade de 35%. .....	80
Figura 46 - Tela de interface do sistema <i>Fuzzy</i> : estado de degradação para concentração de pixels de 180 e umidade de 75%. .....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Desligamentos por km de linha por ano .....	17
Quadro 2 - Quadro sinótico com os principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas em estudo. ....	48
Quadro 3 - Pesos atribuídos aos aspectos físicos avaliados nos isoladores poliméricos.....	51
Quadro 4 - Classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos pelo IDI.....	61
Quadro 5 - Resumo dos resultados dos ensaios com isoladores poliméricos .....	63
Quadro 6 - Reclassificação do estado de degradação dos isoladores .....	65
Quadro 7 - Valores médios das descargas corona e das respectivas concentrações de pixels após o processamento das imagens .....	68
Quadro 8 - Influência da umidade para isoladores considerados novos .....	70
Quadro 9 - Influência da umidade para isoladores com degradação média.....	71
Quadro 10 - Influência da umidade para isoladores com degradação crítica .....	71
Quadro 11 - Valores médios da concentração de pixels em cada isolador .....	72
Quadro 12 - Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Dcorona .....	73
Quadro 13 - Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Umidade .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATH	Alumina Trihidratada.
CCD	Charge Coupled Devices.
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
DRUV	Detector de Radiação UV.
EPDM	Monômero de Etileno-propilenodieno.
IDI	Índice de Degradação dos Isoladores.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
O	Oxigênio.
Si	Silício.
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande.
UV	Ultravioleta.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Objetivos .....	15
1.2 Organização do trabalho.....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1 Inspeções em isoladores.....	18
2.2 Isoladores poliméricos .....	19
2.3 Descargas corona .....	28
2.4 Detecção do efeito corona.....	29
2.5 Influência da umidade no processo de degradação de isoladores poliméricos.....	31
2.6 Processamento das imagens .....	33
2.7 Lógica <i>Fuzzy</i> .....	36
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	455
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	49
4.1 Material .....	49
4.2 Métodos.....	50
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	61
5.1 Classificação dos isoladores via inspeção visual.....	61
5.2 Ensaios.....	63
5.3 Processamento das imagens .....	66
5.4 Influência da umidade na medição das descargas corona .....	70
5.5 Sistema <i>Fuzzy</i> desenvolvido.....	71
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	82
6.1 Trabalhos futuros .....	83
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84

## **1. INTRODUÇÃO**

Idealmente, o sistema elétrico de transmissão de energia deve operar de forma ininterrupta. A sociedade e as agências reguladoras têm requerido das empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia uma alta confiabilidade nos serviços prestados. Por outro lado, essas empresas lidam com prejuízos financeiros e multas em casos de desligamentos não programados de suas linhas de transmissão ou descontos da parcela variável, pois boa parte da sua lucratividade está relacionada com a qualidade dos serviços prestados.

Os principais motivos para a ocorrência de desligamentos no sistema elétrico estão associados às falhas ocasionadas nos isolamentos elétricos de modo geral. Especificamente, nos sistemas de transmissão, o isolamento elétrico é feito, basicamente, utilizando isoladores.

Historicamente, as linhas de transmissão têm empregado isoladores de porcelana e de vidro. Contudo, nos últimos anos, o uso de isoladores poliméricos tem crescido devido as suas vantagens apresentadas, dentre elas: peso reduzido, maior hidrofobicidade superficial e maior resistência ao vandalismo. Entretanto, os isoladores poliméricos de alta tensão instalados ao ar livre, quando em operação, estão sujeitos à ocorrência das descargas corona. Tratam-se de descargas que ocorrem em meio gasoso quando a intensidade de campo elétrico nas proximidades do equipamento excede a rigidez dielétrica do ar e geram radiação ultravioleta (UV), calor e gases (ozônio e  $\text{NO}_2$ ). Além disso, combinadas com uma elevada umidade, geram ácido nítrico, capaz de causar a deterioração da superfície do isolador.

Assim, constatada a vulnerabilidade às descargas corona e reconhecida a sua importância para o sistema elétrico, os isoladores requerem um cuidado especial. Ações de manutenção preventiva como forma de antecipação a possíveis falhas são necessárias. Além disso, é desejável que a manutenção seja realizada através de métodos não invasivos, permitindo sua aplicação durante o período de operação normal das linhas ou das subestações, não havendo necessidade de interrupção no fornecimento de energia elétrica para realização de manutenção e nem interferência no próprio sistema.



Empresas do setor elétrico têm buscado por técnicas que possibilitem a indicação do estado de degradação dos equipamentos em operação, de modo a se determinar o momento mais adequado para realização de intervenções e, conseqüentemente, contribuir para o aumento contínuo de seus índices de serviço. A manutenção de isoladores de alta tensão ainda é realizada com a ausência de critérios objetivos que orientem o inspetor de manutenção (ROCHA, 2014). Assim, a introdução de ferramentas confiáveis que possibilitem alertar o inspetor de manutenção quanto ao estado de degradação dos isolamentos representa uma ação estratégica importante para a garantia da operação normal do sistema elétrico.

Desse modo, neste trabalho, pretende-se desenvolver uma metodologia que permita auxiliar a manutenção de isoladores poliméricos, bem como, propor um sistema lógico para o diagnóstico das condições operacionais dos isoladores presentes no sistema, como forma de antecipação a possíveis falhas ou vislumbre do tempo ótimo para a sua troca.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia que permita classificar os isoladores poliméricos de 230 kV quanto a seu estado de degradação.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Proposição de um arranjo experimental que coloque a medição em laboratório em condições próximas às medições em campo. Além disso, o arranjo deve possibilitar a medição e gravação dos níveis de descargas corona emitidos pelos isoladores, utilizando, para tanto, uma câmera de detecção de radiação UV;
- Definição de uma técnica de processamento das imagens obtidas com o equipamento Detector de Radiação UV (DRUV) para obtenção da região da fâcula (região onde há a maior concentração de pixels) e do número de pixels em cada imagem;

- Avaliação da influência da umidade nas medições de descargas corona e implementação de um sistema lógico *Fuzzy* para classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos.

## **1.2 Organização do trabalho**

A estrutura deste trabalho de dissertação será apresentada a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre os assuntos que são abordados neste trabalho. Dentre eles, os principais conceitos sobre os isoladores poliméricos, as descargas corona, o processamento de imagens e a lógica *Fuzzy*.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica apresentando os trabalhos mais relevantes nas áreas de isoladores poliméricos, medição da radiação UV, a influência da umidade em suas medições.

No Capítulo 4 são descritos material e métodos empregados nas medições em laboratório, com o objetivo de permitir a implementação de uma lógica *Fuzzy* para a classificação dos isoladores poliméricos quanto a seus estados de degradação.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e análises sobre os ensaios realizados para a medição das descargas corona, sobre o processamento das imagens e o sistema *Fuzzy* proposto.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta pesquisa e as propostas para a sua continuidade.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O isolamento das linhas de transmissão e de distribuição aéreas é feito, basicamente, pelo ar atmosférico e pelos isoladores. A função do sistema de isolamento é segregar áreas com diferentes níveis de tensão, seja entre partes energizadas ou entre a parte energizada e a terra. Os isoladores presentes nas linhas de transmissão possuem, além da função de isolamento, propriedades mecânicas que os permitem suportar os esforços produzidos pelos condutores (peso e tração), os efeitos da variação de temperatura, do curto-circuito e do vento. Assim, os isoladores estão associados ao nível de segurança do sistema.

Pesquisas realizadas por MONTICELLI e GARCIA (2003) indicaram que as falhas em isoladores ocasionam mais de 60% dos desligamentos ocorridos em uma linha de transmissão com classe de tensão igual ou superior a 230 kV, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Desligamentos por km de linha por ano.

Componente	Desligamentos (%)	
	<230 kV	≥230 kV
<b>Isoladores</b>	46,4	63,2
<b>Cabos</b>	19,6	9,7
<b>Cabos para-raios</b>	3,6	7,4
<b>Estruturas</b>	16,3	10,1
<b>Ferragens</b>	0,8	1,8
<b>Outras causas</b>	13,2	7,8

Fonte: adaptado de MONTICELLI e GARCIA, 2003.

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, eles requerem um cuidado especial, demandando medidas que se antecipem a possíveis falhas. Além disso, quando possível, é desejável que a sua manutenção seja realizada através de 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.

## **2.1 Inspeções em isoladores**

Rotineiramente, as inspeções em isoladores são efetuadas juntamente com a inspeção nos demais componentes da linha. O objetivo das inspeções é detectar defeitos. Como defeito, entende-se qualquer alteração física ou química no estado de um componente ou instalação, não causando o término de sua habilidade em desempenhar sua função requerida, porém podendo, a curto ou longo prazo, acarretar em sua indisponibilidade.

A manutenção em linha de transmissão é efetuada, geralmente, a partir dos resultados de inspeção visual associada ao grau de experiência dos próprios inspetores. Além da técnica de inspeção visual, métodos baseados na combinação da medição de ultravioleta, ultrassom, infravermelho, medições de campos eletromagnéticos, medições de campos elétricos, de forma isolada ou em conjunto, tem cada vez mais sido empregados na identificação de isoladores com defeitos.

Todos estes métodos exigem que as equipes de inspeção/manutenção percorram sistematicamente toda a linha de transmissão para detectar os defeitos, seja por via terrestre ou por helicóptero devidamente aparelhado. Estes tipos de inspeções são onerosas e muitas vezes demandam bastante tempo, pois todos os sinais coletados não são analisados de uma maneira automática, via *software* (ADAMI *et al.*, 2008).

No caso dos isoladores não poliméricos, os inspetores devem estar especialmente atentos para peças quebradas ou com pedaços arrancados, marcas de queimas, sinais de poluição e pontos de corrosão em suas ferragens integrantes. Já para o caso de isoladores poliméricos, a atenção deve estar voltada para marcas de trilhamento, de erosão, sinais de deposição de contaminação, pontos de corrosão em suas ferragens integrantes, alterações no revestimento polimérico, a exposição do núcleo e o estado do selo.

Dentre os instrumentos mais utilizados para inspeção dos isoladores de modo não invasivo tem-se o detector de ultravioleta (UV). O detector UV é um equipamento capaz de detectar descargas corona e superficiais que emitem radiação luminosa, transformando-as em imagens. Para tanto, ele é composto por

uma câmera que capta imagem visível e outra que capta radiação UV. As imagens são combinadas eletronicamente. Na Figura 1 se tem um exemplo de uso da câmera UV.

Figura 1 - Uso da câmera detectora de ultravioleta na inspeção de isoladores.



Fonte: Direct Industry <<http://www.directindustry.com/prod/ofil-ltd/high-sensitivity-digital-cameras-65565-689709.html>>

O equipamento DRUV permite a exibição na tela do número de descargas por minuto durante o ensaio. Na Figura 2 é possível observar uma imagem obtida pelo DRUV com isoladores poliméricos.

Figura 2 – Imagem obtida pelo DRUV durante ensaio.



Fonte: COSTA *et al.*, 2007.

## 2.2 Isoladores poliméricos

A história dos isoladores poliméricos se iniciou na década de 1940, quando materiais orgânicos isolantes começaram a ser utilizados na fabricação de isoladores de alta tensão internos. Esses materiais eram leves e resistentes ao

impacto (BRUINS, 1968). Nesse período, os processos de produção rudimentares e os tipos de materiais utilizados tornavam os isoladores suscetíveis a grande degradação, tanto por exigências mecânicas como elétricas. Conseqüentemente, surgiram inúmeros relatos de falhas estruturais e de isolamento que comprometiam a estabilidade dos sistemas elétricos.

Além disso, as primeiras gerações de isoladores poliméricos se depararam com problemas de trilhamento e erosão (GORUR, 1999). Na década de 1950, com a aplicação da alumina trihidratada (ATH), estes problemas foram atenuados e o uso dos isoladores poliméricos externos se tornou, de fato, viável, pois o uso da ATH contribuiu para o aumento da resistência ao trilhamento e à erosão no material polimérico. Já a utilização dos isoladores poliméricos em linhas de transmissão teve início, de fato, na década de 1980, quando surgiu sua primeira versão comercial.

Apesar de, naquela época, o custo do material polimérico ser mais elevado, as suas características mecânicas e elétricas propiciavam uma economia durante o período útil de vida, seja na instalação ou na manutenção do equipamento. Portanto, esse balanço econômico e o desenvolvimento das técnicas de produção permitiram aos isoladores poliméricos sua entrada no mercado de forma mais competitiva.

O isolador polimérico é composto, basicamente, pelo núcleo, pelas saias, também denominadas de aletas, e pelas ferragens terminais, cada uma com suas respectivas funções, tal como apresentado a seguir.

**Núcleo:** é constituído por uma haste de fibra de vidro revestida por polímeros, os quais possuem alto desempenho como isolante elétrico, dificultando a penetração de umidade. A função do núcleo é suportar os esforços mecânicos provenientes do condutor.

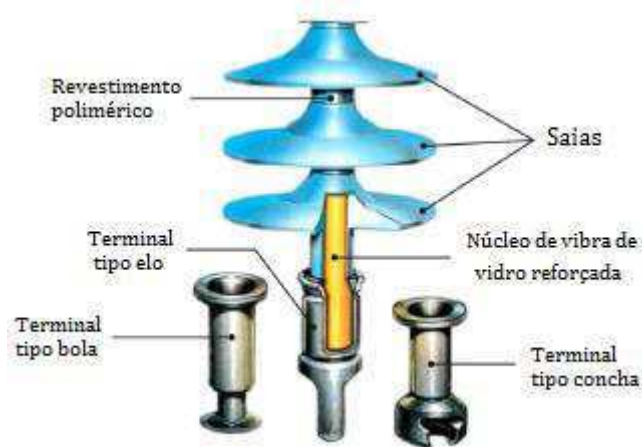
**Saias:** têm como função garantir a distância de escoamento do isolador e são compostas de material polimérico. Dentre os principais materiais empregados na fabricação do revestimento destacam-se o EPDM (monômero de etileno-propilenodieno) e a borracha de silicone (BISNATH *et al.*, 2006). Nos últimos anos, o uso do isolador à base de borracha de silicone tem se mostrado crescente, devido, principalmente, a sua capacidade de repelir água, dada a existência de grupos metil em sua

superfície, melhorando seu desempenho na recuperação da característica hidrofóbica (SOVAR, 2004).

**Ferragens terminais:** são encarregadas de realizar a transmissão dos esforços mecânicos do condutor até o núcleo, realizando, desta forma, as ligações: condutor/isolador e isolador/estrutura. Podem ser de aço forjado, alumínio moldado, forjado ou maquinado, e ferro maleável.

Na Figura 3 é ilustrada a estrutura de um isolador polimérico.

Figura 3 - Isolador polimérico.



Fonte: adaptado de RODURFLEX, 2004b.

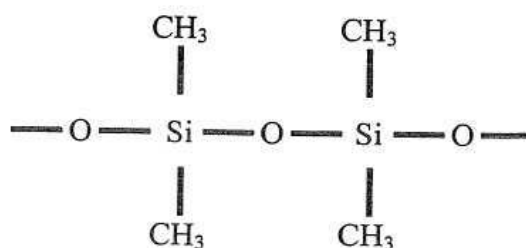
### 2.2.1 Polímero à base de borracha de silicone

Os polímeros básicos são compostos por átomos com quatro ligações de valência, sobretudo silício e carbono, capazes de formar estruturas longas com diferentes propriedades. O carbono é capaz de se combinar consigo mesmo, além do hidrogênio, oxigênio, entre outros elementos, formando cadeias de elevada variedade, complexidade e de repetições cíclicas (monômeros). A mais importante propriedade dos polímeros consiste em seu elevado peso molecular. A degradação do polímero gera a quebra das macromoléculas, causando redução no peso molecular. A quebra pode ser causada por degradação biológica, poluentes químicos (oxigênio, ozônio, NO<sub>2</sub>) e estresse ambiental (calor, umidade, radiação UV, chuva, poluição, luz).

Os isoladores poliméricos à base de borracha de silicone apresentam uma série de vantagens em relação a outros materiais. A estrutura da borracha de silicone é composta por silício e oxigênio (Si - O), elementos que formam sua

cadeia polimérica. Esta formação estrutural é a mesma das estruturas encontradas em materiais altamente estáveis como o quartzo, o vidro e a areia, o que promove excelente resistência a altas e baixas temperaturas, a degradação por oxigênio, ozônio, intemperismo, efeito corona e irradiações. A estrutura molecular da borracha de silicone é mostrada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura molecular da borracha de silicone.



Fonte: GORUR, 1999.

Os isoladores poliméricos, de modo geral, apresentam algumas vantagens que permitiram sua inserção no comércio de isoladores de modo competitivo, seja em substituição a isoladores cerâmicos retirados de serviço ou para serem instalados em novas linhas de transmissão.

### 2.2.2 Vantagens dos isoladores poliméricos

O emprego de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão vem crescendo a cada ano. Isto se deve ao fato destes equipamentos apresentarem as vantagens a seguir.

- **Facilidade de manuseio, instalação e fabricação**

O isolador polimérico possui dimensões compactas, resultando em isoladores com massa até 90% menor que os convencionais. Assim, sua instalação se torna mais rápida, mais simples e mais compacta, reduzindo o custo com as estruturas da linha de transmissão, com o transporte, o armazenamento e a mão de obra da instalação. Além disso, o tempo gasto em seu processo de fabricação é considerado curto, dada a facilidade na usinagem e a fundição e cura a baixas temperaturas, e há possibilidade de inserção de peças metálicas durante o processo, evitando-se o uso de peças coladas que podem se tornar fontes de defeitos.



- **Excelente desempenho sob poluição**

Os isoladores poliméricos, sobretudo os de silicone, possuem excelente desempenho quando submetidos à poluição, pois sua estrutura carbônica estabelece ligações de baixa energia entre si que proporcionam um comportamento não quebradiço e com baixa energia livre na sua superfície. Assim, sua estabilidade energética superficial permite um comportamento extraordinário quanto à aderência da água, tornando-a altamente hidrofóbica e com excelente desempenho face à poluição. Desse modo, as lavagens dos isoladores poliméricos devem ser menos frequentes quando comparadas aos isoladores cerâmicos. A lavagem de uma cadeia de isoladores de vidro pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 - Fotografia da lavagem de isoladores em linha de transmissão.



Fonte: Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=yJ9OLY3hoec>>.

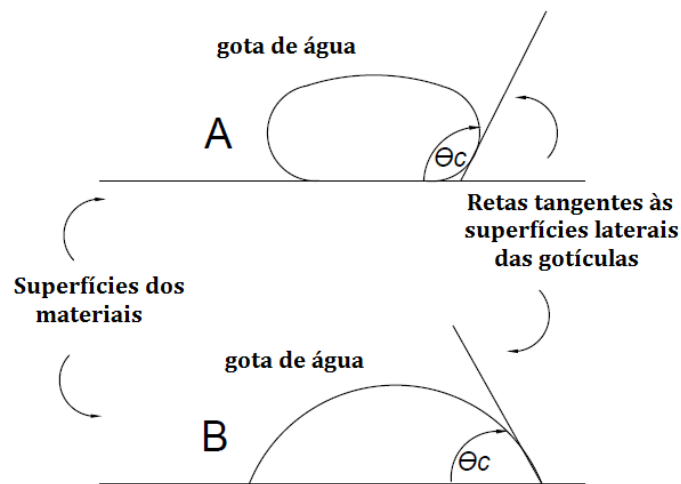
- **Resistência ao vandalismo**

Um fator difícil de ser controlado é o vandalismo contra os isoladores, seja através de disparo por arma de fogo ou pelo lançamento de pedras, pois a quebra da porcelana ou o estilhaçamento do vidro resulta na redução da sua rigidez dielétrica. As aletas à base de polímeros apresentam elasticidade e, associadas à elevada resistência do núcleo central, garantem um desempenho seguro dos isoladores em regiões de vandalismo e normalmente não implicam em riscos graves a sua operação. Além disso, como a estrutura não quebra ou estilhaça e, conseqüentemente, não provoca um efeito visual, torna-se um alvo bem menos atrativo aos vândalos.

- **Hidrofobicidade**

Os isoladores com revestimento polimérico à base de silicone, em particular, são caracterizados por serem hidrofóbicos. Esta propriedade pode ser descrita pelo ângulo de contato que a gota do líquido faz com a superfície do material ( $\theta_c$ ). Na Figura 6 podem ser observadas as formas da gota de água em superfícies hidrofóbica e hidrofílica.

Figura 6 - Forma de uma gota de água em uma superfície hidrofóbica A e em uma superfície hidrofílica B.

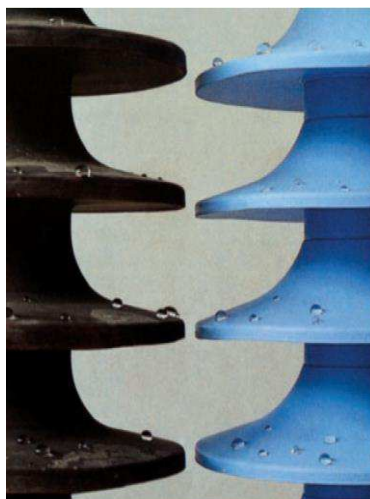


Fonte: Adaptado de AMIN *et al.*, 2007.

O material da superfície A é considerado hidrofóbico, pois a gota de água toca a superfície fazendo um ângulo de contato maior que  $90^\circ$ . Já o material de B pode ser considerado hidrofílico, pois permite que a gota toque uma grande superfície, fazendo um ângulo de contato menor que  $90^\circ$  (AMIN *et al.*, 2007).

Em superfícies hidrofóbicas a água concentra-se em gotas, impedindo que a mesma forme uma lâmina, tornando a resistência superficial do isolador mais alta, mesmo em condições de chuva. Com a resistência mais elevada, dificulta-se, então, a formação de bandas secas na superfície do isolador, reduzindo a corrente de fuga e o trilhamento (*tracking*). No entanto, sob estresses de altas tensões, as gotas podem ser unidas por arcos elétricos locais, que podem evoluir para uma descarga superficial (KINDERSBERGER *et al.*, 1989). Isoladores com superfície hidrofóbica podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 - Isoladores com superfície hidrofóbica.



Fonte: NERI, 2005.

### 2.2.3 Desvantagens dos isoladores poliméricos

Apesar dos benefícios citados anteriormente, a utilização dos isoladores poliméricos nos sistemas de transmissão de energia apresenta algumas desvantagens.

- **Difícil identificação de falhas internas**

Diferentemente dos isoladores de vidro temperado, que se estilhaçam quando quebrados, os isoladores poliméricos muitas vezes não apresentam, aparentemente, indícios de que houve uma falha interna. Assim, a realização de uma inspeção visual pode não detectar problemas no isolador e, portanto, os isoladores poliméricos requerem mais atenção quanto a sua manutenção.

- **Menor resistência aos raios UV**

As radiações UV, em particular, são as principais responsáveis pela degradação do material polimérico, pois deterioram as estruturas químicas e mecânicas da superfície do material, provocam mudança de cor e podem comprometer suas propriedades dielétricas.

Os isoladores poliméricos de uso externo, por estarem expostos às intempéries, estão sujeitos à influência da radiação UV da luz solar, capaz de degradar o revestimento à base de polímeros após longos períodos de exposição.

Além disso, a ocorrência das descargas corona também produz radiação UV, porém em uma faixa do espectro distinta das radiações solares.

A absorção da radiação UV nos isoladores resulta em degradações químicas e mecânicas da estrutura polimérica, reduzindo a resistência a fenômenos como as descargas parciais e os esforços de tração (QUEIRÓS, 2013). O efeito da degradação pela radiação UV se torna mais crítico no caso de haver umidade na superfície do isolador. Assim, sugere-se que os isoladores poliméricos para uso externo devam ser avaliados na presença combinada de radiação UV e elevada umidade.

- **Comportamento a longo prazo desconhecido**

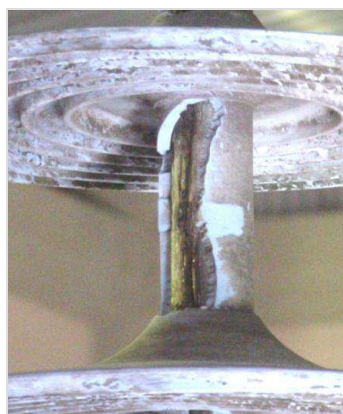
Por serem revestidos com material à base de polímeros, os isoladores poliméricos estão sujeitos a alterações químicas em seu revestimento, seja pelas condições ambientais ou pela formação de descargas em sua superfície, tornando a avaliação da expectativa de vida do isolador polimérico não trivial e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

- **Surgimento de mecanismos de falhas desconhecidos**

Com o emprego de isoladores poliméricos no sistema elétrico, alguns mecanismos de falhas até então desconhecidos entre os isoladores tradicionais surgiram, dentre eles: o trilhamento, a erosão e a fratura frágil.

O processo de trilhamento consiste na formação de um caminho condutor na superfície polimérica do isolador, com aparência carbonizada, decorrente das inevitáveis correntes de fuga superficiais. Na Figura 8, observa-se um isolador polimérico apresentando trilhamento de núcleo em estágio avançado.

Figura 8 - Trilhamento de núcleo em isolador polimérico.



Fonte: FERREIRA, 2007.

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. A degradação produzida pela erosão é menor do que a do trilhamento e normalmente não provoca a falha do equipamento, desde que não atinja o núcleo. Um isolador apresentando erosão em seu revestimento pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Erosão em isolador polimérico.



Fonte: Própria autora

O processo de fratura frágil pode ser considerado, atualmente, como um processo controlado. Entretanto, ainda pode ocorrer na região do isolador mais próxima ao lado de alta tensão, onde os estresses elétricos e mecânicos são mais elevados, já que se trata de uma área de interface entre materiais. Interfaces críticas podem ser detectadas entre polímero e ferragens terminais, entre polímero e núcleo e entre o núcleo e as ferragens. Estas interfaces formam o ponto de junção tripla entre núcleo, revestimento e ferragens, conhecida como selo, sendo um dos pontos mais sensíveis do isolador polimérico. No caso de ingresso de umidade no selo, o rompimento dos isoladores pode ocorrer como resultado da corrosão do bastão polimérico do isolador sob tensão. Um isolador polimérico que sofreu o processo de fratura frágil pode ser observado na Figura 10.

Figura 10- Fratura frágil em isolador polimérico.



Fonte: GUIDE, 2003.

### 2.3 Descargas corona

A partir do decênio de 1950, com o advento de novos materiais isolantes, como o polietileno e as resinas epóxi, e seu uso em equipamentos de alta tensão, o estudo das descargas parciais passou a ter maior relevância. Apesar de possuírem melhores qualidades, os materiais produzidos à base de carbono são mais susceptíveis a ação das descargas parciais, que causam a deterioração do isolamento nos equipamentos de alta tensão.

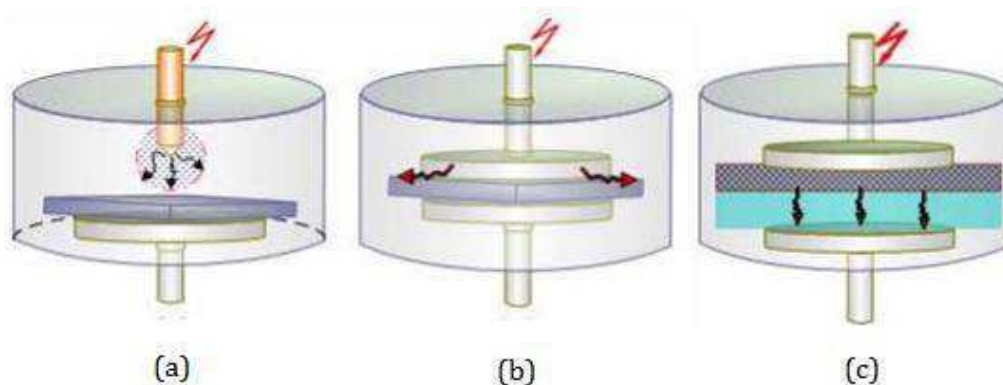
A descarga parcial é definida pela IEC 60270 como uma descarga elétrica localizada que curto-circuita parte da isolação entre condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor.

A ocorrência de descargas parciais nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de sua fragilidade na suportabilidade dielétrica. Em caso da deterioração do material ser contínua poderá provocar danos severos ao isolamento, modificando suas propriedades dielétricas e, conseqüentemente, ao sistema elétrico interligado a ele. Assim, dependendo da intensidade das descargas parciais, a vida útil do material poderá ser reduzida drasticamente. Inclusive, um dos objetivos a que se propõe a medição dessas descargas é o de contribuir na determinação da relação entre as suas grandezas e a expectativa de vida útil do dielétrico e, se possível, definir a duração mínima dos equipamentos antes que seja necessária alguma intervenção (KAWAKATSU, 2009).

O termo descargas parciais envolve um amplo grupo de fenômenos de descarga tal como descargas internas, superficiais e descargas corona, conforme está ilustrado na Figura 11. Descargas internas podem ocorrer nas cavidades em dielétricos sólidos ou nas bolhas em dielétricos líquidos; descargas superficiais

podem ocorrer na interface de isolamentos ou condutores e descargas corona são relativos a descargas em dielétricos gasosos se estão presentes elevados campos elétricos não-homogêneos (CUENCA, 2005).

Figura 11 - Tipos de descargas parciais em arranjos básicos: (a) descargas corona, (b) descargas superficiais e (c) descargas internas.



Fonte: CUENCA, 2005.

As descargas corona, em particular, ocorrem em meio gasoso, quando há uma intensificação do campo elétrico nas proximidades do eletrodo, de modo que este seja submetido a solicitações superiores a sua rigidez dielétrica, aproximadamente 30 kV/cm, porém as condições ainda não são suficientes para provocar um arco elétrico (um estágio anterior a ruptura).

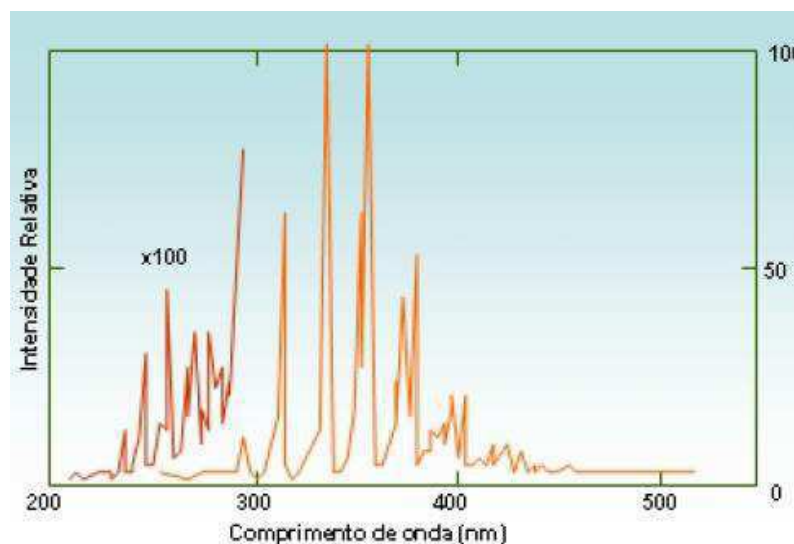
A ocorrência das descargas corona em isoladores poliméricos pode gerar efeitos indesejáveis, tais como: rádio interferência, ruído audível, geração de ozônio e a perda de energia (AMIN, 2007). Além disso, contribui para a degradação do isolador e, caso ocorra de forma contínua, pode tornar o isolador inutilizado.

#### 2.4 Detecção do efeito corona

As descargas corona emitem radiação ultravioleta no ar com comprimento de onda entre 230 e 405 nm. Entretanto, a radiação solar se faz presente em comprimentos de onda superiores a 280 nm, sobrepondo-se à emissão da radiação ultravioleta. No entanto, equipamentos detectores de corona, como o DayCor II®, ou o Corocam®, captam radiação na faixa de 240 a 280 nm que, apesar de ser uma faixa em que a intensidade da emissão é relativamente menor que na faixa de 280 a 405 nm, a radiação solar não consegue atingir a superfície da terra, devido à camada de ozônio. Assim, equipamentos detectores de corona podem ser utilizados para inspeções durante o dia (LINDNER *et al.*, 1999). O espectro de uma

descarga corona pode ser observado na Figura 12. A curva em vermelho representa uma ampliação de 100 vezes na intensidade relativa entre os comprimentos de onda de 240 e 280 nm da curva em laranja.

Figura 12 - Espectro típico de uma descarga corona no ar.



Fonte: LINDNER et al, 1999.

O DRUV é composto por duas câmeras acopladas: uma comum e a outra para captar as imagens na faixa UV, na qual ocorre a emissão de sinais de descarga corona. Os sinais gerados podem ser exibidos separadamente ou de forma composta, permitindo a perfeita localização do ponto onde ocorre o corona (LINDNER *et al.*, 1999).

Para se detectar a radiação ultravioleta emitida, o DRUV usa uma câmera do tipo *Charge Coupled Devices* (CCD) intensificadora da imagem UV. Esta câmera é equipada com um filtro óptico, transmitindo somente na faixa de bloqueio à radiação solar, através da utilização de um filtro especial que é transparente para a faixa de bloqueio à radiação solar e completamente opaco para comprimentos de onda maiores. Os fótons que são transmitidos são contados pelo contador da câmera e apresentados, estando em correlação com a intensidade de descargas corona medida.

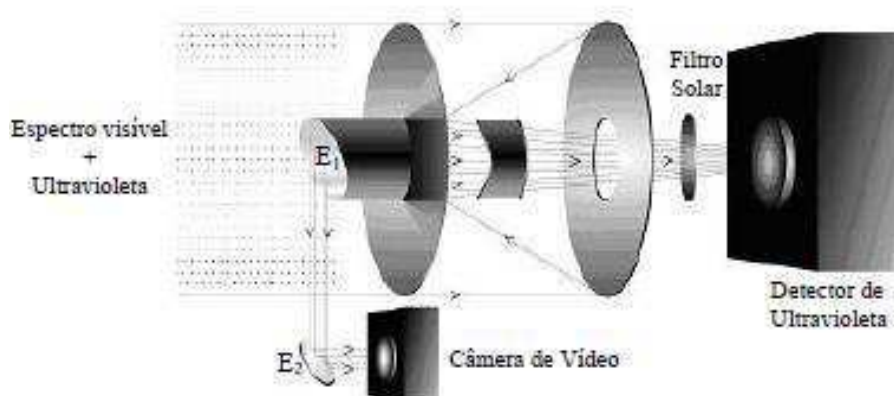
O canal de luz visível existe para facilitar a operação do equipamento, tendo em vista que as imagens provenientes do canal de luz ultravioleta são sobrepostas a esse canal. Possibilita-se, assim, determinar o ponto de emissão da radiação UV.

Na Figura 13 é ilustrado um diagrama esquemático com o princípio de funcionamento do detector de corona. A imagem ultravioleta passa por um filtro



de radiação solar de faixa estreita e vai diretamente para o detector de ultravioleta, enquanto a imagem visível é refletida pelos espelhos E1 e E2 e, finalmente, captada pela câmera de vídeo convencional.

Figura 13 - Princípio de funcionamento do equipamento DRUV.



Fonte: LINDNER, 2004.

Além do filtro, o DRUV ainda possui um sistema de contagem de ocorrência de descargas, capaz de quantificar sua intensidade em uma região em número de pontos de descarga por minuto. Na Figura 14 é possível observar a ocorrência e a contagem das descargas corona durante um ensaio com eletrodo ponta-plano.

Figura 14 - Ocorrência do efeito corona em um eletrodo ponta-plano.



Fonte: BARROS, 2011.

## 2.5 Influência da umidade no processo de degradação de isoladores poliméricos

Os isoladores poliméricos das linhas de transmissão, quando em operação, estão sujeitos a esforços elétricos, mecânicos e ambientais contínuos que degradam sua isolação. Dentre os esforços ambientais, destaca-se a influência da umidade neste processo.

A umidade do ar é o termo usado para descrever a quantidade de vapor d'água contido na atmosfera. O vapor d'água é medido em índices, tais como a umidade absoluta, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho e pressão vaporífica. A grandeza mais conhecida é a umidade relativa, devido à facilidade de obtenção dos dados, além de indicar o grau de saturação do ar (AYOADE, 1996). A umidade relativa do ar é definida, então, pela razão entre a quantidade de água presente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (AHRENS, 1991).

Os isoladores elétricos do sistema de transmissão de energia estão susceptíveis às variações da umidade relativa do ar. No caso de absorção da umidade pelo isolamento, as propriedades dielétricas do isolador podem ser alteradas, tais como a redução da condutividade térmica, resistência à compressão, resistência à flexão e a resistência à tração. Além disso, a umidade tem influência direta no aumento da corrente superficial, na formação de bandas secas, na formação de ácidos e indiretamente na redução da rigidez dielétrica do ar (interface como isolador-ar) e, desse modo, elevados valores de umidade contribuem para a redução da tensão de disrupção dos isoladores.

A condição atmosférica de elevada umidade também intensifica a geração de descargas corona e, conseqüentemente, contribui para a aceleração do efeito da degradação, em isoladores, pela radiação UV. Caso a umidade penetre no interior do isolador, pode-se promover a formação de ácido nítrico ( $\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HNO}_3$ ), resultante da combinação entre o ozônio, o nitrogênio presente no ar e as gotículas de água. O ácido nítrico facilita a ocorrência da fratura frágil, efeito já apresentado neste trabalho. Entretanto, caso a concentração de ácido nítrico não seja tão elevada, não causará a fratura frágil, porém a umidade irá se propagar pelo núcleo, provocando falhas elétricas.

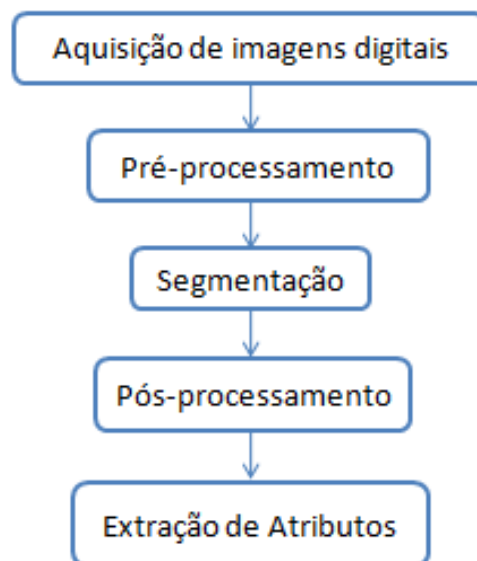
(BARROS, 2011), utilizando-se de experimentos implementados em laboratório, constatou que a umidade é um fator determinante na inspeção dos isoladores defeituosos utilizando a câmera UV. Portanto, há necessidade de medição dos valores de umidade durante os ensaios e eles devem ser levados em consideração na análise dos resultados.

## 2.6 Processamento das imagens

Denomina-se por processamento digital de imagens o conjunto de técnicas aplicadas na manipulação de imagens digitais no sentido de facilitar a extração de informações. Trata-se de uma subárea de grande relevância do processamento de sinais. Já a imagem a ser processada pode ser definida como uma função bidimensional  $f(x,y)$ , em que  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais e a amplitude de  $f$  para cada par de coordenadas é chamada de intensidade da imagem naquele ponto.

O sistema de processamento é subdividido em várias etapas. Um diagrama esquemático das etapas do processamento de imagens é ilustrado na Figura 15. E, na sequência, alguns conceitos relevantes ao processamento de imagens serão apresentados.

Figura 15 – Diagrama esquemático das etapas do processamento de imagens.



Fonte: Própria autora.

### 2.6.1 Pixel

Cada ponto na função bidimensional que representa a imagem digital é denominado por elemento de imagem ou pixel. A forma mais comum para o pixel é a forma retangular ou quadrada. O pixel é também um elemento de dimensões finitas na representação de uma imagem digital.

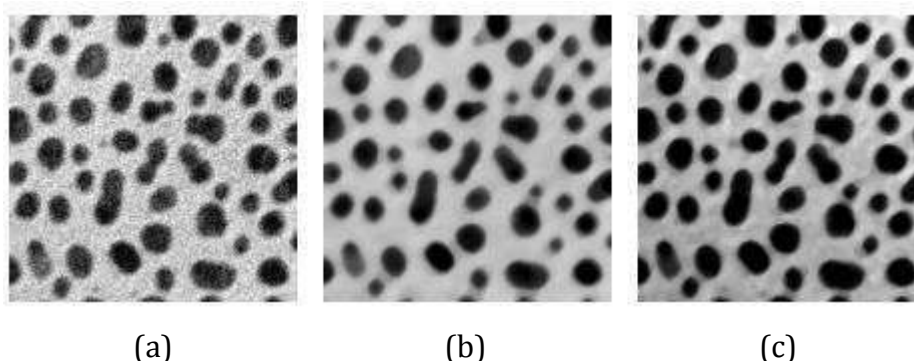
## 2.6.2 Aquisição de Imagens Digitais

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 luz ultravioleta. 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.

## 2.6.3 Pré-processamento

Após a aquisição das imagens, as técnicas de pré-processamento são aplicadas com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens. Elas envolvem duas categorias principais: métodos que operam no domínio espacial e métodos que operam no domínio da frequência. Técnicas de processamento no domínio espacial são baseadas em filtros que manipulam o plano da imagem, enquanto que as técnicas de processamento no domínio da frequência se baseiam em filtros que agem sobre o espectro da imagem (ALBUQUERQUE, 2003). Um pré-processamento é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de pré-processamento: (a) imagem original corrompida com ruído gaussiano, (b) imagem após a aplicação de um filtro mediana para redução do ruído e (c) imagem final, após a aplicação de um filtro passa-altas para realce dos contornos.



Fonte: ALBUQUERQUE, 2003.

## 2.6.4 Segmentação

A segmentação consiste na separação da imagem em partes que a constituem e que a diferenciam entre si, ou seja, em grupos de pixel que fornecem

alguma informação (denominado de objeto) e em grupos de pixel que podem ser desprezados. Os grupos de pixel desprezados não são utilizados no processamento e são denominados de fundo. Assim, a segmentação determina o eventual sucesso da análise da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2001).

Apesar de simples de ser descrita, a segmentação pode ser considerada a etapa mais difícil de ser implementada (ÔGE e HUGO, 1999). É nesta etapa que são definidas as regiões de interesse para processamento e análise posteriores. Como consequência deste fato, quaisquer erros 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 (ALBUQUERQUE, 2003).

Além disso, a segmentação é um processo adaptativo, sendo necessário sempre se adequar às características particulares de cada tipo de imagem a ser processada e, por isso, não se tem um modelo formal de segmentação de uma imagem. A aplicação do processo de segmentação pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Aplicação da segmentação: (a) Imagem original em níveis de cinza, (b) Imagem segmentada através de uma binarização e (c) Imagem segmentada por detecção de bordas.



Fonte: ALBUQUERQUE, 2003.

### 2.6.5 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 pixels da imagem. A morfologia matemática é uma das grandes áreas do processamento digital de imagens. Fundamentalmente, têm-se duas linhas de descrição de seus métodos, os operadores booleanos de conjuntos (união, interseção, complemento, etc.) e a noção de forma básica chamada de elemento estruturante.

### 2.6.6 Extração de Atributos

A extração de atributos é considerada a última etapa do processamento das imagens. Consiste na extração das informações úteis da imagem já processada.

## 2.7 Lógica *Fuzzy*

O conhecimento humano é, muitas vezes, incerto, impreciso ou incompleto. No processo de inspeção de isoladores em linhas de transmissão, por exemplo, a inspeção realizada tem um grau de subjetividade, que inclui o uso da intuição dos inspetores, o que virtualmente é impossível de ser expresso através de um formalismo convencional. O uso da lógica tradicional para modelar matematicamente o resultado da inspeção se apresenta complexo, já que só seriam aceitos dois valores: dano presente ou ausente (verdadeiro ou falso). Quando, na prática, espera-se que um inspetor seja capaz de avaliar as condições de operação do equipamento, decidindo pela necessidade ou não de sua troca ou pela realização de algum tipo de manutenção.

Dada a deficiência que a lógica clássica possui para tratar problemas mais complexos, foi desenvolvida, em 1965, uma variação da teoria dos conjuntos e da lógica booleana tradicional. Tratava-se da teoria dos conjuntos *Fuzzy*, introduzida pelo matemático iraniano Lofti Asker Zadeh, a partir da publicação do artigo intitulado de "*Fuzzy Sets*" (ZADEH, 1965).

A lógica *Fuzzy*, também conhecida como lógica difusa ou nebulosa, tem como uma de suas principais características a possível associação parcial de um elemento a um conjunto (BARBOSA, 2005). A lógica permite uma aproximação entre a máquina e o raciocínio humano, de modo a se propor soluções mais realistas a problemas que antes só o cérebro humano era capaz de interpretar e resolver. Segundo (MOREÍ, 2004), a lógica *Fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Permite-se converter a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores.

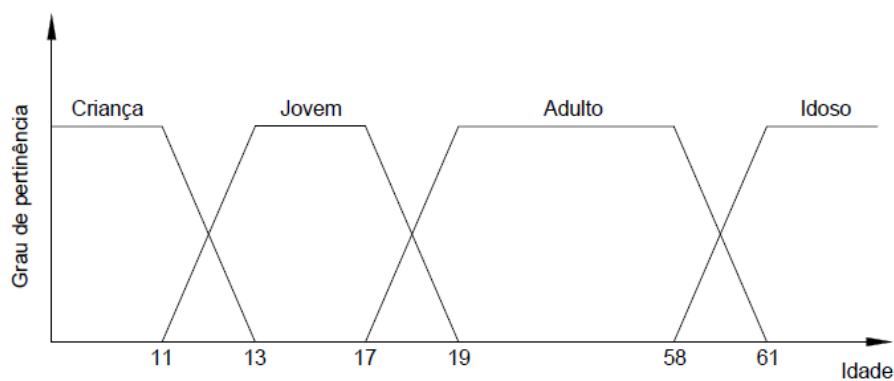
Assim, o uso da lógica *Fuzzy* para classificação do estado de degradação de isoladores poliméricos pode dar ao processo um enfoque prático, tornando possível a inclusão da experiência de especialistas e possibilitando estratégias de tomada de decisão.

A seguir serão apresentados alguns conceitos básicos da lógica *Fuzzy*.

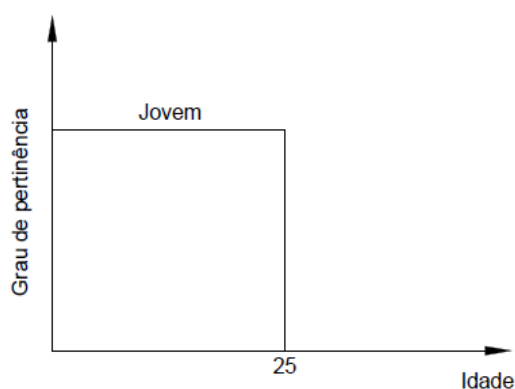
### 2.7.1 Conjuntos *Fuzzy*

Os conjuntos *Fuzzy* foram introduzidos devido ao fato de os conjuntos clássicos apresentarem limitações para lidar com problemas onde a transição de uma classe para outra deve acontecer de forma suave. Assim, os conjuntos *Fuzzy* não possuem fronteiras bem definidas. Um exemplo simples é a classificação de uma pessoa quanto a sua idade. Na Figura 18 pode ser observado o uso das duas lógicas, *Fuzzy* e booleana, para classificação da idade de um indivíduo.

Figura 18 - Classificação da idade de um indivíduo através da (a) lógica *Fuzzy* e da (b) lógica booleana.



(a)



(b)

Fonte: Própria autora.

Observa-se que para a lógica *Fuzzy* um indivíduo pode ser criança, jovem, adulto ou idoso, ou seja, a transição ocorre de modo suave. Enquanto que na lógica

tradicional o indivíduo é jovem ou não jovem, com a transição ocorrendo de forma abrupta, descontínua.

A definição matemática de um conjunto *Fuzzy* é dada pela equação 1:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); \quad x \in X \quad \mu_A(x) \in [0,1]\}. \quad (1)$$

Ou seja, um conjunto *Fuzzy*  $A$  em um conjunto universo  $U$  é um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico  $x$  e seu grau de pertinência  $\mu_A(x)$ , com o grau de pertinência variando no intervalo  $[0, 1]$ , conforme segue:

$\mu_A(x) = 1$ , se  $x$  pertence totalmente ao conjunto  $A$ ,

$0 < \mu_A(x) < 1$ , se  $x$  pertence parcialmente ao conjunto  $A$ ,

$\mu_A(x) = 0$ , se  $x$  não pertence ao conjunto  $A$ .

### 2.7.2 Função de pertinência

Também chamada de função característica, a função de pertinência associa cada elemento  $x$  pertencente a  $U$  um número real  $\mu_A(x)$  no intervalo  $[0, 1]$ . Este valor representa o grau de possibilidade de que o elemento  $x$  venha a pertencer ao conjunto  $A$ . Em alguns problemas matemáticos não se tem dificuldade em classificar um elemento como pertencente ou não a um conjunto. Porém, em outros a relação de pertinência não está bem definida.

A teoria clássica dos conjuntos está baseada na função característica clássica, dada pela equação 2:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se e somente se } x \in A \\ 0, & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}, \quad (2)$$

em que  $U$  é o conjunto universo,  $A$  é um subconjunto de  $U$  e  $x$  é um elemento de  $U$ , ou seja, a função característica é um mapeamento do conjunto universo no conjunto  $[0, 1]$ . Essa função característica discrimina entre todos os elementos de  $U$  aqueles que, segundo algum critério, pertencem ao subconjunto  $A$ , dividindo o conjunto universo em duas partes com fronteiras bem definidas.



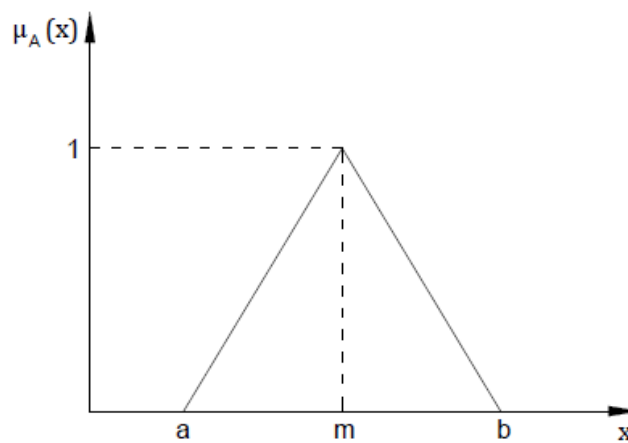
Desse modo, a partir da generalização da teoria dos conjuntos clássicos é possível obter a definição, as propriedades e as operações da lógica *Fuzzy*. Para tanto, generaliza-se a função característica da lógica clássica para o intervalo  $[0, 1]$ , ou seja,  $\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1]$ . Assim, os valores de pertinência são contínuos e não apenas pertence ou não pertence. O elemento  $x$  pertencerá ao subconjunto  $A$  com um grau de pertinência que é um valor no intervalo  $[0, 1]$ .

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, no entanto, as funções triangulares e trapezoidais são as mais comuns devido a sua eficiência computacional (ZIMMERMANN, 2001) e serão apresentadas a seguir.

### 2.7.2.1 Função triangular

De acordo com (AMENDOLA *et al.*, 2004), as funções de pertinência triangulares são caracterizadas por  $a$ ,  $b$  e  $m$ , com  $a$  e  $b$  determinando o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valor 0, e  $m$  sendo o ponto onde a função de pertinência assume valor máximo. Na Figura 19 é apresentado o gráfico da função de pertinência triangular com os pontos  $a$ ,  $b$  e  $m$ .

Figura 19 - Função de pertinência triangular.



Fonte: AMENDOLA *et al.*, 2004.

A função de pertinência triangular é definida pela equação 3.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases}, \quad (3)$$

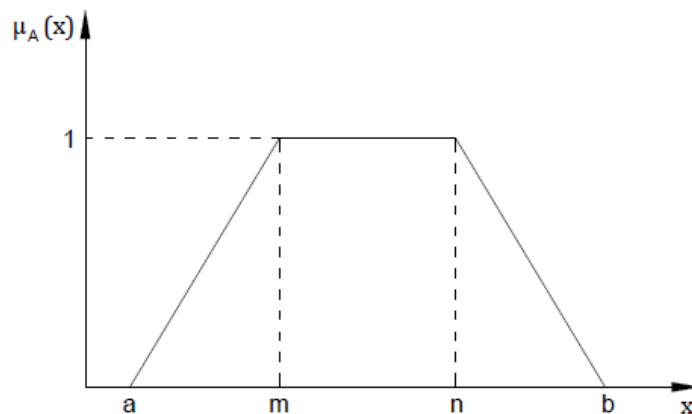
em que  $m$  é o valor de  $x$  para o máximo grau de pertinência, geralmente  $\mu_A = 1$ ;  $a$  e  $b$  são os limites do intervalo, respectivamente inferior e superior.

### 2.7.2.2 Função trapezoidal

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de  $a$ ,  $b$ ,  $m$  e  $n$ , em que  $a$  e  $b$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de "0", e  $m$  e  $n$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima.

Na Figura 20 é apresentado o gráfico da função de pertinência trapezoidal com os pontos  $a$ ,  $m$ ,  $n$  e  $b$ .

Figura 20 - Função de pertinência trapezoidal.



Fonte: AMENDOLA *et al.*, 2004.

A função de pertinência trapezoidal é definida pela equação 4.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases}, \quad (4)$$

em que o grau de pertinência é nulo para valores de  $x$  menor que  $a$ ; linearmente crescente até o valor máximo, geralmente  $\mu = 1$ , para  $x = m$ ; constante nesse valor para  $x$  entre  $m$  e  $n$ ; linear decrescente até "0" em  $x = b$  e nulo para  $x$  maior que  $b$ .

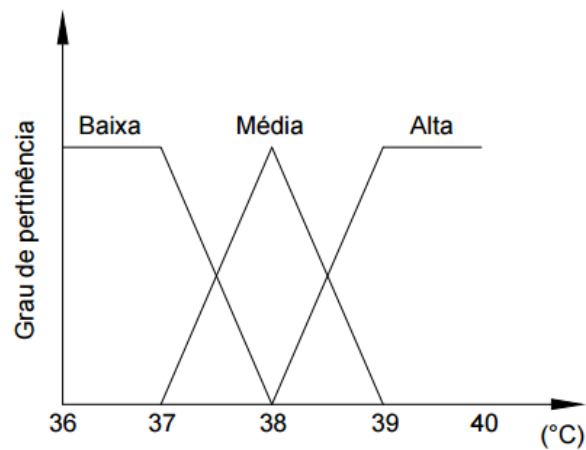
### 2.7.3 Variáveis linguísticas

Define-se uma variável linguística como uma entidade utilizada para representar de modo impreciso, através da linguagem cotidiana, um conceito ou uma variável de um dado problema (REZENDE, 2005).

Assim, as variáveis utilizadas na lógica *Fuzzy* são chamadas de linguísticas por não terem valores precisos, podendo ser definidas como na linguagem, representando um espectro de valores. Por exemplo, quando é dito que a temperatura está normal, isso não significa um valor exato, mas um intervalo. Desta forma, as variáveis *Fuzzy* são definidas através de conjuntos para representar os intervalos.

Na Figura 21 é ilustrado um exemplo de variável linguística. O nome  $n$  da variável é febre. Os termos linguísticos  $t \rightarrow T$  da febre são: baixa, média e alta. O domínio  $X$  da variável é o intervalo  $[36, 40]$ . Cada termo linguístico tem a ele associado um conjunto *Fuzzy*  $m(t)$  que o caracteriza. Note que, na formulação clássica, os termos linguísticos atribuídos para febre são: presente e ausente.

Figura 21 - Exemplo de variável linguística.

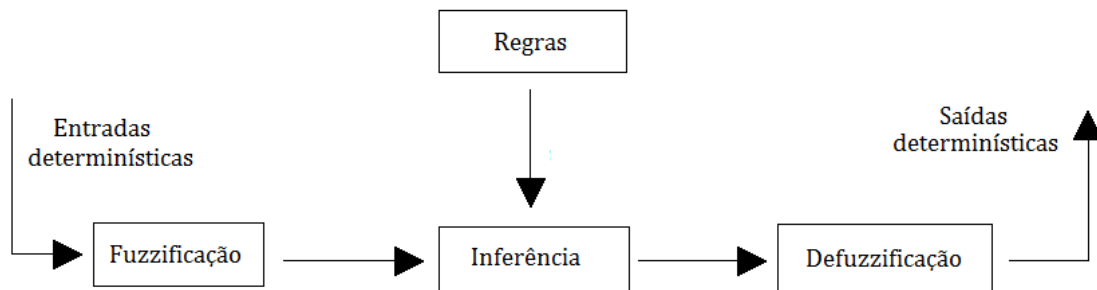


Fonte: Própria autora.

#### 2.7.4 Sistema lógico *Fuzzy*

A estrutura de todo o sistema lógico *Fuzzy* está baseada em três operações: fuzzificação, inferência e defuzzificação. Um sistema de inferência *Fuzzy* é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Sistema lógico *Fuzzy*.



Fonte: Adaptado de COX, 1994.

As operações que constituem o sistema lógico *Fuzzy* serão definidas a seguir.

##### 2.7.4.1 Fuzzificação

A fuzzificação é a primeira etapa do sistema lógico *Fuzzy*. Segundo (AMENDOLA *et al.*, 2004), é nesta etapa que a informação das variáveis de entrada é modelada matematicamente por meio de conjuntos *Fuzzy*, mostrando a grande importância do especialista, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos lingüísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo lingüístico, deve ser associado um conjunto *Fuzzy* por uma função de pertinência.

Pelo exposto, para se construir um sistema lógico *Fuzzy* se deve ter conhecimento sobre o problema. E, neste trabalho, o conhecimento envolvido será adquirido através de outras fontes de conhecimento e da experiência obtida na realização dos ensaios.

#### **2.7.4.2 Inferência**

Uma vez feita a adequação dos valores iniciais em variáveis lingüísticas, segue-se com a fase denominada por inferência *Fuzzy*, cuja finalidade é relacionar as possíveis variáveis entre si, através de regras pré-estabelecidas, cumprindo assim com os objetivos do algoritmo. Em outras palavras, a inferência transforma os conjuntos nebulosos de entrada em um conjunto nebuloso de saída, através da relação definida pela base de regras e a partir de um determinado mecanismo em particular.

A representação da base de regras pode variar de acordo com o modelo utilizado. Existem diferentes métodos de inferência *Fuzzy* com diferentes propriedades, os dois tipos mais comuns são: modelo de Mamdani e o modelo de Takagi-Sugeno-Kang.

O modelo de Takagi-Sugeno-Kang é formado por regras lógicas que têm uma combinação de modelos difusos e exatos (BARBOSA, 2005). Já o modelo de Mamdani é baseado em proposições lingüísticas Se-Então com vagos predicados, sendo o método mais utilizado para criar a base de regras. Este método combina os graus de pertinência referentes a cada um dos valores de entrada, através do operador mínimo e agrega as regras através do operador máximo (AMENDOLA *et al.*, 2004).

#### **2.7.4.3 Defuzzificação**

A última etapa do sistema lógico difuso é chamada de defuzzificação. De modo a se determinar a região *Fuzzy* gerada por todas as regras ativadas, deve-se aplicar um método de defuzzificação no conjunto resultante da agregação de todos os conjuntos *Fuzzy* de saída. De acordo com (KRUEL *et al.*, 2008), o sistema ao receber uma entrada transforma-a em uma entrada *Fuzzy* que, por sua vez, é submetida às regras do sistema de inferência e que devolve uma saída *Fuzzy* para este sistema.

Na defuzzificação, o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras *Fuzzy* será traduzido em um valor discreto, com o objetivo de obter um

único valor numérico discreto que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos da variável linguística de saída. O ser humano normalmente trabalha com características incertas, mas as máquinas, equipamentos e controles industriais precisam de um valor real que represente o valor de referência necessário, por isso a necessidade do processo de defuzzificação (SIMÕES & SHAW, 1999).

Na literatura existem alguns métodos de defuzzificação. A escolha de cada método pode determinar a maior ou menor proximidade do modelo proposto com o que ele pretende representar. Os métodos mais comuns são o da média dos máximos e o do centróide, eles determinam o cálculo dos resultados esperados e, portanto, sua adequação a um modelo representado deve ser testada criteriosamente. Neste trabalho pretende-se utilizar o método do centróide, o qual é apresentado a seguir.

O método do centróide, dado pela equação 5, calcula para um conjunto *Fuzzy* de saída, a abscissa (no universo de discurso definido para a variável de saída em questão) do ponto do centro de massa correspondente.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(u_i)}, \quad (5)$$

em que  $\mu_{OUT}(u_i)$  é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado de inferência *Fuzzy*, e  $u_i$  é a posição do centróide da função de pertinência individual.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo uma revisão bibliográfica é realizada, visando apresentar os trabalhos mais relevantes na área de isoladores poliméricos, medição de descargas corona e a influência da umidade nas medições, juntamente com suas contribuições, do período de 2005 a 2015.

Considerada a importância que os isoladores possuem para o sistema elétrico, a avaliação de técnicas de inspeção na detecção de defeitos ou iminência de falhas se mostra necessária. Assim, Neri (2005), em sua dissertação, avaliou as técnicas de medição de descargas parciais, da radiação UV e da radiação infravermelha. Para tanto, submeteu cinco isoladores com defeitos implantados e um isolador sem defeito a um processo de envelhecimento artificial. A análise dos resultados evidenciou que as técnicas de inspeção aplicadas são promissoras.

Além disso, o Neri (2005) verificou, a partir dos ensaios, a possibilidade de classificação dos defeitos apresentados em baixa, média ou alta gravidade. 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 gravidade. Já 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 gravidade.

Neri (2005) concluiu, ainda, que os defeitos internos não podem ser relacionados com a atividade corona, como era de se esperar, pois as descargas corona ocorrem em meio gasoso, com a rigidez dielétrica do ar sendo excedida. Desse modo, percebeu-se que a presença de descargas corona ocorre quando existem defeitos externos ao isolador.

Uma das causas de falhas dos isoladores poliméricos é o trilhamento de núcleo. Assim, Ferreira (2007) propôs, em sua dissertação, uma técnica de criação de indícios de trilhamento de núcleo em laboratório que mostrou certa eficiência na metodologia. Realizou, ainda, observações dos indicadores físicos da origem e propagação do trilhamento de núcleo. Da mesma forma que Neri (2005), também fez uso da câmera UV para inspeção das descargas corona nas proximidades do isolador.

Além disso, várias configurações de anéis de equalização foram avaliadas por Ferreira (2007), de modo a avaliar a influência deles nos ensaios. Os resultados

demonstraram que a não utilização de anéis de equalização é totalmente desaconselhada e que o anel recomendado pelo fabricante diminuiu sensivelmente os níveis de corona, mas não os gradientes térmicos. Além disso, constatou que a forma de instalação do anel não influencia fortemente os padrões de temperatura e descargas corona. Assim, o autor projetou, construiu e avaliou um anel otimizado para ser aplicado em isoladores poliméricos de 230 kV, o qual apresentou melhorias no desempenho dos isoladores, apresentando-se como alternativa viável e funcional.

Já Gianelli (2008), estudou o efeito corona em isoladores poliméricos submetidos à poluição salínica. Para tanto, utilizou isoladores retirados de linhas de transmissão com histórico de falhas e altos índices de desligamento, coletando amostras de suas saias para as superfícies poluídas e superfícies que passaram por limpeza superficial com água destilada. Este procedimento foi adotado pelo fato de que, embora as superfícies dos isoladores sejam hidrofóbicas, os sais que nela se depositam não o são, podendo promover o surgimento de descargas superficiais. Os resultados obtidos se apresentaram coerentes, pois os ângulos de contato tendem a aumentar com a limpeza da superfície da amostra. Entretanto, foi constatado que em regiões próximas ao terminal fase o ângulo de contato era menor. Isto ocorre por causa dos elevados campos eletromagnéticos presentes e a localização da região ser pouco exposta às chuvas.

Além disso, Gianelli (2008) apresentou uma nova metodologia de inspeção de isoladores de 69 kV utilizando a câmera UV e constatou que o efeito corona se faz mais presente em temperaturas não superiores a 29°C e com umidade relativa do ar superior a 75%.

Uma das desvantagens apresentadas pelos isoladores poliméricos é o desconhecimento sobre seu tempo de vida útil. E, de modo a contribuir para a avaliação do estado de degradação de isoladores, Germano (2010) realizou ensaios de envelhecimento acelerado em diversos modelos de isoladores, espaçadores e laços plásticos de amarração de linhas de distribuição de energia. O objetivo era compreender quais os fatores responsáveis pela degradação dos isolamentos à base de polímeros. Para tanto, utilizou cinco técnicas de diagnóstico para avaliação da integridade das amostras: corrente de fuga, descargas parciais, tensão suportável a 60 Hz e tensão disruptiva, à seco e sob névoa salina.



Os resultados dos ensaios evidenciaram que a ocorrência de descargas nas proximidades do condutor provoca degradação acelerada tanto do condutor quanto do equipamento, podendo ocasionar o rompimento do condutor fase ou a quebra de isoladores de pino e espaçadores. Além disso, constatou que para os isolamentos estudados, a radiação UV é mais danosa do que a imersão em água. Constatou, ainda, que ensaios de descargas parciais evidenciam maior degradação das amostras submetidas ao envelhecimento por tensão elétrica e névoa salínica.

Barros (2011) avaliou técnicas de inspeção utilizando medições de descargas parciais, em laboratório, e de radiação UV, emitidas pelas descargas corona. Para tanto, realizou ensaios com três isoladores de classe 72,5 kV e, dentre eles, um novo e sem defeito, para servir como referência. Aos isoladores foram aplicados diferentes níveis de poluição. Além disso, realizou ensaios com o objetivo de verificar a sensibilidade da câmera UV quando se varia o ganho UV e o efeito da distância da câmera ao objeto de teste. Os resultados evidenciam uma região linear entre 120 e 160. Nesta região, comprovou-se que o ganho UV é o mais independente da contagem de pontos/min. Já para a distância de observação, foi constatado que se trata de um fator decisivo com relação ao nível de descargas corona captadas.

Para eliminação dos ruídos ambientes existentes durante as medições com a câmera UV, o autor propôs uma técnica de processamento de imagens. Assim, a aplicação da técnica possibilita que as inspeções de corona em campo sejam realizadas de modo mais eficiente. Já quanto a influência da umidade nos resultados obtidos, os ensaios comprovaram que a umidade é um fator determinante na inspeção de isoladores defeituosos com câmera UV. Grandes variações de umidade afetaram os resultados para alguns casos de poluição, constatando que sua variação pode induzir a erros de análise de defeitos de isoladores.

No Quadro 2 é apresentado um quadro sinótico com os principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas em estudo.

Quadro 2 - Quadro sinótico com os principais trabalhos desenvolvidos sobre os temas em estudo.

Ano	Pesquisadores	Contribuição	UV <sup>α</sup>	PI <sup>β</sup>	LF <sup>γ</sup>
2005	Neri	Avaliou técnicas de inspeção para detectar isoladores defeituosos ou na iminência de falhar. Considerou a inspeção com detector de corona como uma promissora técnica na detecção de isoladores defeituosos.	•		
2007	Ferreira	Estudou o mecanismo do processo de trilhamento de núcleo e constatou que a presença de umidade na interface núcleo-revestimento polimérico é um fator de risco, podendo promover o início do processo.	•		
2008	Gianelli	Avaliou o emprego da tecnologia de câmeras UV para inspeção de isoladores poliméricos e considerou o período de umidade relativa do ar superior a 75% como o mais adequado para medição de descargas corona.	•		
2010	Germano	Realizou ensaios de envelhecimento acelerado em diversos modelos de isoladores. Constatou que, para os isolamentos estudados, a radiação UV é mais danosa do que a imersão em água.	•		
2011	Barros	Avaliou técnicas de inspeção em isoladores poliméricos de 69 kV. Constatou a brusca diminuição das descargas corona com a queda da umidade, mesmo para isoladores com elevado nível de poluição.	•	•	
2015	Guedes <i>et al.</i>	Realizou ensaios para medição de descargas corona em isoladores poliméricos de 230 kV e propôs uma técnica para auxiliar na classificação do estado de degradação dos isoladores.	•	•	•
<p><sup>α</sup>Emprego de câmera ultravioleta.</p> <p><sup>β</sup>Emprego de processamento de imagens.</p> <p><sup>γ</sup>Implementação de sistema lógico <i>Fuzzy</i>.</p>					

O próximo capítulo será dedicado à descrição dos materiais aplicados e métodos utilizados para medições das descargas corona em isoladores poliméricos de 230 kV.

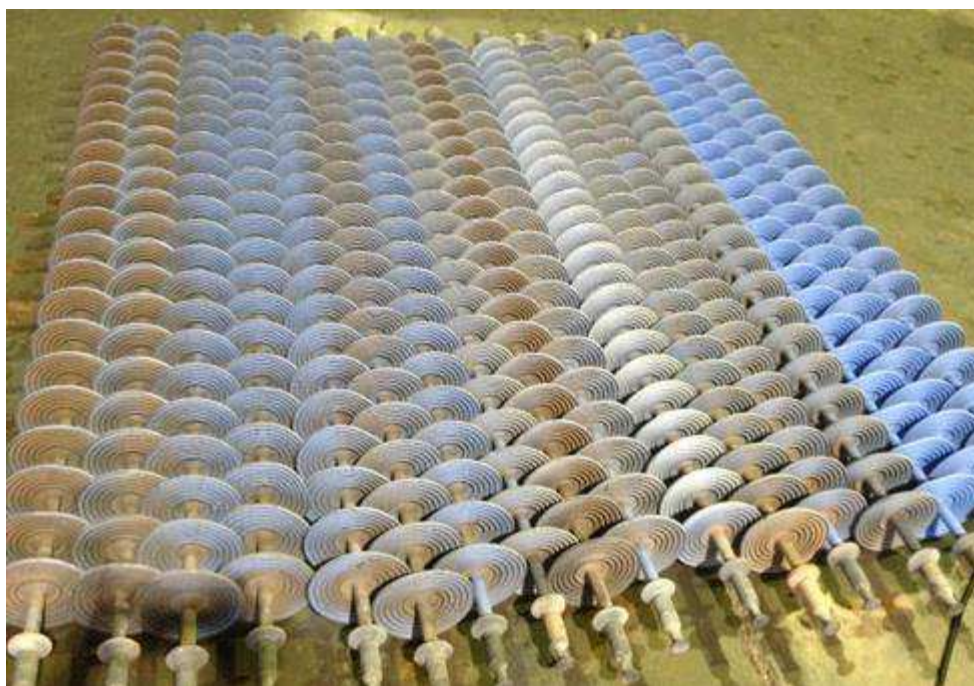
## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos o material aplicado e os métodos empregados nas medições, em laboratório, das descargas corona em isoladores poliméricos. O objetivo é analisar a ocorrência das descargas corona e suas implicações, a fim de classificar os isoladores ensaiados quanto a seus estados de degradação.

### 4.1 Material

Os objetos de teste a serem utilizados nos experimentos são isoladores poliméricos com revestimento de borracha de silicone para linhas de transmissão de 230 kV. Os isoladores foram fornecidos gentilmente pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e apresentam diferentes estados de degradação. Os isoladores recebidos podem ser vistos na Figura 23.

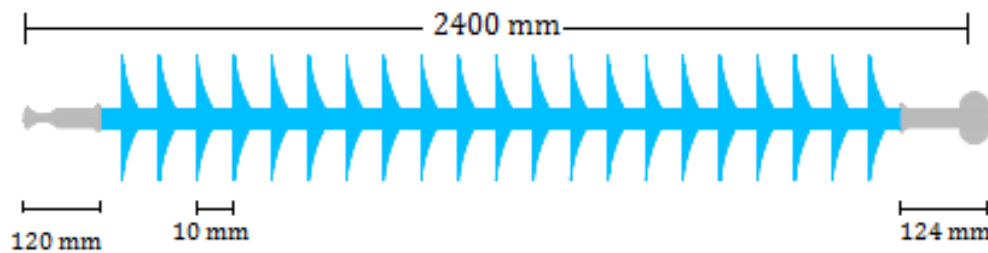
Figura 23 - Fotografia dos isoladores poliméricos fornecidos pela CHESF.



Fonte: Própria autora.

Os isoladores possuem as mesmas configurações: pesam 8,8 kg, medem 2,4 m de comprimento e possuem 21 aletas. Além disso, podem suportar uma carga mecânica de 222 kN e os seus terminais são do tipo concha/bola. Na Figura 24 estão apresentadas suas características dimensionais.

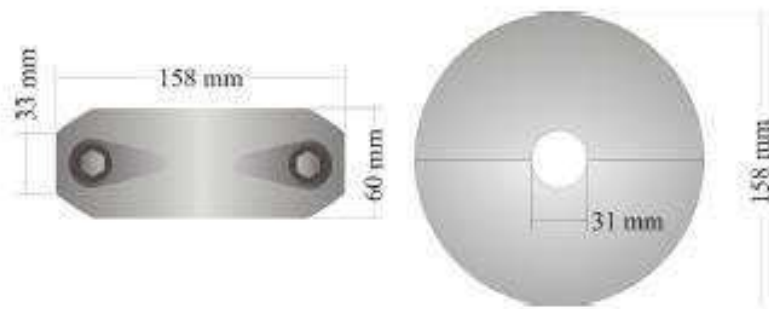
Figura 24 - Representação gráfica do isolador de 230 kV a ser utilizado nos ensaios e suas dimensões.



Fonte: Própria autora.

Além disso, cada um dos isoladores fornecidos pela CHESF possui anel equalizador com 158 mm de diâmetro. Na Figura 25 é ilustrada uma representação do anel equalizador a ser utilizado e suas dimensões.

Figura 25 - Representação do anel equalizador a ser utilizado nos ensaios.



Fonte: FERREIRA, 2007.

## 4.2 Métodos

Com o objetivo de propor uma metodologia que permita classificar o grau de degradação dos isoladores poliméricos, através da medição do nível de corona produzido pelos isoladores quando da aplicação de esforços elétricos, a pesquisa foi dividida nas seguintes etapas: classificação dos isoladores quanto ao seu estado de degradação via inspeção visual, montagem experimental, ensaios, processamento das imagens, influência da umidade e do anel equalizador na medição das descargas corona e implementação de um sistema lógico *Fuzzy*.

### 4.2.1 Classificação dos isoladores via inspeção visual

Os isoladores poliméricos fornecidos pela CHESF serão submetidos, inicialmente, a um processo de classificação quanto aos seus níveis de degradação.

Para tanto, os isoladores serão enumerados e uma inspeção visual minuciosa será realizada em cada equipamento separadamente, de modo a identificar e registrar os danos existentes.

Durante a inspeção serão avaliados os aspectos físicos do isolador, tais como: exposição do núcleo, nível de poluição, estado de degradação das ferragens, estado de degradação das aletas, nível de erosão e estado de degradação do selo. A estes aspectos serão atribuídos valores em uma escala de 1 a 5, na qual o valor 1 será atribuído quando o aspecto físico avaliado for considerado praticamente como novo e 5 quando o aspecto físico for crítico.

Além disso, a cada aspecto físico avaliado será atribuído um peso correspondente a sua importância para a falha do isolador, pois cada um dos aspectos possui diferentes contribuições. Assim, utilizar-se-á, novamente, um grau de degradação de 1 a 5, na qual o valor 1 será atribuído ao item avaliado com menor importância para a falha do isolador polimérico e 5 ao item com maior importância. Os pesos atribuídos podem ser observados no Quadro 3.

Quadro 3 – Pesos atribuídos aos aspectos físicos avaliados nos isoladores poliméricos.

Nível de Poluição	Estado de degradação das ferragens	Estado de degradação das aletas	Exposição do núcleo	Nível de erosão	Estado de degradação do selo
3	1	2	5	4	4

Fonte: Própria autora.

Finalmente, para a classificação geral do estado de degradação dos isoladores, será calculada uma média ponderada com o valor atribuído a cada aspecto e seu respectivo peso. A essa média será atribuído o nome de Índice de Degradação dos Isoladores (IDI), sendo calculada conforme a equação 6.

$$IDI_n = 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^6 P_i N_i}{\sum_{i=1}^6 P_i}, \quad (6)$$

em que  $n$  é o número do isolador inspecionado,  $i$  é o índice do aspecto físico do isolador,  $P_i$  é o peso do aspecto  $i$  e  $N_i$  é o valor associado ao aspecto  $i$ .

Os isoladores serão, então, classificados nos três níveis ou estados de degradação a seguir:

- Apresentando condições operacionais críticas para o sistema;
- Apresentando condições operacionais de desgaste médio para o sistema;
- Isoladores em bom estado.

#### 4.2.2 Montagem experimental

Os ensaios serão realizados nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Durante os ensaios, será utilizado um transformador de alta tensão de 600 kV / 600 kVA. O transformador será responsável pela aplicação dos esforços elétricos necessários e está ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - Fotografia do transformador a ser utilizado nos ensaios.



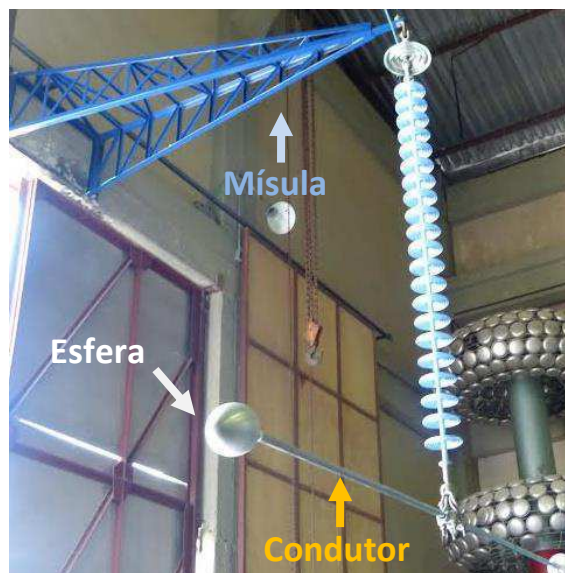
Fonte: Própria autora.

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 metros de altura do chão, respeitando as limitações impostas pelo ambiente dos ensaios.

Além disso, a linha de transmissão foi simulada utilizando um condutor circular metálico com 4 cm de diâmetro e com 3 metros de comprimento. Em suas

extremidades, foram fixadas esferas ocas, com o intuito de suavizar o campo elétrico na região, pois o elevado campo elétrico poderia incorrer no aparecimento de descargas corona que causariam interferências nas medições de corona nos isoladores. Na Figura 27 são mostradas a mísula, o condutor e as esferas.

Figura 27 - Fotografia da montagem realizada para simular as condições de campo.



Fonte: Própria autora.

#### 4.2.3 Método para medição de descargas corona utilizando o DayCor

A medição das descargas corona nos isoladores poliméricos será realizada utilizando uma câmera de detecção de radiação UV, o DayCor II® da *Ofil*.

Para realizar as medições das descargas corona nos isoladores de forma mais minuciosa será proposta neste trabalho a realização de três inspeções por isolador, utilizando a câmera de detecção UV, distanciadas de 120° espaciais cada (considerando-se a posição do isolador como centro de um círculo). O objetivo é minimizar as chances de que alguma região de ocorrência de descargas fique oculta devido ao posicionamento da câmera DRUV.

De modo a possibilitar as medições nos três pontos distintos, foram desenvolvidas três plataformas móveis de mesmas dimensões para servirem de suporte para utilização da câmera UV durante as medições, permitindo que as medições sejam feitas à mesma altura e possibilitando a variação das distâncias de observação. Na Figura 28 uma das plataformas a ser utilizada nos ensaios pode ser observada.

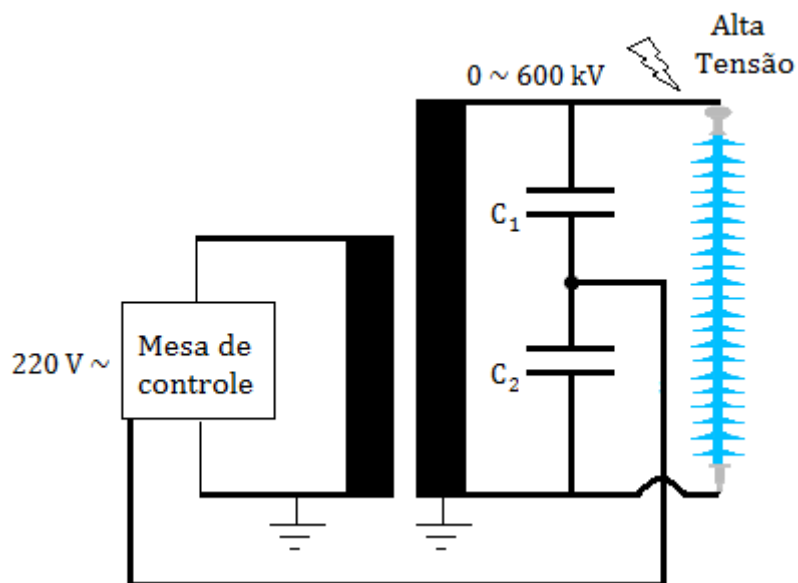
Figura 28 - Plataforma de suporte para utilização do DayCor.



Fonte: Própria autora.

O diagrama esquemático da montagem experimental para medição das descargas corona nos isoladores poliméricos pode ser visto na Figura 29. A mesa de controle, alimentada com tensão de 220 V, é responsável por controlar os níveis de tensão do circuito com o auxílio do divisor capacitivo, representado pelos capacitores  $C_1$  e  $C_2$ .

Figura 29 - Diagrama esquemático da montagem do experimento.



Fonte: Própria autora.



Na Figura 30 é apresentado o arranjo para medição montado no laboratório.

Figura 30 - Fotografia do arranjo para medição da radiação UV.

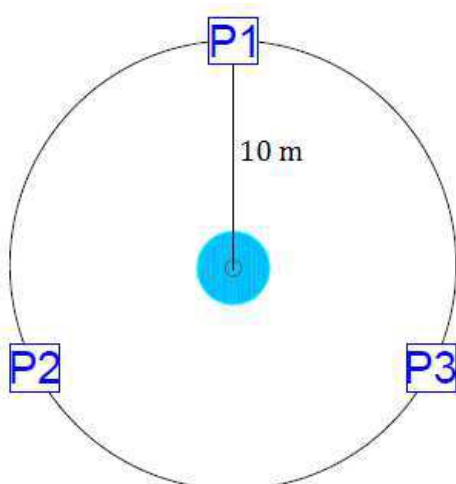


Fonte: Própria autora.

#### 4.2.4 Ensaios

Após a montagem do experimento, serão iniciados, de fato, os ensaios. Inicialmente, o objeto de teste a ser utilizado será um isolador polimérico em bom estado de degradação. O isolador será submetido a níveis de 100% de sua tensão nominal (fase-terra), ou seja, aproximadamente 133 kV. Para cada nível de tensão aplicado, as medições dos níveis de UV serão realizadas a uma distância de observação de 10 m. O ganho de imagem da câmera ultravioleta será configurado em 150, pois, para este valor, a contagem de pontos/min tem maior independência sobre o ganho (BARROS, 2011). Na Figura 31 estão ilustradas as posições que as três plataformas (P1, P2 e P3) deverão ocupar durante os ensaios.

Figura 31 - Posicionamento das plataformas durante os ensaios.



Fonte: Própria autora.

Tendo em vista que o efeito corona é influenciado diretamente tanto pela temperatura ambiente quanto pela umidade relativa do ar, tais grandezas serão monitoradas durante o decorrer das inspeções. Da mesma forma, a câmera de detecção UV será utilizada durante todas as medições, juntamente com uma placa de captura que auxiliará na gravação dos vídeos que capturem a ocorrência das descargas corona nos ensaios. Os vídeos serão utilizados na etapa do processamento digital das imagens.

O mesmo procedimento se repetirá para os isoladores poliméricos com estado de degradação médio e crítico. Todos os dados obtidos durante os experimentos serão armazenados em um banco de dados para posterior tratamento.

#### 4.2.5 Processamento das imagens

A utilização do DRUV para captação das descargas corona permitirá a quantificação da ocorrência das descargas (pontos de descarga/minuto), porém juntamente com as descargas serão, também, captados possíveis reflexos de objetos e ruídos de fundo, tais como os ruídos provocados por conexões mal feitas e lâmpadas acesas.

Desse modo, a aplicação de uma técnica para o processamento das imagens obtidas pela câmera detectora será necessária, visando a quantificação somente dos efeitos das descargas corona. O tratamento das imagens permitirá a obtenção

de fâculas (região de concentração das descargas) sem ruído e a determinação mais precisa da região da fâcula e da concentração de pixels de cada imagem correspondente às descargas corona.

A medição das descargas corona em laboratório será realizada utilizando o DayCor. Além disso, acoplado ao detector será utilizada uma placa de captura para permitir a gravação de vídeos que capturem a ocorrência das descargas. Cada vídeo obtido será processado utilizando a plataforma Matlab® para extração das imagens, denominadas de *frames*, constituídas por matrizes de 480 linhas e 720 colunas. Serão extraídos 500 *frames* em cada vídeo e as 10 imagens com maior nível de descargas corona serão selecionadas após uma inspeção visual e, por fim, processadas.

Inicialmente, as imagens serão convertidas para escala de cinza, com níveis variando entre 0 (preto) e 255 (branco). Com o objetivo de extração do isolador das imagens, já que não é objeto de interesse nesta etapa do processamento, será realizada a binarização. Assim, o valor 1 será atribuído à região mais clara da imagem (corona) e o valor 0 à região mais escura.

Na etapa seguinte, uma máscara será implementada e aplicada ao processamento. A utilização da máscara será necessária devido à existência de uma função para enquadramento das descargas no DayCor, na qual somente as descargas que ocorrerem dentro daquela região de enquadramento serão contabilizadas durante as medições. Assim, as demais descargas serão descartadas.

Após a aplicação da máscara e da conversão para escala binária das imagens, um algoritmo morfológico será aplicado em regiões que não são de interesse, com o intuito de extraí-las das imagens, pois elas podem assumir um comportamento de falso positivo.

Por fim, os 10 *frames* selecionados serão somados, de modo a formar uma única matriz, com o objetivo de apurar a possível existência de ruídos que se assemelhem às descargas corona nas imagens. De modo a definir a incidência das descargas em cada ponto como sendo descarga ou ruído, aplicar-se-á o processo de ponderação. Este método é baseado em experiências de medição de descargas corona, no qual pixels com taxa de ocorrência maior ou igual a três serão considerados corona. Por outro lado, pixels com valores menores que três serão considerados ruídos, já que o efeito corona é um fenômeno caracterizado pela incidência das descargas na mesma região.

Após a junção de todos os *frames* em uma única matriz e eliminação dos ruídos, a região da fâcula será quantificada a partir do número de pixels na região. Os pixels serão contabilizados como 1 quando brancos na imagem e como 0 quando pretos.

O parâmetro de quantificação da região da fâcula será definido a partir da equação 7.

$$s = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N B(x, y), \quad (7)$$

em que  $M$  e  $N$  são as linhas e colunas na matriz da imagem binária e  $B(x,y)$  é o valor do pixel na posição  $(x, y)$ . Assim, o  $s$  é o número de pixels da fâcula.

#### **4.2.6 Influência da umidade na medição de descargas corona**

Para verificação da influência da umidade na medição das descargas corona, os isoladores poliméricos serão ensaiados sob condições de umidade distintas.

Os ensaios sob condições de baixa umidade serão realizados em horário próximo às 15h, conforme constatação meteorológica de que neste horário são medidos os menores valores de umidade na cidade de Campina Grande-PB. Já para obtenção de valores mais elevados de umidade, contou-se com o auxílio de um equipamento aspersor com sistema hidro-mecânico, no qual a água é colocada em suspensão no ar através de gotículas. O uso da aspersão é necessário para se alcançar maiores valores de umidade, em especial nas proximidades do isolador, pois os ensaios serão realizados na estação do outono, época em que ocorre a redução gradativa das temperaturas e diminuição da umidade relativa do ar.

Para medição da umidade relativa do ar será utilizado um termohigrômetro digital portátil com grau de exatidão de  $\pm 5\%$ . O instrumento será posicionado em local próximo ao isolador ensaiado. Na Figura 32 pode ser visto o termohigrômetro utilizado para medição da umidade e temperatura.

Figura 32 - Termohigrômetro utilizado para medição da umidade e temperatura.



Fonte: Própria autora.

As medições serão realizadas a partir das três mesmas plataformas e os isoladores ensaiados permanecerão na mesma posição, tanto para os ensaios em que houver baixa umidade quanto para alta umidade.

#### **4.2.7 Sistema Fuzzy desenvolvido**

Um sistema *Fuzzy* será desenvolvido neste trabalho com o objetivo de estimar o estado de degradação dos isoladores poliméricos de acordo com os níveis de descargas corona (concentração de pixels) medidos e considerando a umidade relativa no ar no instante das medições. O sistema visa auxiliar na tomada de decisão sobre a necessidade de intervenção ou não ao equipamento. Para tanto, será utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox* da ferramenta Matlab® na realização das simulações.

##### **4.2.7.1 Fuzzificação**

Na etapa de fuzzificação serão definidas as variáveis de entrada e saída do sistema. Assim, serão consideradas como variáveis de entrada do sistema os valores das concentrações de pixels (denominada por Dcorona) obtidos após o processamento das imagens e os valores de umidade relativa do ar (denominada por Umidade) medidos durante os ensaios.

Os valores de descargas corona medidos em campo já são um parâmetro comumente analisado no processo de inspeção dos isoladores poliméricos. Neste

caso, os valores de descargas serão dados pela concentração de pixels a ser obtida após a etapa de processamento, considerando a eliminação dos ruídos existentes. A variável umidade, por outro lado, apresenta-se como um agravante à ocorrência das descargas. Portanto, será considerada na classificação do nível de degradação dos isoladores.

#### **4.2.7.2 Inferência**

Nesta etapa, o conhecimento adquirido com as medições a serem realizadas será utilizado para descrição do problema e consequente construção das regras *Fuzzy*. Devido à simplicidade e à eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana, o método de Mamdani será utilizado nesta etapa.

#### **4.2.7.3 Defuzzificação**

No processo de defuzzificação, o método do centróide será utilizado. O valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *Fuzzy* será traduzido em um valor discreto, o qual indicará o nível de degradação dos isoladores.

A variável de saída do sistema será o estado de degradação do isolador, dada pela equação 8.

$$\text{Estado de Degradação} = f(\text{Dcorona}, \text{Umidade}). \quad (8)$$

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados, inicialmente, os resultados obtidos com a inspeção visual do estado de degradação dos isoladores utilizando o IDI. Em seguida, serão apresentados os resultados das medições de descargas corona obtidas para valores de umidade distintos. Também serão apresentados os resultados obtidos após o processamento das imagens captadas com a câmera detectora de radiação UV. E, por fim, o sistema lógico *Fuzzy* implementado será apresentado e aplicado, permitindo a classificação do estado de degradação dos isoladores.

### 5.1 Classificação dos isoladores via inspeção visual

Os isoladores poliméricos, antes de serem ensaiados, foram submetidos a um processo de inspeção visual, conforme descrito anteriormente no capítulo que trata sobre a metodologia dos ensaios. A inspeção foi realizada por pesquisadores que estão estudando diversas técnicas de detecção de defeitos em isoladores poliméricos. Assim, os pesquisadores atribuíram valores de 1 a 5 a cada um dos aspectos físicos avaliados. Diante dos valores atribuídos, o cálculo do IDI foi realizado, de modo a se obter a classificação final dos isoladores quanto a seus níveis de degradação. No Quadro 4 é ilustrado o resultado do processo de inspeção realizado.

Quadro 4 - Classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos pelo IDI.

Estado de degradação dos isoladores	
Isolador	Índice de Degradação do Isolador (IDI)
10	8,971
11	8,618
5	5,676
9	5,471
4	4,588
16	4,147
6	3,971

<b>7</b>	3,941
<b>12</b>	3,941
<b>8</b>	3,882
<b>14</b>	3,500
<b>17</b>	3,382
<b>15</b>	3,324
<b>13</b>	3,265
<b>1</b>	2,105
<b>2</b>	2,105
<b>3</b>	2,105

Fonte: Própria autora.

Os isoladores que obtiveram os maiores valores de IDI foram considerados em condições operacionais críticas para o sistema. Já os isoladores com menor valor foram considerados os isoladores novos e os de valor intermediário foram classificados como isoladores em condições operacionais de desgaste médio.

Ao todo foram avaliados 17 isoladores, porém apenas 9 foram selecionados para os ensaios, sendo 3 isoladores apresentando condições operacionais críticas (identificados por 5, 10 e 11), 3 apresentando condições operacionais de desgaste médio (identificados por 7, 8 e 16) e 3 isoladores novos (identificados por 1, 2 e 3). Os aspectos físicos de alguns isoladores poliméricos utilizados nos ensaios podem ser observados na Figura 33.

Figura 33 - Fotografia dos aspectos físicos dos isoladores poliméricos com diferentes estados de degradação: (a) crítico, (b) desgaste médio e (c) novo.

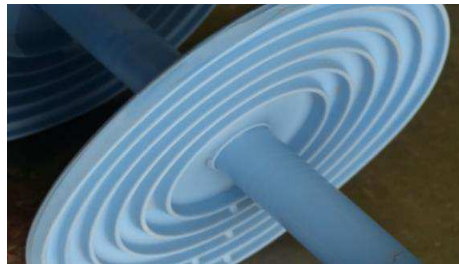


(a)





(b)



(c)

Fonte: Própria autora.

## 5.2 Ensaio

Os ensaios foram realizados, inicialmente, utilizando os isoladores poliméricos classificados como novos como objeto de teste, de modo a utilizá-los como referência para as demais medições. As medições foram realizadas nas três plataformas, com distância de observação de 10 metros e o ganho UV da câmera detectora permaneceu em 150 durante todos os ensaios. Os valores de temperatura e umidade foram constantemente monitorados. As médias das descargas corona medidas podem ser observadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Resumo dos resultados das medições de descargas corona nos isoladores poliméricos.

Nível de degradação	Número do isolador	Plataforma	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Câmera UV (pontos/min)
<b>NOVO</b>	1	1	28,1	62	189
		2	28,6	61	252
		3	28,8	60	295
	2	1	24,6	75	366
		2	24,0	77	254

		3	23,9	77	400
	3	1	24,9	74	261
		2	24,8	75	353
		3	25,3	73	284
<b>MÉDIO</b>	16	1	26,8	70	303
		2	26,8	70	528
		3	26,8	70	466
	7	1	25,5	69	163
		2	25,5	70	343
		3	25,3	71	382
	8	1	25,0	82	5263
		2	25,0	82	932
		3	25,0	82	6058
<b>CRÍTICO</b>	10	1	25,3	71	1174
		2	25,3	71	1107
		3	25,5	70	2171
	11	1	25,4	74	560
		2	25,4	74	696
		3	25,4	74	854
	5	1	25,3	75	1104
		2	25,4	75	884
		3	25,4	75	1281

Fonte: Própria autora.

De acordo com o Quadro 5, o isolador 8, inspecionado visualmente e classificado como possuindo média degradação, apresentou mais descargas corona do que todos os outros isoladores, inclusive os de degradação crítica. As atividades das descargas foram mais intensas no terminal fase do isolador.

Além disso, os isoladores 7 e 16, classificados previamente como de degradação média, apresentaram descargas corona similares às medidas para os isoladores novos. Isto pode ser explicado pelo fato dos isoladores apresentarem as saias consideravelmente danificadas, seja com rasgões ou com partes extraídas, já que se acreditava que o estado das saias tivesse uma maior contribuição à ocorrência das descargas corona. Entretanto, a inspeção constatou que não havia qualquer atividade de descargas nas regiões próximas às saias danificadas.

Desse modo, constatada a classificação equivocada realizada através da simples inspeção visual dos isoladores, optou-se por realizar uma reclassificação quanto a seus estados de degradação. Esta reclassificação foi baseada nos valores de descargas corona medidos durante os ensaios e pode ser vista no Quadro 6.

Quadro 6– Reclassificação do estado de degradação dos isoladores.

<b>Nível de Degradação</b>	<b>Isolador</b>
<b>NOVO</b>	1, 2, 3, 7 e 16
<b>MÉDIO</b>	5, 10 e 11
<b>CRÍTICO</b>	8

Fonte: Própria autora.

Diante da reclassificação do estado de degradação dos isoladores, a análise dos resultados da medição das descargas para os isoladores em bom estado (1, 2, 3, 7 e 16) evidenciou medição de pouca radiação UV.

Os isoladores com erosão (isolador 5) ou exposição do núcleo (isoladores 10 e 11) apresentaram atividade corona, porém não da forma intensa que se esperava. Os isoladores 10 e 11 apresentam deposição de poluição semelhante, entretanto, o isolador 10 apresenta maior exposição do núcleo comparativamente ao isolador 11 e, conforme esperado, apresentou, também, maior média de descargas corona. Já o isolador 5 é o que apresenta maior erosão em seu revestimento dentre os isoladores ensaiados e apresentou descargas corona compatíveis aos isoladores com núcleo exposto, podendo configurar a erosão como um fator de considerável contribuição à atividade das descargas. Na Figura 34 a exposição do núcleo dos isoladores 10 e 11, respectivamente, pode ser vista.

Figura 34 - Exposição do núcleo do (a) isolador 10 e do (b) isolador 11.



(a)



(b)

Fonte: Própria autora.

Além disso, ainda de acordo com o Quadro 5, as medições das descargas corona realizadas no isolador 8, em cada uma das plataformas, apresentaram-se divergentes quanto aos valores medidos, pois a medição realizada a partir da plataforma 2 apresentou resultado significativamente inferior ao obtido para as demais plataformas. De mesmo modo, a medição realizada no isolador 10, a partir da plataforma 3, apresentou resultado significativamente superior ao obtido para as demais plataformas. A justificativa para a divergência nas medições é que o defeito originário da atividade das descargas pode ter sido ocultado em alguma das medições, dado o posicionamento do DRUV. Assim, constata-se a relevância da medição ser realizada a partir de três posições distintas e igualmente distanciadas de  $120^\circ$ .

### 5.3 Processamento das imagens

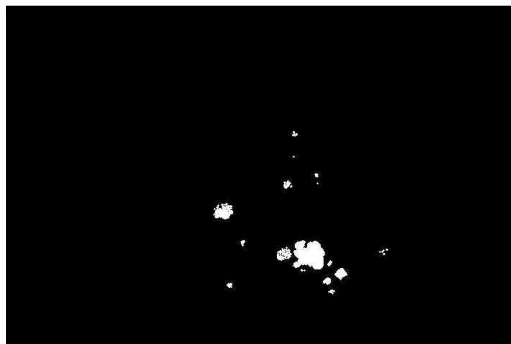
O objetivo do processamento das imagens realizado neste trabalho é a obtenção de imagens que contivessem apenas a região de interesse (as descargas), de modo a quantificá-las. Na Figura 35 é possível observar uma das imagens obtidas durante a

medição das descargas corona utilizando a câmera UV. E, em seguida, tem-se a soma de todas as 10 imagens após a eliminação dos objetos que não eram de interesse ao processamento e, finalmente, a imagem final após a eliminação dos ruídos existentes.

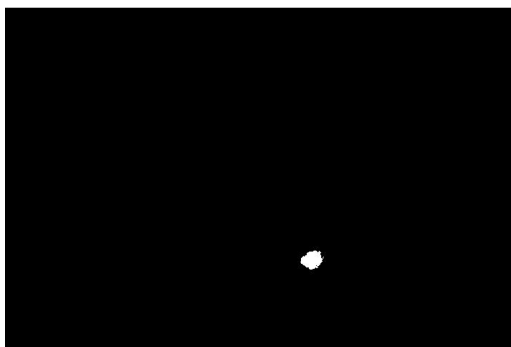
Figura 35 - Isolador polimérico de 230 kV: (a) imagem da câmera UV, (b) soma das 10 imagens binárias após processamento e (c) imagem ponderada.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Própria autora.

No Quadro 7 é possível observar os valores médios de descargas corona (pontos/min) medidos para cada isolador, em cada uma das plataformas, juntamente com seu respectivo valor de concentração de pixels.

Quadro 7 - Valores médios das descargas corona e das respectivas concentrações de pixels após o processamento das imagens.

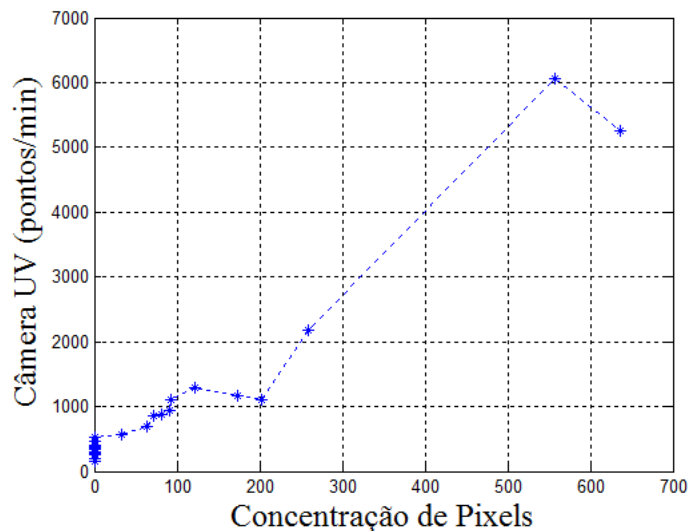
Número do isolador	Plataforma	Câmera UV (pontos/min)	Concentração de pixels
1	1	189	0
	2	252	0
	3	295	0
2	1	366	0
	2	254	0
	3	400	0
3	1	261	0
	2	353	0
	3	284	0
16	1	303	0
	2	528	0
	3	466	0
7	1	163	0
	2	343	0
	3	382	0
8	1	5263	636
	2	932	91
	3	6058	557
10	1	1174	173
	2	1107	203
	3	2171	259
11	1	560	33
	2	696	64
	3	854	72
	1	1104	93

5	2	884	82
	3	1281	121

Fonte: Própria autora.

A correlação entre os valores médios de descargas corona (pontos/min) e a concentração de pixels da fâcula é ilustrada na Figura 36.

Figura 36 - Gráfico da correlação entre as descargas corona (pontos/min) e a concentração de pixels da fâcula.



Fonte: Própria autora.

Após o processamento das imagens, constatou-se que os isoladores que apresentaram poucas descargas (pontos/min) também apresentaram pouca ou nenhuma concentração de pixels. O mesmo ocorreu para medições de elevada contagem de pontos/min, pois também foram obtidas elevadas concentrações de pixels. Portanto, os resultados provenientes do processamento das imagens UV apresentaram consonância com as descargas corona (pontos/min) medidas, conforme pode ser constatado na Figura 36, sendo considerados satisfatórios.

No caso específico dos isoladores que não apresentaram concentração de pixels, a utilização do ganho de imagem 150 pode ter sido fator decisivo para tal, pois a pouca atividade corona presente não conseguiu ser representada por regiões de fâcula, impossibilitando a obtenção dos pixels. O uso de um ganho mais elevado poderia viabilizar a obtenção dessas regiões, porém causaria uma maior dependência das descargas com o ganho e adicionaria ruído.

#### 5.4 Influência da umidade na medição das descargas corona

Para o caso em que o isolador polimérico apresentou poucas descargas corona, como foi o caso dos isoladores classificados como novos, percebeu-se a influência da umidade nos resultados da medição. Com a umidade mais elevada, houve um aumento na atividade corona medida no isolador. Porém, não o suficiente para que as descargas atingissem níveis que permitissem considerar o isolador não mais como novo, mas como um isolador com degradação média. Isto pode ser constatado através das medições realizadas com o isolador 16, conforme pode ser observado no Quadro 8.

Quadro 8 – Influência da umidade para isoladores considerados novos.

<b>Isolador 16</b>		
<b>Umidade (%)</b>	<b>Descargas corona (pontos/min)</b>	<b>Descargas corona (concentração de pixels)</b>
70	466	0
57	249	0

Fonte: Própria autora.

Entretanto, para os isoladores que apresentavam estado de degradação médio e, conseqüentemente, estavam sujeitos à presença de mais descargas corona, percebeu-se que os valores de descargas medidos seriam o suficiente para que as descargas atingissem níveis que permitissem considerá-lo como um isolador com estado de degradação crítico. E, novamente, o aumento da umidade provocou o aumento das descargas corona medidas. Isto pode ser constatado através das medições realizadas com o isolador 10, conforme pode ser observado no Quadro 9.



Quadro 9 – Influência da umidade para isoladores com degradação média.

<b>Isolador 10</b>		
<b>Umidade (%)</b>	<b>Descargas corona (pontos/min)</b>	<b>Descargas corona (concentração de pixels)</b>
71	2222	301
57	898	123

Fonte: Própria autora.

Para o isolador do tipo crítico, a influência da umidade também foi constatada através dos valores médio de descargas corona apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Influência da umidade para isoladores com degradação crítica.

<b>Isolador 8</b>		
<b>Umidade (%)</b>	<b>Descargas corona (pontos/min)</b>	<b>Descargas corona (concentração de pixels)</b>
72	6067	555
57	3185	370

Fonte: Própria autora.

Os isoladores críticos já são classificados com o mais elevado nível de degradação estabelecido neste trabalho, assim, o aumento da umidade contribui somente para a degradação do isolador e não para a classificação com um nível de degradação maior. Isto é justificado pelo fato de que juntamente com a elevação da umidade se constata, também, um aumento na ocorrência das descargas corona.

## 5.5 Sistema *Fuzzy* desenvolvido

Um sistema *Fuzzy* foi desenvolvido neste trabalho, a fim de estimar o estado de degradação dos isoladores poliméricos baseado nos valores de umidade e descargas corona medidos durante os ensaios.

As variáveis linguísticas utilizadas para a classificação das descargas corona nos isoladores foram: Baixa, Média, Medianamente Alta e Alta. Como foram constatadas divergências entre os valores medidos para as plataformas 1, 2 e 3, para o mesmo isolador, optou-se por realizar a média entre os valores de concentração de descarga medidos nas três plataformas. Assim, o valor médio calculado foi utilizado como entrada da lógica *Fuzzy*. O cálculo da média foi realizado conforme a equação 9.

$$\text{Concentração de pixels}_n = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 CP_i, \quad (9)$$

em que  $n$  é o índice de identificação do isolador,  $i$  é o índice de identificação da plataforma e  $CP$  é a concentração de pixels obtida a partir de cada plataforma  $i$ .

Assim, os valores médios da concentração de pixels para cada isolador podem ser observados no Quadro 11.

Quadro 11 – Valores médios da concentração de pixels em cada isolador.

Isolador	Descargas corona (concentração de pixels)
<b>1</b>	0
<b>2</b>	0
<b>3</b>	0
<b>5</b>	99
<b>7</b>	0
<b>8</b>	428
<b>10</b>	212
<b>11</b>	56
<b>16</b>	0

Fonte: Própria autora.

Os parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Dcorona podem ser vistos no Quadro 12.

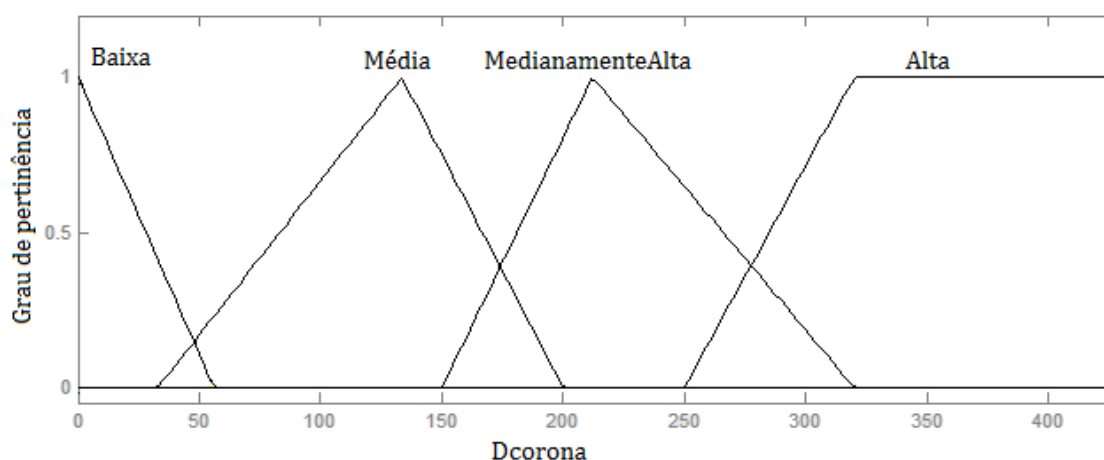
Quadro 12 – Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Dcorona.

Função de pertinência	Parâmetros
<b>Baixa</b>	$\mu_B(Dcorona) = \begin{cases} 1, & \text{se } Dcorona = 0 \\ -\frac{Dcorona}{56} + 1, & \text{se } 0 < Dcorona < 56 \end{cases}$
<b>Média</b>	$\mu_M(Dcorona) = \begin{cases} \frac{(Dcorona - 56)}{77,5}, & \text{se } 56 \leq Dcorona < 133,5 \\ \frac{(200 - Dcorona)}{66,5}, & \text{se } 133,5 \leq Dcorona < 200 \end{cases}$
<b>Medianamente Alta</b>	$\mu_{MA}(Dcorona) = \begin{cases} \frac{(Dcorona - 150)}{62}, & \text{se } 150 \leq Dcorona < 212 \\ \frac{(320 - Dcorona)}{108}, & \text{se } 212 \leq Dcorona < 320 \end{cases}$
<b>Alta</b>	$\mu_A(Dcorona) = \begin{cases} \frac{(Dcorona - 250)}{70}, & \text{se } 250 \leq Dcorona < 320 \\ 1, & \text{se } Dcorona \geq 320 \end{cases}$

Fonte: Própria autora.

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada Dcorona está apresentada na Figura 37.

Figura 37 - Funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada Dcorona.



Fonte: Própria autora.

Já as variáveis linguísticas utilizadas quando a entrada é a Umidade foram: Baixa, Média e Alta. Os valores discretos de umidade utilizados como entrada *Fuzzy* foram dados em percentual. Os parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Umidade, podem ser vistos no Quadro 13.

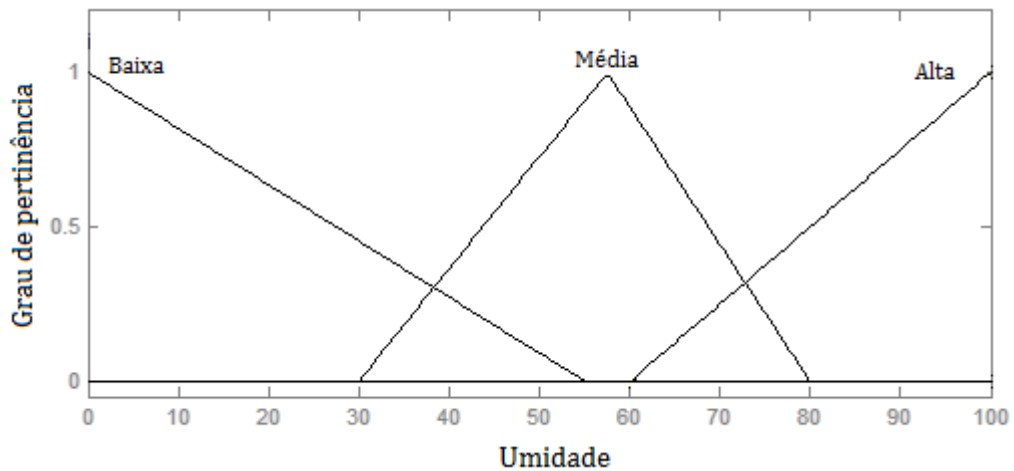
Quadro 13 - Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada Umidade.

Função de pertinência	Parâmetros
<b>Baixa</b>	$\mu_B(Umidade) = \begin{cases} \frac{-Umidade}{55} + 1, & \text{se } 0 \leq Umidade < 55 \end{cases}$
<b>Média</b>	$\mu_M(Umidade) = \begin{cases} \frac{(Umidade - 30)}{27,5}, & \text{se } 30 \leq Umidade < 57,5 \\ \frac{(80 - Umidade)}{22,5}, & \text{se } 57,5 \leq Umidade < 80 \end{cases}$
<b>Alta</b>	$\mu_A(Umidade) = \begin{cases} \frac{(Umidade - 60)}{40}, & \text{se } 60 \leq Umidade \leq 100 \end{cases}$

Fonte: Própria autora.

Na Figura 38 pode ser observada a ilustração gráfica das funções de pertinência que representam cada variável linguística.

Figura 38 - Funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada Umidade.



Fonte: Própria autora.

A definição das regras que regem o sistema *Fuzzy* desenvolvido foi estabelecida em função da influência que a umidade teve sobre a medição das descargas corona nos ensaios.

Durante os ensaios realizados com diferentes valores de umidade relativa do ar, observou-se que isoladores classificados como médio, quando submetidos a uma elevada umidade, podiam emitir radiação UV de mesma proporção que os isoladores considerados críticos. Esta faixa de radiação UV foi definida como MedianamenteAlta. Assim, o mapa de regras foi estabelecido:

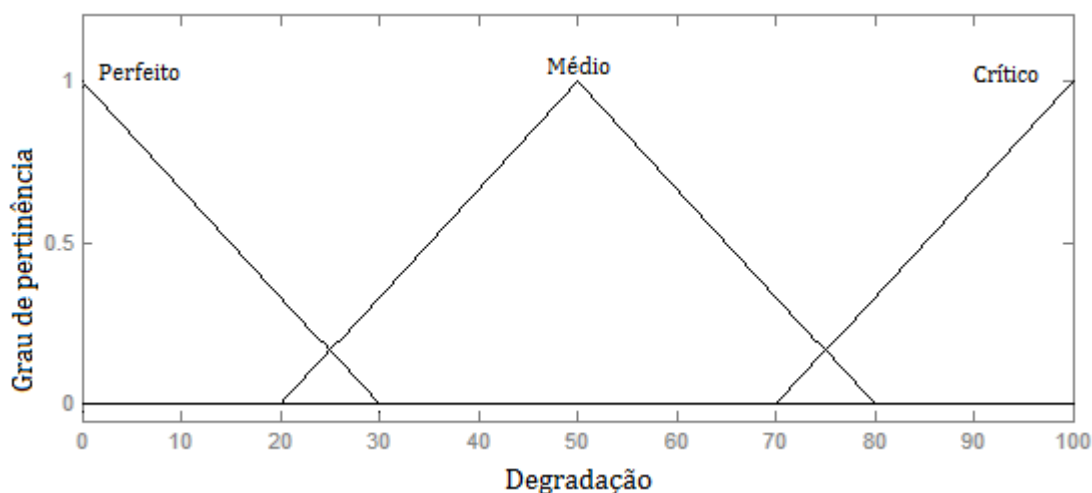
- Regra 1: se Dcorona = Baixo, então Degradação = Perfeito.
- Regra 2: se Dcorona = Médio, então Degradação = Médio.
- Regra 3: se Dcorona = Alta, então Degradação = Crítico.
- Regra 4: se Dcorona = MedianamenteAlta e Umidade = Alta, então Degradação = Médio.
- Regra 5: se Dcorona = MedianamenteAlta e Umidade = Baixa, então Degradação = Crítico.
- Regra 6: se Dcorona = MedianamenteAlta e Umidade = Média, então Degradação = Crítico.

O sistema *Fuzzy* que foi desenvolvido neste trabalho visava indicar, através de sua saída, o grau de degradação do isolador. Para tanto, foi utilizada uma escala de 0 a 100, na qual 0 representava o isolador mais novo possível e 100 o isolador

mais degradado possível. Para obtenção das saídas *Fuzzy*, o método do centróide foi utilizado no processo de defuzzificação, pois melhor se adequou ao problema, gerando os resultados mais consistentes.

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da saída Degradação está apresentada na Figura 39.

Figura 39 - Funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da saída Degradação.

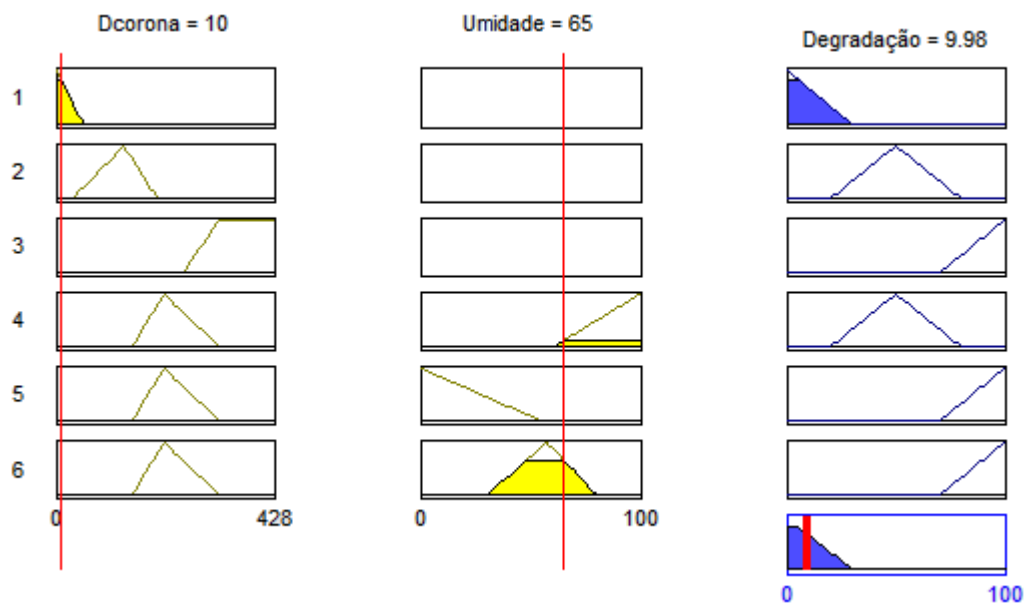


Fonte: Própria autora.

Os isoladores que apresentaram descargas corona (pontos/min) que permitiram classificá-los como em bom estado também foram considerados isoladores em bom estado pelo sistema desenvolvido, conforme pode ser visto nas Figuras 40 e 41.

A tela de interface do *toolbox* utilizado apresenta, na etapa de defuzzificação, as entradas e a saída do sistema. Cada uma das linhas representa uma regra estabelecida. Assim, as entradas são submetidas às regras e a saída para cada regra é determinada. Para determinação da saída do sistema lógico todas as saídas são somadas e o método do centróide é aplicado.

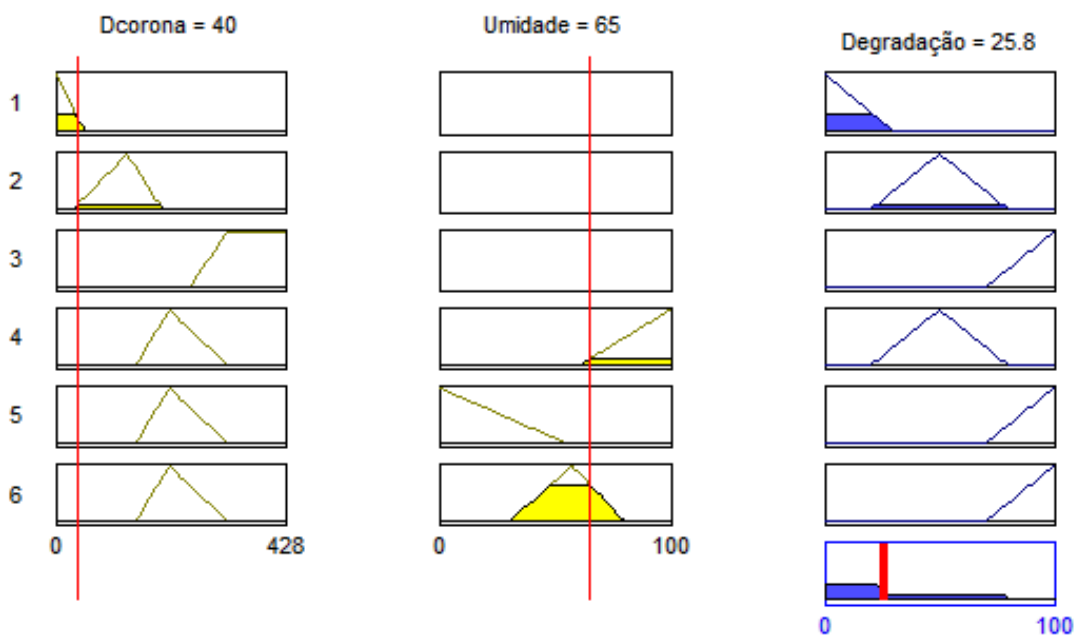
Figura 40 - Tela de interface do sistema *Fuzzy*: isolador novo com Dcorona = 10 e Umidade = 65.



Fonte: Própria autora.

Para a região da fâcula com 10 pixels e a umidade relativa do ar de 65%, a degradação do isolador foi de 9,98.

Figura 41 - Tela de interface do sistema *Fuzzy*: isolador novo com Dcorona = 40 e Umidade = 65.

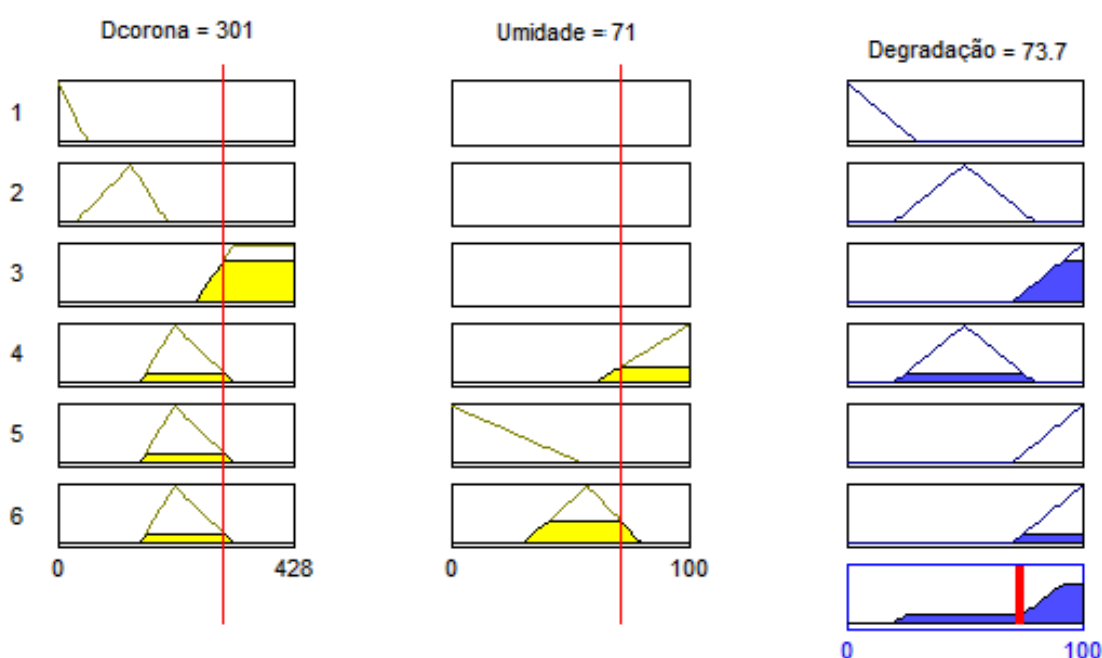


Fonte: Própria autora.

Já para a região da fâcula com 40 pixels e a umidade relativa do ar de 65%, a degradação do isolador foi de 25,8. Assim, é possível perceber que o aumento das descargas corona no isolador novo promoveu o aumento da degradação do isolador, conforme esperado.

De modo constatar a influência da umidade nas medições de descarga corona e garantir a aplicabilidade do sistema *Fuzzy* implementado, os resultados apresentados no Quadro 9 para o isolador 10 foram utilizados como entrada do sistema. De acordo com a Quadro, o isolador apresentou descargas corona com níveis de concentração de pixels de 301 para a umidade relativa do ar de 71% e 123 para a umidade de 57%. A saída do sistema *Fuzzy* para a medição realizada com umidade de 71% pode ser observada na Figura 42.

Figura 42 - Tela de interface do sistema *Fuzzy*: saída *Fuzzy* para concentração de 301 pixels e umidade de 71%.

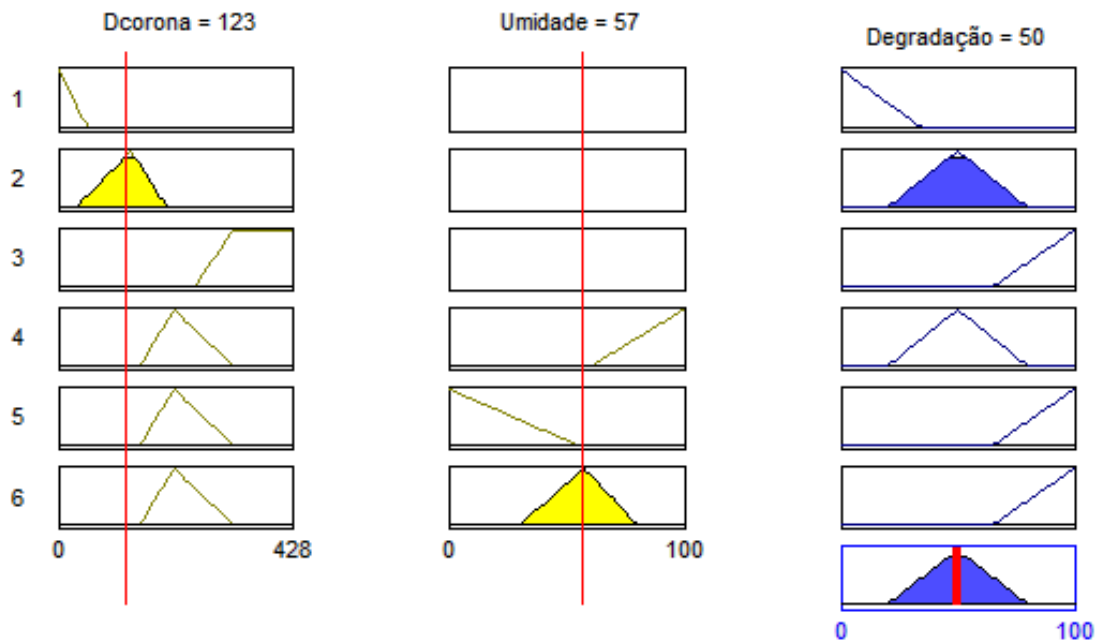


Fonte: Própria autora.

Conforme esperado, constatou-se que o isolador 16 foi considerado com nível de degradação crítico (Degradação = 73,7) para a umidade medida de 71%. Já para a medição realizada com o mesmo isolador 16, porém com umidade relativa do ar de 57%, o estado de degradação foi considerado médio (Degradação = 50), conforme pode ser visto na Figura 43.



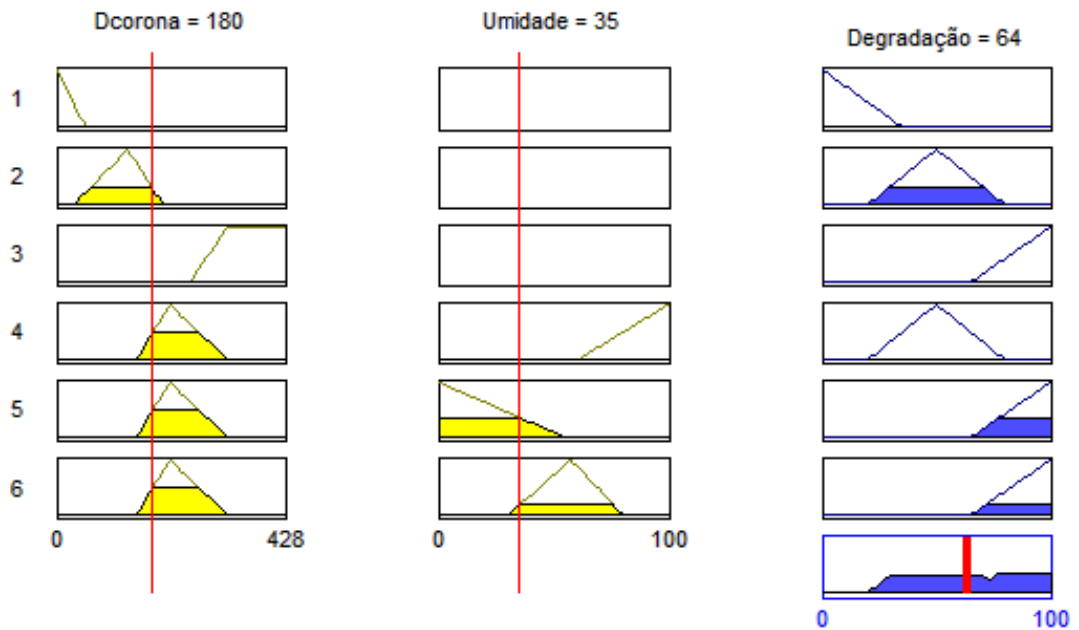
Figura 43 - Tela de interface do sistema *Fuzzy*: saída *Fuzzy* para concentração de 123 pixels e umidade de 57%.



Fonte: Própria autora.

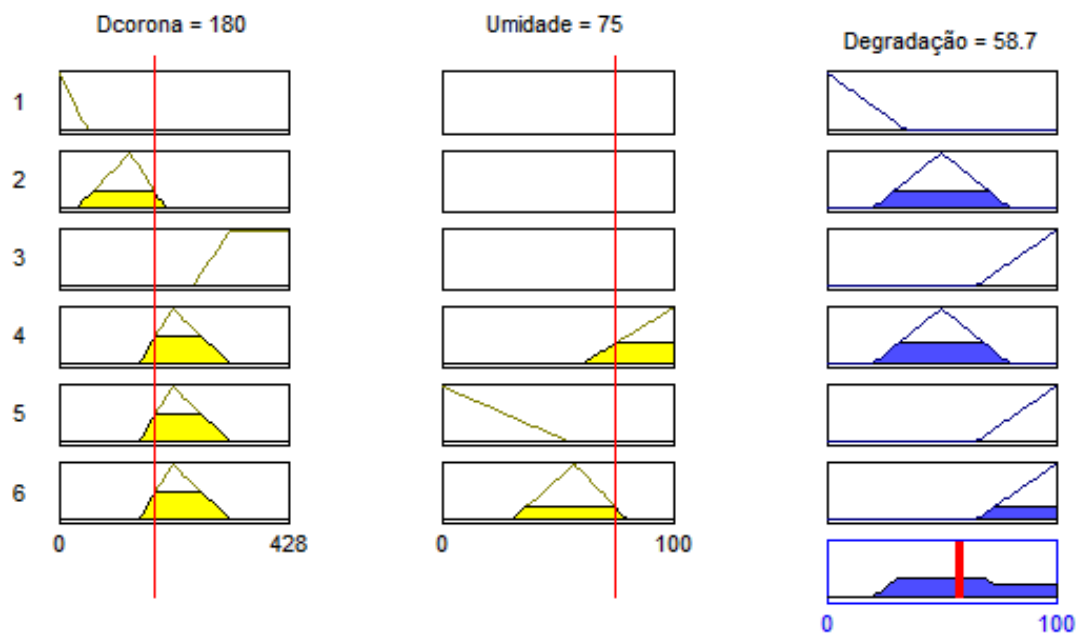
Para os isoladores novos e médios, conforme constatado nos ensaios, a elevação da umidade relativa do ar gerou o aumento de seus estados de degradação. Entretanto, esse aumento não foi significativo o suficiente para que os isoladores passassem a ser classificados como médios e críticos, respectivamente. Na Figura 44 pode ser observado o estado de degradação de um isolador com Dcorona = 180 e Umidade = 35. Da mesma forma, na Figura 45 pode ser observado o estado de degradação de um isolador com Dcorona = 180 e Umidade = 75.

Figura 44 - Tela de interface do sistema *Fuzzy*: estado de degradação para concentração de pixels de 180 e umidade de 35%.



Fonte: Própria autora.

Figura 45 - Tela de interface do sistema *Fuzzy*: estado de degradação para concentração de pixels de 180 e umidade de 75%.



Fonte: Própria autora.

É possível observar que para o isolador Médio com umidade menor, a degradação obtida foi de 64, enquanto que para a umidade mais elevada a degradação obtida foi de 58,7. Assim, caso durante a inspeção realizada em um

isolador se obtenha 180 pixels, para umidade relativa do ar medida de 35%, este isolador estaria mais degradado do que um isolador com 180 pixels a uma umidade de 75%. Isto ocorre porque a elevação da umidade provoca, também, o aumento das descargas corona medidas. Portanto, o isolador inspecionado a 75% de umidade apresentaria a 35%, muito provavelmente, menos de 180 pixels, comprovando a sua menor degradação.

Analisados os resultados obtidos com o sistema *Fuzzy* desenvolvido para a medição de descargas corona, em isoladores, considerando a influência da umidade, constata-se a aplicabilidade e eficácia de seu uso. Isto se confirma pelo fato dos resultados obtidos durante os ensaios em laboratório terem sido obtidos, também, utilizando o sistema lógico desenvolvido.

Desse modo, o sistema lógico *Fuzzy* desenvolvido neste trabalho se apresenta como uma proposta promissora no auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não aos isoladores inspecionados.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, isoladores poliméricos de 230 kV, com distintos níveis de degradação, foram inspecionados com uma câmera de detecção UV. As imagens obtidas com a câmera UV foram processadas, de modo a eliminar os ruídos existentes. A influência da umidade nos resultados dos ensaios também foi analisada. E, finalmente, foi proposto um sistema lógico *Fuzzy* para classificação do nível de degradação dos isoladores poliméricos a partir da medição das descargas corona e a umidade relativa do ar. O sistema visa o auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não aos isoladores.

Constatou-se que a técnica de simples inspeção visual dos isoladores se apresentou ineficiente, evidenciando a necessidade de se utilizar métodos com maior grau de confiabilidade, tais como a medição da radiação UV.

Os resultados para a técnica de processamento implementada neste trabalho foram promissores e o processo permitiu a eliminação dos ruídos existentes nas medições das descargas corona.

Os resultados das medições das descargas corona para o mesmo isolador, a partir das três plataformas, evidenciaram a necessidade de se efetuar a medição das descargas em vários ângulos, conforme proposto neste trabalho, pois o posicionamento da câmera UV pode permitir que a atividade corona não seja detectada.

Os ensaios para verificação da influência da umidade nas medições das descargas corona constataram que para todos os isoladores ensaiados a umidade contribuiu para o aumento da ocorrência das descargas. E, portanto, é um parâmetro que dever ser considerado nas medições.

O modelo de lógica *Fuzzy* desenvolvido neste trabalho se apresentou relevante, pois ao contrário da medição realizada utilizando apenas o equipamento DRUV, considerou-se, no modelo, a influência da umidade relativa do ar na ocorrência das descargas. Assim, permite-se que a tomada de decisões dos inspetores seja realizada não só pela análise da radiação UV emitida, mas considerando as condições de umidade no instante da inspeção.

O modelo desenvolvido neste trabalho para a classificação do nível de degradação dos isoladores usando a lógica *Fuzzy* apresentou resultados promissores, em conformidade com os resultados obtidos nos ensaios. Assim, esta ferramenta se apresenta como uma técnica eficiente no auxílio à tomada de decisões quanto à necessidade de intervenção ou não aos isoladores.

## 6.1 Trabalhos futuros

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- Realizar medições com a câmera UV em linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro;
- Aumentar o banco de dados das medições, através da realização de mais ensaios em laboratório e em campo;
- Realizar medições de descargas parciais conforme a IEC 60270, de modo a detectar possíveis defeitos internos ao isolador;
- Associar a medição de descargas UV a outras técnicas de inspeção, tais como a medição de radiação infravermelha, de ruído ultrassônico, corrente de fuga;
- Utilizar os valores de concentração máximos de descargas medidas nas três plataformas como entrada do sistema lógico *Fuzzy* desenvolvido, de modo a verificar se há melhoria nos resultados obtidos;
- Propor um sistema lógico *Fuzzy* para correlacionar as descargas corona (concentração de pixels), as descargas parciais medidas em laboratório e outras técnicas de inspeção.

## REFERÊNCIAS

ADAMI, J. F.; PARENTONI, M. F. C.; MARTINEZ, M. L. B.; SILVEIRA, P. M.; DALLBELO, A. C. **Sistema Remoto de Detecção e Identificação de Defeitos em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão**. SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belo Horizonte, MG, 2008.

AHRENS, C. D. **Metereology Today**. 4<sup>th</sup> edition. St Paul, Minnesota, 1991.

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>.

AMENDOLA, M., SOUZA, A. L., e BARROS, L. C. **Manual Do Uso Da Teoria Dos Conjuntos Fuzzy No Matlab 6.5**. Campinas, SP. Disponível na internet via URL: <http://www.ime.unicamp.br/~biomat/revistas.htm>.

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

AYOADE, J. O. **Umidade atmosférica**. Rio de Janeiro, Brasil, 1996. p.128-154.

BARBOSA, P. R. **Controle Difuso Em Transportadores Pneumáticos De Sólidos: Redução Do Consumo De Potência**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

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.

BEZERRA, J. M. B. **Caracterização De Atributos De Sinais Para Utilização De Técnicas De Reconhecimento De Padrões Na Avaliação Do Isolamento De Instalações E De Equipamentos Elétricos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2004.

BEZERRA, R. C.; MELLO, D. R.; PORFIRIO, D. M.; ARAÚJO, F. E. R.; TEIXEIRA, J. M. T.; PINHEIRO, J. C. **Avaliação de Isoladores Poliméricos em Linha de Transmissão de 138 KV- Estudo de Caso.** SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia, GO, 2012.

BISNATH, S.; BRITTEN, A. C.; MARSHALL, E.; PILLAY, T.; REYNDERS, J. **The Fundamentals and Practice of Overhead Line Maintenance.** South Africa: Crown Publicationscc, 2006. 258p.

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

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.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems.** New York: AP Professional, 1994.

CUENCA, W. M. H. **Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais.** Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

CUENCA, W.H. **Aplicação de Sistemas Inteligentes no Reconhecimento de Padrões de DPs em Transformadores de Potência.** Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1998.

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

GERMANO, A. D. **Análise Da Degradação De Isolamentos Elétricos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

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

**GUIDE for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators**, STRI Guide 5, 2003.

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

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 2th. edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.

HALL, J. F. **History and Bibliography of Polymeric Insulators of outdoor Applications**. IEEE Trans. Power Delivery, vol. ED-8, 1993.

IEC Publication-60270. **High-voltage Test Technique - Partial Discharge Measurement**. Third Edition, 2000.

KAWAKATSU, W. M.. **Descargas parciais em barras estáticas de hidrogeradores: modelagem por guia de onda e análise de um acoplador**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, PA, 2009.

KINDERSBERGER, J.; KUHL, M. **Effect of Hydrophobicity on Insulator Performance**. Int'l. Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans (LA), USA, 1989.

KRUEL, M.; DILL, R. P.; DARONCO, E. **Mensuração da Satisfação: Um Estudo Comparativo entre Lógica Nebulosa (Fuzzy Logic) e Programação Linear**. Encontro da associação nacional de pós-graduação e pesquisa em administração. Rio de Janeiro, 2008.

LINDNER, M.; ELSTEIN, S.; LINDNER, P.; TOPAZ, J. M.; PHILLIPS, A. J. **Daylight Corona Discharge Imager**. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467), Vol.: 4, 23-27 Aug. 1999 Pages: 349 - 352.



LINDNER, M.; **Third UV Inspection User's Group Meeting**. Orlando, Florida, USA, 2004.

LUNA, A. M. **Materiais de Engenharia Elétrica**. Recife, Pernambuco, Brasil, 2003, p. 352.

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

MORÉ, J. D. **Aplicação da lógica Fuzzy na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultra-som**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

NERI, M. G. G.; GOUVEIA, F. A. O.; COSTA, E. G.; SILVA, K. M.; FERREIRA, T. V. **Utilização de Redes Neurais na Identificação de Descargas Parciais**. SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Belém, PA, 2010.

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, PR, 1999.

ÔGE, M. F.; HUGO, V. N. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: BRASPORT, 1999.

PINHEIRO, W. **A Corrente de Fuga como Parâmetro Indicativo do Estado de Degradação de Materiais Poliméricos de Rede Compacta de Média Tensão, Instalados em Ambientes Agressivos**. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

REZENDE, S. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. 1ª edição. Barueri, SP, 2005. 525 p.

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.

RODURFLEX. **The History of RODURFLEX® - Quite a Long Story Covering More Than 3 Decades**. Disponível na internet via URL: <http://www.lappinsulator.com/downloadcenter/catalogs.asp>. Arquivo capturado em Junho de 2014.

SIMÕES, M. G., SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Editora Blucher. São Paulo, 1999.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets**. Information and Control 8, p. 338–353. Universidade da Califórnia, Berkeley, Califórnia, 1965.

ZIMMERMANN, H. **Fuzzy Set Theory And Its Applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.