



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

YORKISMAR DE ANDRADE MENDONÇA

ANÁLISE DA CORRENTE DE FUGA DE ISOLADORES POLIMÉRICOS
PARA CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO COM
AUXÍLIO DE LÓGICA *FUZZY*

Campina Grande, Paraíba

Agosto de 2016

YORKISMAR DE ANDRADE MENDONÇA

ANÁLISE DA CORRENTE DE FUGA DE ISOLADORES POLIMÉRICOS
PARA CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO COM
AUXÍLIO DE 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

Agosto de 2016

FICHA CATALIGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- M539a Mendonça, Yorkismar de Andrade.
Análise da corrente de fuga de isoladores poliméricos para a classificação das condições de degradação com auxílio de lógica fuzzy / Yorkismar de Andrade Mendonça. – Campina Grande, 2016.
82.: il. Color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
“Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa”.
- Referências
1. Isoladores Poliméricos. 2. Degradação. 3. Monitoramento – Diagnóstico. 4. Corrente de Fuga. 5. Lógica *Fuzzy*. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.315.6(043)

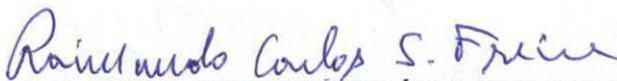
**"ANÁLISE DA CORRENTE DE FUGA DE ISOLADORES POLIMÉRICOS PARA
CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DEGRADAÇÃO COM AUXÍLIO DE LÓGICA
FUZZY"**

YORKISMAR DE ANDRADE MENDONÇA

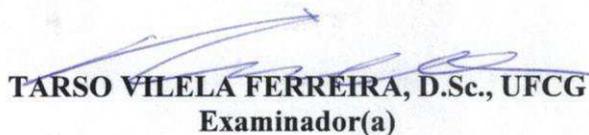
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/07/2016



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



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



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

CAMPINA GRANDE - PB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado o discernimento e tranquilidade nos momentos de dificuldade, me permitindo concluir mais esta etapa.

Agradeço também à minha família pela força nos momentos de fraqueza, pelas cobranças nos momentos certos, por está sempre do meu lado, e, acima de tudo por acreditarem que eu seria capaz. Essa conquista é nossa.

Agradeço à minha esposa, Keicy Rodrigues Mendonça, pela companhia, pela força e por está sempre me incentivando e acreditando no meu sucesso e se fazendo cada dia mais presente na minha vida.

Agradeço ao professor Edson Guedes pelo acolhimento como seu aluno, pela paciência e pelos inúmeros ensinamentos durante esse tempo de convivência, me tornando um profissional melhor, e sempre se dispondo para alcançarmos os melhores resultados.

Agradeço aos técnicos do LAT por toda a ajuda na montagem dos experimentos e pela disposição em sempre estar nos auxiliando no decorrer dos ensaios.

Agradeço aos companheiros de laboratório, Camila Guedes, Marcus Tullius Florentino, Renata Garcia, Bruno Almeida, Pedro Venske, Marconni Freitas, Antonio Neto, pelo apoio nos ensaios, pelos momentos de descontração, pela troca de experiências e pela ajuda no final deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos, sem citar nomes, por participar da minha luta durante esses anos. O apoio de todos é fundamental.

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

A todos, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo propor uma técnica que permita classificar isoladores poliméricos de acordo com a análise do sinal de corrente de fuga. Baseando-se na relação entre os harmônicos de baixa frequência, a técnica proposta busca determinar o grau de degradação dos isoladores, eliminando elementos interpretativos que são determinantes durante as inspeções visuais. Para isso, relacionou-se a componente fundamental, a terceira, a quinta e a sétima harmônica do sinal obtido durante os ensaios com amostras de isoladores poliméricos de 230 kV em diferentes estados de degradação de correntes do uso em campo. Usando a Transformada Rápida Fourier (FFT), obtiveram-se as amplitudes do sinal nas frequências desejadas, e diante destes resultados foi proposto um sistema lógico *fuzzy* para auxiliar na tomada de decisão. A técnica mostrou-se eficiente no ambiente do laboratório, e foi possível avaliar o quanto estado físico dos isoladores interfere na característica do sinal de corrente de fuga.

Palavras-chave: isoladores poliméricos, degradação, monitoramento e diagnóstico, corrente de fuga, lógica *fuzzy*.

ABSTRACT

This paper aims to propose a technique for classifying polymeric insulators according to the analysis of leakage current signal. Based on the relationship between the low frequency harmonics, the proposed technique seeks to determine the state of degradation of isolators, eliminating interpretative elements that are crucial in visual inspections. For this was related to the fundamental component, the third, the fifth and the seventh harmonic of the signal obtained during the tests on samples of polymer insulators of 230 kV in different degradation states arising from the use in the transmission lines. Using Fourier Fast Transformed (FFT), gave the signal amplitudes at the desired frequency, and on these results we proposed a fuzzy logic system to assist in decision making. The technique was effective in the laboratory, and it was possible to prove how much the behavior operative state of insulators interferes in the characteristics of the leakage current signal.

Keywords: polymeric insulators, degradation, monitoring and diagnostics, leakage current, fuzzy logic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação do isolador polimérico e seus componentes.	22
Figura 2: Bastão posicionado no molde (a) e após a aplicação do polímero(b).	23
Figura 3: Exemplos de superfícies hidrofóbicas.	24
Figura 4: Inspeção visual de linhas de transmissão utilizando helicópteros.....	27
Figura 5: Imagem da termografia de um isolador.....	28
Figura 6: Diagrama da medição de corrente de fuga utilizando resistência em série com o isolador.	30
Figura 7: Diagrama da medição da corrente de fuga utilizando uma bobina.....	30
Figura 8: Classificação da estatura de uma pessoa pela lógica clássica.....	34
Figura 9: Classificação da estatura de uma pessoa pela lógica <i>fuzzy</i>	34
Figura 10: Fluxograma dos sistema <i>fuzzy</i>	36
Figura 11: Conjunto de amostras dos ensaios.....	51
Figura 12: Representação do anel equalizador a ser utilizado nos ensaios.....	52
Figura 13: Diagrama da montagem da mísula projetada.....	54
Figura 14: Detalhe do isolador de bloqueio utilizado na montagem dos ensaios.	55
Figura 15: Fonte de tensão de 600 kV e sistema de medição.....	56
Figura 16: Montagem do arranjo experimental com isolador utilizado os ensaios.....	56
Figura 17: Diagrama elétrico da montagem.....	57
Figura 18.: Imagem gerada no osciloscópio durante os ensaios.....	58
Figura 19: Fotografia do isolador 01.....	61
Figura 20: Fotografia do isolador 03.....	62
Figura 21: Degradação da superfície protetora (a), poluição (b), e saias danificadas (c) encontradas no isolador 05.....	62
Figura 22: Saia danificada (a) e poluição moderada (b) no isolador 07.....	63
Figura 23: Poluição na região superior (a) e inferior (b) das saias.....	63
Figura 24: Poluição ao longo do isolador 10 (a). núcleo exposto ao lado do conector de fase (b) e saias rachadas ao longo do isolador (c).....	64
Figura 25: Poluição elevada (a) e núcleo exposto (b) no isolador 11.....	65
Figura 26: Saias danificadas do isolador 16.....	66

Figura 27: Gráfico da função de pertinência em função da Variável I1.	72
Figura 28: Gráfico da função de pertinência em função da Variável I2.	73
Figura 29: Gráfico da função de pertinência da variável de saída “Estado”.	74
Figura 30: Isolador 01 considerado Novo, com valor da $5^a/3^a = 5,66$ e $3^a/7^a = 1,81$	75
Figura 31: Isolador com a variável Estado igual à 8,88 (Crítico).	75
Figura 32: Resultado do isolador 03, I1=6,17, I2=7,00 e Estado = Médio.	76
Figura 33: Resultado do isolador 08, I1=6,26, I2=8,25 e Estado = Crítico.	76
Figura 34: Resultado do isolador 10, I1=5,84, I2=5,38 e Estado = Médio.	77
Figura 35: Resultado do isolador 07, I1=5,84, I2=2,16 e Estado = Médio.	77
Figura 36: Resultado do isolador 03, I1=6,17, I2=7,00 e Estado = Crítico.	78
Figura 37: Resultado do isolador com pior estado 9,14, I1=6,79, I2=5,29 e Estado = Crítico.	78
Figura 38: Classificação final dos isoladores.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos trabalhos desenvolvidos sobre os temas estudados.	47
Tabela 2: Isoladores classificados por características físicas.	66
Tabela 3: tabela de classificação dos isoladores pela inspeção visual.	67
Tabela 4: Amplitude das harmônicas corrente de fuga (em mA).	67
Tabela 5: Amplitude das harmônicas corrente de fuga normalizados.	68
Tabela 6: Relação entre das harmônicas corrente de fuga.	68
Tabela 7: Condições ambientais durante os ensaios.	69
Tabela 8: Valores das entradas por isolador.	71
Tabela 9: Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada I1.	72
Tabela 10: Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada I2.	73
Tabela 11: Comparação entre a classificação via lógica <i>fuzzy</i> e a inspeção visual.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
CHESF	–	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
DEC	–	Duração equivalente de interrupção por consumidor
DFS	–	<i>Discrete Fourier Serie</i>
DTFT	–	<i>Discrete-Time Fourier Transform</i>
EPDM	–	Etileno-Propileno-Dieno
EPR	–	<i>Ethilepropylene</i>
FEC	–	Frequência equivalente de interrupção por consumidor
FFT	–	<i>Fast Fourier Transform</i>
HTV	–	<i>High Temperature Vulcanized</i>
LAT	–	Laboratório de Alta Tensão.
RTV	–	<i>Room Temperature Vulcanized</i>
UFMG	–	Universidade Federal de Campina Grande.
UV	–	Ultravioleta.
VANT	–	Veículo Aéreo Não-Tripulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
2.3 Organização do trabalho.....	18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1 Isoladores poliméricos	21
3.2 Causas das falhas em isoladores poliméricos	25
3.3 Métodos de inspeção em isoladores	26
3.4 A medição de corrente de fuga como método de monitoramento de isoladores.....	28
3.5 Transformada de Fourier	31
3.6 Transformada Rápida de Fourier	32
3.7 Sistema <i>Fuzzy</i>	33
3.7.1 Conceitos	35
3.7.2 Estrutura do sistema <i>Fuzzy</i>	36
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
4.1 Monitoramento de isoladores poliméricos	38
4.2 Medição de corrente de fuga em isoladores poliméricos	44
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	51
5.1 Material.....	51
5.2 Métodos.....	52
5.2.1 Classificação dos isoladores via inspeção visual	53
5.2.2 Montagem do arranjo experimental e do circuito de medição	54
5.2.3 Realização dos ensaios	58
5.2.4 Processamento dos dados.....	58
5.2.5 Sistema <i>fuzzy</i> desenvolvido.....	59
6. RESULTADOS E ANÁLISES	61
6.1 Classificação dos isoladores via inspeção visual	61
6.2 Resultado das medições	67
6.3 Sistema <i>Fuzzy</i> desenvolvido.....	70
7. CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1. INTRODUÇÃO

A cada dia a energia elétrica torna-se mais fundamental à sociedade e inúmeros equipamentos que utilizam dela já se tornaram indispensáveis no nosso dia-a-dia. Visando o conforto dos usuários residenciais e também o pleno funcionamento das plantas industriais, o sistema elétrico deve apresentar alto grau de confiabilidade e disponibilidade para todos os clientes. Assim, as empresas concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica acerbam-se de diversas medidas preventivas, para que seus equipamentos possam funcionar de forma eficiente e dentro dos padrões de qualidade exigidos, embora nem sempre seja possível consegui-los. Promovem então, sempre que possível, a manutenção preditiva e/ou preventiva, e quando necessário, realizam a substituição dos equipamentos defeituosos.

Dentre os diversos equipamentos monitorados, estão os isoladores. Nos sistemas de transmissão de energia elétrica, eles têm como função sustentar mecanicamente as linhas, isolá-las eletricamente de partes aterradas (torres de transmissão, pessoas, vegetação e solo), e das outras fases do circuito. Os isoladores necessitam de um cuidado especial, pois na maioria dos casos uma falha no isolamento ou na sustentação dos cabos resulta no desligamento da linha. Essas faltas impactam diretamente nos indicadores de qualidade da transmissão, como a duração equivalente das interrupções (DEC) e a frequência equivalente das interrupções (FEC), que são auditados frequentemente pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), seguindo procedimentos específicos e padrões rígidos.

Ao longo da história, vidro e cerâmica foram os primeiros materiais utilizados em larga escala como matéria-prima na fabricação dos isoladores. Contudo, nas últimas décadas, isoladores à base de polímero ou isoladores não-cerâmicos estão sendo aplicados em larga escala nos sistemas de alta tensão devido as vantagens que apresentam perante os demais tipos.

Peso reduzido, hidrofobicidade superficial elevada, resistência aos choques mecânicos e o bom funcionamento em ambiente com elevado índice de poluição

são algumas das características que fazem com que os isoladores poliméricos sejam utilizados largamente.

Contudo, não se sabe ao certo os sintomas que indicam uma possível falha, ou como avaliar e quantificar o seu grau envelhecimento. Para atuar sobre esse problema é necessário entender os conceitos básicos partindo do processo de fabricação dos isoladores poliméricos até o fim de sua vida útil, sendo de fundamental importância identificar as causas dos defeitos, suas consequências e como mitigá-las.

Assim, o objetivo deste trabalho é, a partir de dados obtidos em ensaios de medição da corrente de fuga e da análise das componentes harmônicas em isoladores poliméricos, desenvolver um método que possibilite a caracterização do grau de degradação do isolador com o auxílio de um sistema computacional baseado na lógica *fuzzy*.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um método que possibilite a classificação do estado de degradação dos isoladores poliméricos utilizados em linhas de transmissão de 230 kV, a partir dos dados obtidos nas medições de corrente de fuga e do estudo das componentes harmônicas durante a realização de ensaios de tensão nominal em ambiente de laboratório.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar o tratamento dos dados e obter as variáveis mais significativas de cada medição;
- Correlacionar os dados de corrente de fuga com as características físicas dos isoladores;
- Utilizar uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões baseada na lógica *fuzzy* que permita classificar os isoladores de acordo com as suas características físicas, servindo assim para quantificar o nível de degradação do isolador.

2.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está estruturada da seguinte forma.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre os assuntos que são abordados no trabalho. Dentre eles, os principais conceitos sobre os isoladores poliméricos, métodos de inspeção em isoladores, métodos de análise no domínio da frequência, e a lógica *Fuzzy*.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica apresentando os trabalhos mais relevantes nas áreas de inspeção de isoladores poliméricos, análise de corrente de fuga e suas componentes harmônicas.

No Capítulo 4 são descritos material e métodos empregados nas medições realizadas em laboratório, na análise dos dados do sinal de corrente e do sistema *fuzzy* desenvolvido.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a medição da corrente de fuga e a análise no domínio da frequência. Será mostrado também as associações entre as características físicas e as harmônicas do sinal, além disso, será apresentado como foram desenvolvidas as regras do sistema *fuzzy* e a compatibilidade entre os resultados gerados pelo sistema e obtidos pela inspeção visual.

E, por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as propostas para a continuidade da linha de pesquisa.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os isoladores são elementos críticos nos processos que envolvem energia elétrica, principalmente para os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Em tais situações, além de isolar eletricamente os condutores das partes aterradas e das outras fases, os isoladores suportam os esforços mecânicos provocados pelo peso dos cabos e pelas condições climáticas, assegurando que as partes energizadas estejam firmemente presas e longe do contato com diferentes potenciais. Dessa maneira, seu bom funcionamento é de fundamental importância para a estabilidade do sistema, mas, ainda assim, de acordo com Garcia et al., 2003, mais de 60% dos desligamentos das linhas de transmissão, que operam com tensão maior ou igual a 230 kV, são causados por falhas nos isoladores.

Os isoladores vêm sendo utilizados em sistemas de alta tensão desde o século XIX ou basicamente desde o surgimento dos sistemas elétricos, inicialmente sua matéria-prima usada na isolação era a madeira, e posteriormente passou-se a utilizar o vidro e a porcelana, que apesar de predominarem durante décadas, há cerca de 40 anos passaram a ser substituídos por materiais poliméricos (SOUSA, 2006). Ao longo dos últimos anos, inúmeros estudos buscam desenvolver novos polímeros que permitam aperfeiçoar o funcionamento dos isoladores nos mais variados, mitigando cada vez mais os defeitos. O principal motivo da substituição dos isoladores de vidro e porcelana por isoladores poliméricos é a facilidade na instalação devido ao seu peso ser bem menor, e, além disso, por vir respondendo de forma satisfatória às condições técnicas do sistema elétrico (AMIN, 2006), apesar de apresentarem falhas antes não observadas.

Como a quantidade das falhas do sistema e o tempo de duração das mesmas são indicadores da qualidade de operação e do próprio sistema elétrico, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), principal órgão regulamentador do governo no setor, força as empresas responsáveis pelo fornecimento de energia a manter esses indicadores sempre controlados mantendo o sistema mais estável, e protegendo assim o consumidor contra possíveis problemas devido à falta de fornecimento de energia. De acordo com o Manual de Fiscalização da Transmissão da ANEEL, além de arcar com os danos causados pela falha, as concessionárias

podem pagar multa diretamente proporcional ao faturamento anual da empresa, gerando um grande prejuízo nas finanças (ANEEL, 2004). Para sistemas de transmissão o impacto das falhas é ainda maior, já que resultam na falta de fornecimento de energia elétrica para milhares de consumidores.

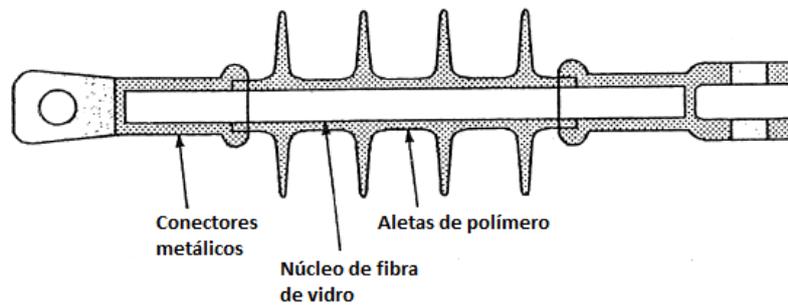
A causa mais significativa dos problemas observados em isoladores de vidro instalados nas linhas de transmissão de alta tensão é a prática do vandalismo (YANAGUIZAWA e SHINOHARA, 2011). O restante dos problemas ocorre devido à falta manutenção ou às falhas do processo de fabricação dos isoladores. Com isoladores poliméricos o cenário muda e as falhas também, durante seu funcionamento a principais causas é a fratura do núcleo. Ela pode ser consequência tanto de falhas construtivas inseridas na própria fabricação quanto pelo processo de degradação do polímero (KUMOSA et al., 2005). Alguns modelos para este tipo de fratura são sugeridos por (KUMOSA et al., 2004a) na busca de simular as condições de falha dos isoladores poliméricos.

Sendo assim, entender o processo de fabricação dos isoladores poliméricos e os possíveis motivos de suas falhas é a base para entender seu funcionamento e também para conseguir identificar os problemas existentes.

3.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Uma grande evolução da indústria na fabricação dos isoladores foi o uso de polímeros. Geralmente feitos de silicone, polipropileno, ou de EPR (*ethylenepropylene*), tais materiais apresentam vantagens em relação à cerâmica e ao vidro, tanto na fabricação quanto no uso prático (GORUR *et al.*, 1999). Os isoladores poliméricos podem ser divididos em três partes: o núcleo de fibra de vidro, as saias e os conectores de metal, como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Representação do isolador polimérico e seus componentes.



Fonte: Adaptado de GORUR *et al.* (1999).

Cada parte do isolador é fabricada separadamente, a partir de processos bem distintos, e por fim são unidas. O processo segue conforme descrito a seguir:

Fabricação do núcleo

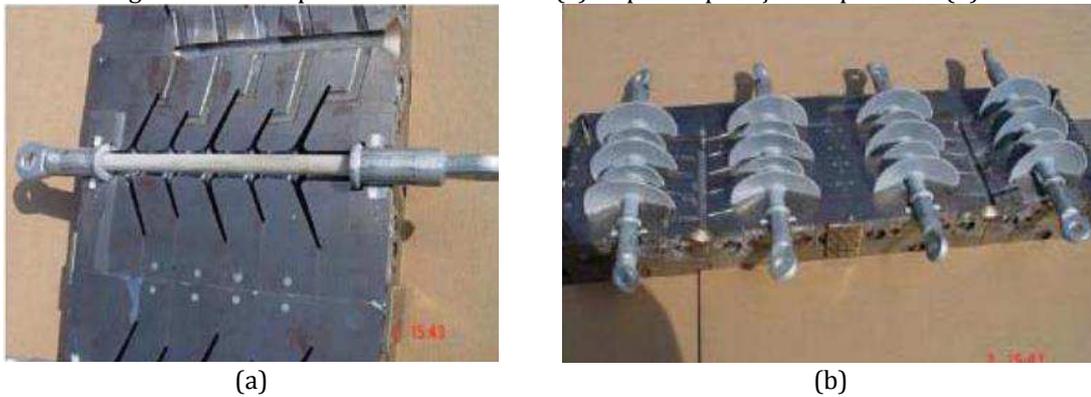
O núcleo é a principal parte do isolador sendo responsável por absorver os esforços mecânicos, e fornecer a resistência física necessária para suportar o peso dos condutores, garante ainda que o isolamento elétrico seja suficiente para que as partes energizadas se mantenham isoladas dos pontos aterrados. Podendo ser ocos ou maciços, os núcleos são produzidos mergulhando fibra de vidro em resina, no sentido longitudinal do isolador para se garantir a máxima resistência à tração, aquecendo-o e moldando-o geralmente na forma desejada de bastões, só então são cortados nas dimensões do isolador.

Durante o resfriamento da fibra, a temperatura a que foi submetida e a velocidade que esfria são fatores críticos para o surgimento dos problemas no núcleo dos isoladores. Quando as camadas externas esfriam de forma mais rápida que as internas, a cura do núcleo não é uniforme, formando-se regiões mais frágeis suscetíveis à futuras rachaduras, e conseqüentemente à fratura do núcleo, principal motivo das falhas. Além disso, as resinas não reagem bem à umidade, o núcleo deve ser mantido isolado do contato com o ar.

Fabricação das saias

As saias têm como principal função isolar o núcleo contra as intempéries do meio ambiente aumentar a distância de escoamento entre o terminal energizado e o aterrado, além disso, devem aumentar a distância de escoamento entre o terminal energizado e o aterrado. No processo de fabricação é comum a utilização do método de vulcanização, no qual o composto polimérico é aquecido a altas temperaturas e injetado em moldes com auxílio de máquinas extrusoras ou injetoras, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Bastão posicionado no molde (a) e após a aplicação do polímero(b).



Fonte: PROTZEK, *et al* (2010)

Um dos polímeros utilizados nos isoladores é o EPDM, material formado a partir da mistura de etileno, propileno e dieno. Ele possui propriedades que o tornam uma excelente opção para ser utilizado na fabricação de isoladores, tais como: resistência à intempéries, ao calor e à oxidação; boa flexibilidade; alto isolamento elétrico; e fácil processamento (PROTZEK *et al.*, 2010).

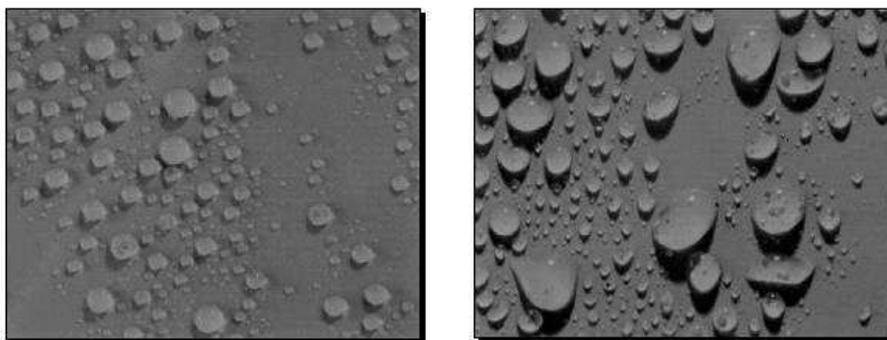
Montagem

Nesta etapa o núcleo, as aletas e os conectores metálicos são acoplados. O núcleo pode ser unido às saias via fricção ou utilizar colas à base de silicone. As partes metálicas podem ser fixadas via colagem, compressão ou cunha. O processo de união das partes deve ter grande atenção durante a fabricação, pois, falhas nesses passos podem fragilizar as propriedades físicas do isolador ou até mesmo não isolar o núcleo dos fatores externos.

O uso de materiais mais leves e com propriedades elétricas e mecânicas próprias para desempenhar sua função, fazem os isoladores poliméricos ter hoje domínio de uma boa parcela no mercado. Dentre as vantagens mais significativas pode-se listar:

- Peso reduzido: usando-se como exemplo uma cadeia de isoladores de vidro para 230 kV que têm aproximadamente 11 isoladores, cada um pesando cerca de 3,8 kg baseado nos utilizados em Ferreira, 2011, resultam em um equipamento com 41,8 kg. Para a mesma tensão nominal, um isolador polimérico pesa cerca de 8,8 kg, ou seja, quase cinco vezes mais leve. Isso resulta na redução de custo no transporte, na construção das torres, além de facilitar na troca do isolador, diminuindo também os custos de manutenção.
- Hidrofobicidade elevada: a hidrofobia é a capacidade de repulsão à água dos materiais. Em isoladores essa característica está presente no revestimento de polímero, e impede a formação de filetes de água na superfície do material isolante, como mostrado na
- Figura 3. Esta propriedade é de grande importância, pois os filetes geram caminhos de baixa resistência para a corrente, possibilitando a formação de descargas superficiais até à ruptura completa do isolamento (THOMAZINI, 2009). No caso do EPDM, tem-se uma diminuição no nível de hidrofobia, além disso, sua estrutura molecular não permite a regeneração da hidrofobia após a perda parcial (QUEIRÓS, 2013).

Figura 3: Exemplos de superfícies hidrofóbicas.



Fonte: THOMAZINI (2009).

- Bom funcionamento sob poluição: além do aumento da distância de escoamento, a hidrofobia dificulta a que a água reaja com as cargas e elétrons livres dos poluentes, sendo assim, diminui-se a quantidade de regiões com concentração de campo elétrico. Como nessas regiões ocorrem descargas que degradam o polímero, diminui-se a possibilidade de danos à estrutura do isolador, devido a isso os isoladores funcionam bem em ambientes com forte poluição (JIANG *et al.*, 2008).
- Resistência ao vandalismo: o material utilizado nas aletas apresenta resistência mecânica elevada, principalmente à deformação e aos choques mecânicos. Por esse motivo, diferentemente do vidro, elas não estilhaçam, desmotivando até a ação dos vândalos.

Apesar das vantagens apresentadas, nos processos que utilizam materiais poliméricos ainda é comum falhas que levam à interrupção do fornecimento. Um dos principais problemas a ser resolvido é determinar o nível de envelhecimento do isolador, que é acelerado devido às condições climatológicas (GUBANSKI *et al.*, 2000) e aos estresses elétricos sofridos pelo material, que alteram suas propriedades (REYNDERS *et al.*, 1999).

3.2 CAUSAS DAS FALHAS EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

As falhas nos isoladores podem ocorrer por defeitos gerados desde o processo de fabricação, até a mudança das características físicas e químicas do isolador após sua instalação resultante da exposição aos ventos, chuvas, e radiação UV.

Dentre os defeitos ocorridos na fabricação pode-se elencar: a quebra completa do isolador resultante da falha na união dos componentes, ao surgimento bolhas ou ao excesso de material nas aletas que geram distorções do campo elétrico, quebra ou trilhamento do núcleo que pode ser resultante de uma selagem mal feita, além de outros problemas. Para que esses problemas não aconteçam,

deve-se ter no processo produtivo um controle de qualidade rigoroso e utilização de materiais de boa qualidade (GORUR et al. 1999).

Mesmo após ser produzido, durante o armazenamento, o transporte, e a instalação do isolador, ainda é possível inserir falhas ao equipamento. Danos às estruturas das aletas e do núcleo podem acontecer, diminuindo a vida útil e gerando um ambiente propício ao aparecimento de descargas parciais.

Ainda depois de instalados, sabe-se que os materiais que compõem os isoladores sofrem mudanças na sua composição química seja pela incidência de campo elétrico ou pela interação com o meio ambiente. Diversos fatores aceleram o envelhecimento do isolador: a radiação ultravioleta, por exemplo, quebra as ligações entre as moléculas do polímero resultando na perda das características hidrofóbicas; a poluição junto com a umidade permite que a formação de bandas secas que degradam a superfície do isolador e permite a entrada de umidade no núcleo (KUMOSA et al., 2004b)(GORUR et al., 1996)(BEZERRA, 2012); e até chuvas ácidas que degradam a superfície hidrofóbica (WANG et al., 1997), resultando na ruptura em alguns casos.

O processo de degradação envolve todas essas reações anteriormente citadas acontecendo em paralelo, e resulta na maioria dos casos em modificações físicas da estrutura do isolador, por isso, os isoladores devem ser sempre inspecionados e os tipos de inspeções cada vez se tornam mais variados.

3.3 MÉTODOS DE INSPEÇÃO EM ISOLADORES

Atualmente a inspeção visual ainda tem predominância no que se diz respeito à avaliação dos isoladores em campo, a principal justificativa é por ser um método barato e que utiliza equipamentos de baixo custo. Um colaborador bem treinado e um conjunto de binóculos são suficientes para realizá-la, sendo o primeiro o principal instrumento do processo, já que é a sua experiência que determina a efetividade da inspeção. Durante a realização da inspeção busca-se encontrar características do isolador que diferem do que é considerado aceitável. Deformações, oxidação e até a mudança na cor do isolador são pontos de atenção, mas ainda são parte de um diagnóstico interpretativo e com alta dependência da experiência da pessoa que o faz. Em alguns casos, é possível visualizar a presença de efeito corona na superfície dos isoladores, o que facilita o diagnóstico.

A inspeção visual evoluiu a ponto de utilizar veículos aéreos não-tripulados, ou VANT, e até helicópteros de alta tecnologia e colaboradores altamente treinados, na busca de realizá-la de forma mais rápida e segura conforme mostrado na Figura 4.

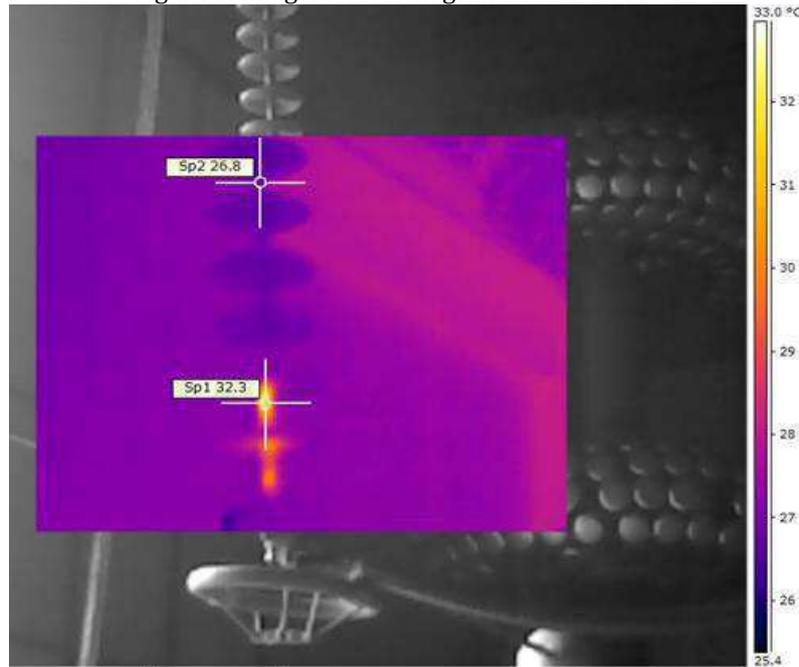
Figura 4: Inspeção visual de linhas de transmissão utilizando helicópteros.



Fonte: <http://www.ice.unifei.edu.br/ramos/UAV/justificativa.php>

Com os avanços tecnológicos, novos métodos vêm ganhando espaço nas inspeções, dentre eles destacam-se a termografia e a detecção de efeito corona (COSTA, 2007). A termografia busca detectar regiões de aquecimento ao longo do corpo dos isoladores, a técnica permite com o uso de câmeras especiais visualizar artificialmente as ondas do espectro ultravioleta (SOUZA, 2016), e assim determinar a temperatura dos pontos, conforme mostrado na Figura 5. Já a câmera de detecção de corona, eletronicamente sobrepõe as imagens produzidas pela câmera de luz visível e a imagem dos raios ultravioletas produzidos pelas descargas corona. Além disso, alguns modelos contabilizam a quantidade de pontos de descarga no momento da inspeção (GUEDES, 2015).

Figura 5: Imagem da termografia de um isolador.



Fonte: SOUZA, 2016.

A utilização de métodos que usam a corrente de fuga como variável para a análise também vem sendo testada em laboratório (LIRA, 2007) e em campo, obtendo resultados satisfatórios (PINHEIRO, 2008), e a utilização das informações fornecidas pelos dados das harmônicas vêm sendo estudadas tanto em relação à componente fundamental e à poluição (EL-HAG, *et al.* 2003) quanto em relação às harmônicas de baixa frequência (BASHIR, 2010). O trabalho proposto pretende contribuir nessa área, e a partir da análise das componentes harmônicas da corrente de fuga relacioná-las com o estado físico do isolador.

3.4 MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA COMO MÉTODO DE MONITORAMENTO DE ISOLADORES

Corrente de fuga é a expressão utilizada para denotar a corrente elétrica em um material isolante quando submetido a uma diferença de potencial. Em um isolador ideal a corrente de fuga deveria ser nula, mas se sabe que na prática isso não acontece.

Quando poluídos, os isoladores apresentam um potencial elevado para o surgimento de falhas e a provável interrupção do fornecimento de energia elétrica. Isso porque quando são expostos a umidade, os resíduos poluentes depositados na superfície dos isoladores podem ser dissolvidos, produzindo assim, cargas livres

(elétrons e íons) e conseqüentemente uma camada de menor resistividade. O aumento da corrente de fuga aumenta as perdas, provocando aquecimento da superfície do isolador. Caso exista a presença de água na superfície do isolador, ocorre uma concentração maior de campo elétrico. Com a intensificação do campo, descargas superficiais ocorrem e provocam o aquecimento do local. O calor gerado provoca a queima do material isolante a base de carbono e o trilhamento. Esse fenômeno é conhecido como bandas secas.

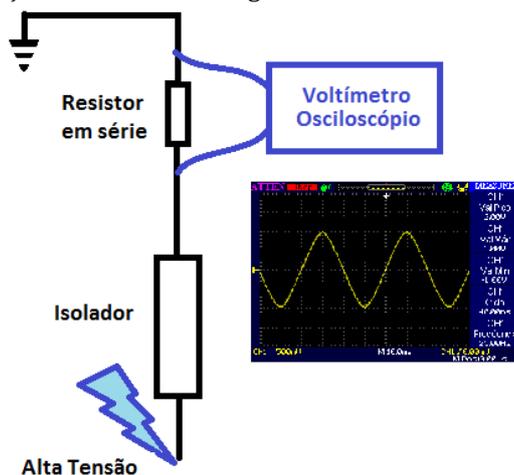
As descargas também geram fissuras no polímero que reveste o núcleo, a partir desse caminho a umidade e a poluição reagem com os componentes químicos da resina gerando a fragilidade do núcleo gerando, por fim, o trilhamento do núcleo que pode conduzir a ruptura do isolamento por completo e conseqüentemente a falha no sistema.

Devido as suas características, a presença de umidade e as camadas de poluição dos isoladores, o equipamento apresenta características não-lineares (GORUR, 1999). Por apresentar características não-lineares a camada de poluição, sob efeito do campo elétrico, gera componentes harmônicas no sinal de corrente de fuga. Além disso, outra característica do sinal de corrente é o adiantamento em relação ao sinal de tensão, ou seja, há uma componente capacitiva bem evidente.

A amplitude do sinal de corrente de fuga, as harmônicas presentes e suas amplitudes e as relações entre elas fornecem informações para o monitoramento de isoladores. Como o monitoramento de todos os isoladores pode ser um investimento muito alto para as concessionárias de energia, já se busca o desenvolvimento de sensores de baixo custo. A INMR propõe um sensor que possa ter um baixo custo de instalação com robustez na captura de várias variáveis do sistema e, além disso, que possibilite uma comunicação *wireless* facilitando ainda mais o monitoramento (INMR, 2016).

Um dos métodos mais comuns para medição de corrente de fuga é a utilização de resistências de derivação, mostrado na Figura 6. Nessa configuração é ligado um resistor em série à amostra, como o valor dessa resistência é conhecido ao se medir a tensão, determina-se o valor da corrente no isolador. O valor da resistência deve ser escolhido de acordo com a sensibilidade o aparelho a ser utilizado na medição e devem-se tomar medidas para proteção dos envolvidos e dos equipamentos.

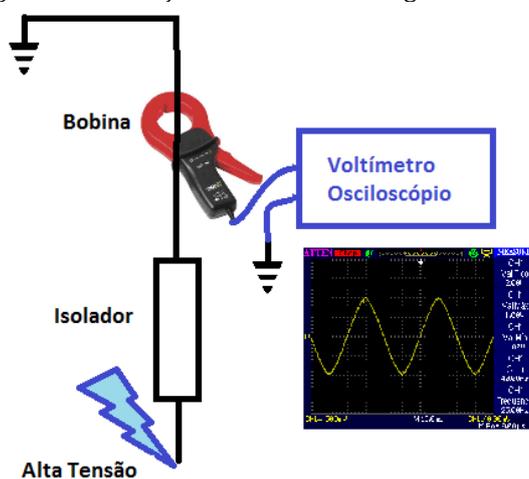
Figura 6: Diagrama da medição de corrente de fuga utilizando resistência em série com o isolador.



Fonte: Próprio Autor.

Pode utilizar também um transformador de corrente (alicate amperímetro) para que seja medida a corrente de fuga em isoladores. Para isso é inserida a bobina ao redor do condutor e por indução magnética gera-se sinal de tensão proporcional à corrente de fuga do isolador, conforme ilustrado na Figura 7. O problema dessa configuração é que se insere ruído eletromagnético no sinal de saída.

Figura 7: Diagrama da medição da corrente de fuga utilizando uma bobina.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com Oliveira, (2008), os resultados dos dois métodos são concordantes e convergem para resultados similares. Desse modo, usou-se nesta dissertação o resistor de derivação pela sua maior facilidade na aplicação.

3.5 TRANSFORMADA DE FOURIER

A transformada de Fourier foi desenvolvida como um método para análise de sinais diferenciáveis no domínio da frequência. Em resumo, ela transforma um sinal contínuo em uma integral ou somatório de funções senoidais multiplicadas por coeficientes que representam suas amplitudes.

A forma mais compacta de representar a série de Fourier na sua forma discreta é pelo somatório mostrado na Equação 1 e 2:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (1)$$

em que,

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{jn\omega_0 t} dt \quad (2)$$

ω_0 = frequência fundamental do sinal.

Pode-se então representar a série pela soma de funções senoidais representadas na Equação 3, com coeficientes determinados nas Equações 4, 5 e 6.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)] \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (4)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (5)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (6)$$

Para sinais periódicos podem-se definir os coeficientes de c_n da série da seguinte forma:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{jn\omega_0 t} dt \quad (7)$$

Quando $T \rightarrow \infty$ significa que a frequência se torna cada vez menor, variando de acordo com os múltiplos da frequência ω_0 e $c_n \rightarrow \infty$, sendo assim a transformada de Fourier pode ser representada da seguinte forma:

$$F(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{j\omega t} dt \quad (8)$$

3.6 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Além da forma descrita anteriormente, também existe a versão discreta da transformada de Fourier (DTFT), proveniente da série discreta de Fourier (DFS). A DFS considera uma sequência de valores que obedecem a seguinte regra:

$$\tilde{x}[n] = \tilde{x}[n + rN], \quad (9)$$

em que, N é o período e r um valor inteiro.

A frequência fundamental no caso discreto é dada por:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{N} \quad (10)$$

E, analogamente ao caso contínuo, a sequência de valores pode ser descrita por uma soma de exponenciais complexas, ou senos e cossenos, multiplicadas por uma constante:

$$\tilde{x}[n] = \sum_k \frac{\tilde{X}_k}{N} e^{j\omega_0 kn} \quad (11)$$

Considerando que $k = [0, N - 1]$, tem-se as função que representam a DTFT e os coeficientes dela nas Equações 12 e 13.

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] e^{j\omega_0 kn} \quad (12)$$

$$\tilde{X}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j\omega_0 kn} \quad (12)$$

Para minimizar o esforço computacional realizado para os cálculos dos coeficientes da DTFT, J. W. Cooley e J. W. Tukey propuseram em 1960 o algoritmo hoje conhecido como a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

O método proposto consiste em dividir a transformada em duas outras de dimensão $N/2$, formada pelos componentes pares e ímpares do conjunto inicial. Sendo usada de forma recursiva, chega-se ao ponto de se ter apenas um elemento em cada conjunto. Assim, durante o cálculo da FFT se tem uma progressiva mudança da dimensão das transformadas e os termos são reutilizados nos cálculos (BARONI, 2008).

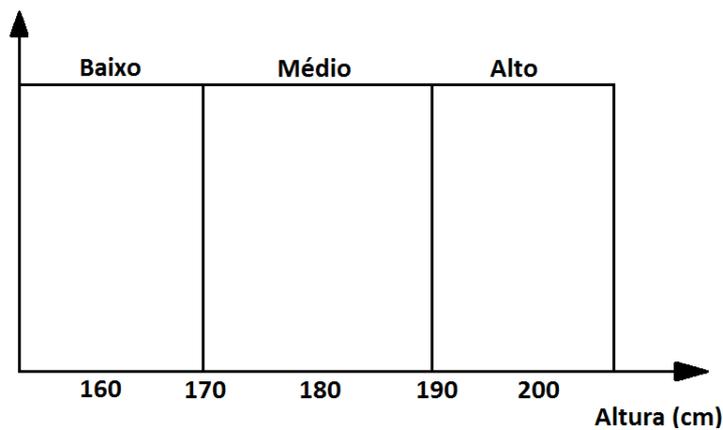
Os dados são então reordenados de acordo com a divisão das transformadas, e depois se calcula os valores das transformadas menores relacionando-as com as transformadas de potência maior. De acordo com SCURI, 1994, apesar da alta complexidade do algoritmo, a FFT apresenta um esforço computacional menor do que o cálculo direto da DTFT.

Neste trabalho usou-se a FFT para análise dos sinais de corrente de fuga. Isto porque em sistema de monitoramento em tempo real necessita-se de uma resposta rápida e que exija pouco esforço computacional. Como este trabalho busca propor um método de análise que se encaixa em sistemas de monitoramento desse modelo, já se utilizou este método de análise no domínio da frequência.

3.7 SISTEMA FUZZY

A lógica clássica trata os elementos questionados pela álgebra booleana, ou seja, sim ou não (1 ou 0). Isso significa que um elemento só pode pertencer a um conjunto apenas. Um exemplo clássico diz respeito à altura das pessoas, estas são classificadas basicamente em três tipos de estatura: baixa, média e alta, e nunca uma pessoa pode pertencer a duas classificações ao mesmo tempo. Ou seja, baseado no gráfico da Figura 8, se uma pessoa tem 1,87 metros ela é apenas de estatura média.

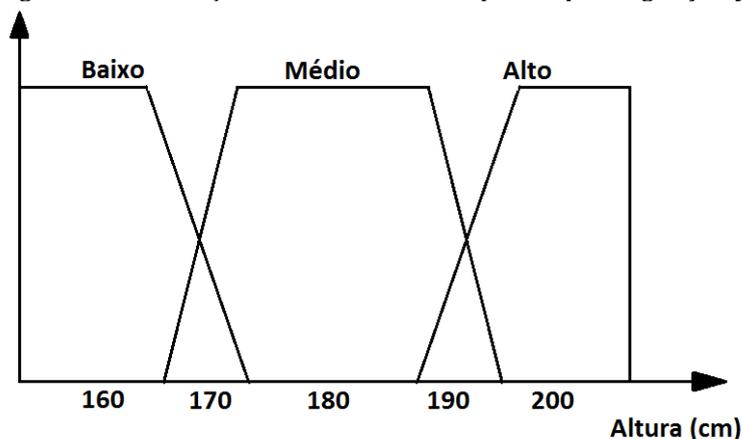
Figura 8: Classificação da estatura de uma pessoa pela lógica clássica.



Fonte: Próprio autor.

Com o sistema lógico *fuzzy*, criado pelo matemático Lofti A. Zadeh na década de 60, a interpretação do dado pode assumir outras denominações. Por exemplo, uma pessoa com 1,87 m de altura pode ser considerada “pouco alta”, ou uma pessoa com 1,50 m ser considerada “muito baixa”, e até mesmo ser considerada “medianamente alta” e “pouco alta” ao mesmo tempo (GOMIDE, 1994), como mostrado na Figura 9. Ou seja, pelo sistema *fuzzy*, pode-se interpretar o quantitativo do dado de forma mais qualitativa, semelhante às variáveis usadas na comunicação humana e até mesmo do meio que o interpreta, convertendo a experiência humana em um dado compreensivo aos sistemas computacionais.

Figura 9: Classificação da estatura de uma pessoa pela lógica *fuzzy*.



Fonte: Próprio autor.

Quando se utiliza o mesmo raciocínio da lógica booleana para classificação de isoladores, não é possível concluir que o isolador estaria “um pouco degradado”,

ou que ele pode operar por “um pouco mais de tempo” até a sua troca. Isso mostra que para problemas mais complexos, a lógica clássica não é tão eficaz, e ao usá-la para interpretar o estado de degradação do isolador, o resultado seria degradado ou não degradado, sem conseguir considerar o avanço da degradação. Por isso, neste trabalho, foi utilizada a lógica *fuzzy* para auxiliar na classificação dos isoladores de acordo com seu estado de degradação a partir dos dados obtidos na medição da corrente de fuga.

3.7.1 Conceitos

Alguns conceitos básicos da lógica *fuzzy* serão apresentados a seguir.

Conjuntos fuzzy

Os conjuntos *fuzzy*, diferentemente dos conjuntos clássicos, possuem uma transição mais suave entre as classificações, conforme mostrado anteriormente na Figura 9, ou seja, considerando que $\mu(x)$ é o grau de pertinência de um elemento a um conjunto, e pode ter os seguintes resultados:

$\mu(x) = 1$, quando o elemento pertence totalmente ao conjunto;

$0 < \mu(x) < 1$, quando pertence parcialmente, e;

$\mu(x) = 0$, quando o elemento não pertence ao conjunto.

Função pertinência

A função pertinência determina o grau de pertinência $\mu(x)$ do elemento x , ou seja, calcula a probabilidade do elemento pertencer a um conjunto utilizando valores numéricos, geralmente entre 0 e 1. É esta função que diferencia a lógica *fuzzy* da lógica clássica, enquanto na primeira $\mu(x) = [0,1]$, na segunda ou $\mu(x) = 1$, ou $\mu(x) = 0$.

Tais funções podem assumir diferentes formas a depender do problema estudado. No trabalho desenvolvido, usaram-se apenas funções triangulares e trapezoidais, que de acordo com Guedes (2015), apresentam maior eficiência computacional.

Variáveis Linguísticas

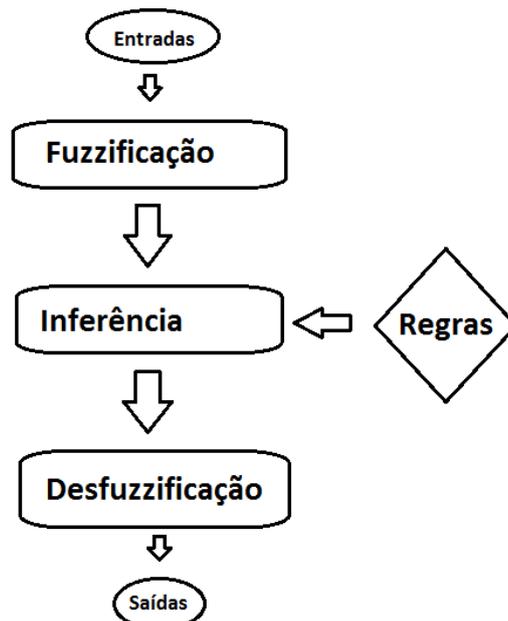
As variáveis linguísticas são os termos usados na classificação ou os nomes dados aos conjuntos *fuzzy*, ou seja, quando se diz que o estado de degradação do

isolador é “baixo”, atribuí à variável o valor “baixo” como consequência das variáveis analisadas.

3.7.2 Estrutura do sistema *Fuzzy*

A estrutura do sistema *fuzzy* consiste no fluxo mostrado na Figura 10, e detalhado a seguir.

Figura 10: Fluxograma dos sistema *fuzzy*.



Fonte: Adaptado de Guedes (2015).

Fuzzificação

A *fuzzificação* é o processo em que se é obtido o grau de pertinência da variável de entrada para cada conjunto *fuzzy*. É nessa fase que a experiência do especialista que a programa se faz extremamente necessária para que as variáveis linguísticas sejam atribuídas às entradas, e que suas funções de inferência sejam quantificadas. Em outras palavras, o conhecimento do problema vai determinar quais os valores de referência devem ser utilizados para se classificar a entrada, e assim atribuir seu valor linguístico.

Inferência

Nesta fase os resultados obtidos da *fuzzificação* são analisados de acordo com as regras definidas, resultando em um valor dentro do conjunto *fuzzy* de saída. As regras são relacionadas por diferentes métodos, dentre eles dois se destacam: o método de Takagi-Sugeno-Kang que é baseado em regras lógicas, e o modelo de Mamdani que se baseia na relação “se-então”, ou seja, a partir dos resultados dentro do conjunto *fuzzy* da entrada, determina-se o resultado da saída.

Desfuzzificação

Na última etapa é atribuído um valor numérico para a variável linguística determinada pelas regras de inferência.

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica, descrevendo as características dos isoladores poliméricos. Também se descreveu os princípios básicos da transformada de Fourier e da lógica *fuzzy*. No próximo capítulo será feita uma revisão bibliográfica visando apresentar os trabalhos mais relevantes sobre a aplicação da medição de corrente fuga em isoladores elétricos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica, visando apresentar as pesquisas mais relevantes na área de monitoramento de isoladores poliméricos, medição de corrente de fuga de isoladores e utilização de ferramentas auxiliares de tomada de decisão. Além disso, também são apresentadas as contribuições das pesquisas.

4.1 MONITORAMENTO DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

Neri (2005), em sua dissertação avaliou as técnicas de monitoramento via descargas parciais e termovisão, para os ensaios utilizou seis isoladores poliméricos para linhas de 69 kV. O autor buscou simular o que ocorre em campo inserindo cinco defeitos diferentes e expôs as amostras a um processo de envelhecimento acelerado.

Após a realização dos ensaios a seco e sob névoa, e a simulação de campo elétrico via *software*, o autor pôde concluir que no isolador que estava perfeito não ocorreu descargas parciais em quantidade significativa e que a termovisão não detectou pontos quentes em um longo prazo. Já nos isoladores com defeito, foi possível observar variação de temperatura significativa e o aumento da intensidade de descargas. Além disso, o autor observou que em situações de maior umidade também houve o aumento das descargas e a elevação da temperatura nos pontos de defeito.

Sendo assim, Neri (2005) concluiu que as descargas corona estão diretamente ligadas aos defeitos externos do isolador, sendo eles causados pelo uso em campo ou por falhas na fabricação. Dadas as observações, o autor também concluiu que a medição das descargas parciais tem seu resultado comprometido em ambientes de umidade elevada e com alta intensidade de poluição. Por fim, aponta que a utilização das duas técnicas produz resultados promissores, mas testes em campos devem ser realizados para comprovar sua real eficácia, já que não são só essas as falhas nos isoladores.

Ferreira (2007), na sua dissertação, analisou a principal causa das falhas em isoladores poliméricos instalados em linhas de transmissão, o trilhamento do núcleo. Complementarmente, realizou ensaios com diferentes configurações do

anel equalizador recomendado pelo fabricante, propondo até um modelo de anel influenciasse de forma mais significativa a intensidade do efeito corona em isoladores de 230 kV. Em resumo, os resultados de Ferreira (2007) constatavam que:

- Os principais indícios que atuam diretamente no surgimento e na propagação do trilhamento do núcleo são as descargas corona e a temperatura superficial do isolador.
- O anel equalizador diminuiu significativamente a intensidade das descargas corona principalmente nos isoladores mais envelhecidos, embora o gradiente térmico do isolador não seja influenciado de forma significativa pelo uso do anel.
- A influência do anel indicado pelo fabricante tem os melhores resultados quando instalados em isoladores novos, não apresentando resultados satisfatórios em isoladores mais desgastados.
- O posicionamento do anel não influenciou de forma significativa os padrões de descargas e temperatura.
- O anel projetado obteve resultados similares independente do estado de degradação do isolador, demonstrando melhor estabilidade.

Em relação ao trilhamento do núcleo, Ferreira (2007) então pôde concluir que mesmo com resultados promissores, para uma melhor compreensão do fenômeno deve-se ter uma maior exposição à alta tensão, e que a presença de umidade entre o núcleo e o revestimento polimérico é um fator de risco para o surgimento do trilhamento. Complementarmente, o autor também concluiu que a lavagem dos isoladores deve ser periódica e que um sistema de equalização influencia diretamente na operação do equipamento e que o modelo de anel projetado e experimentado é uma alternativa de maior confiabilidade para execução desta função.

Em sua dissertação, Silva (2009), analisou a eficiência de diferentes métodos de inspeção não destrutivos de isoladores poliméricos utilizados em redes de transmissão de 230 kV. O autor classificou nove amostras de isoladores, antes instalados em campo, de acordo com a quantidade de poluição na superfície

dos equipamentos, em seguida os isoladores foram analisados por radiografia computadorizada, por um sistema de microtomografia computadorizada, por um sistema de raio-X e por fim por um sistema de microscopia eletrônica.

Após as análises, o autor detectou trincas pelas técnicas de radiografia na camada superficial de silicone e sob as camadas de poluentes próximas ao terminal próximo do condutor e concluiu que elas surgem devido à intensidade de campo elétrico nessa região, combinada com os fatores externos como umidade, poluição e radiação UV. Sabe-se que as trincas geram caminhos que permitem que a umidade e os ácidos presentes na poluição entrem em contato com o núcleo o pode gerar o desgaste da estrutura e por fim o trilhamento do mesmo, ainda assim, segundo Silva (2009), o processo de evolução da geometria da trinca ainda é uma questão muito complexa a qual se tem pouco conhecimento. Por fim, o autor conclui que essas técnicas devem ser aplicadas no controle de qualidade do processo de fabricação e em manutenções preditivas já que evidenciaram problema que não foram detectados visualmente.

Chandrasekar e Kalaivanan (2010), realizaram ensaios que buscavam correlacionar a descargas parciais em isoladores poliméricos usados em sistemas elétricos até 11 kV com o nível de poluição a que são submetido. Para realizar esta análise inicialmente removeram toda poluição existente nas amostras e em seguida, realizaram os ensaios. Após isso, os isoladores foram expostos à névoa salina com diferentes níveis concentrações de sal e realizados novos ensaios.

Após os ensaios os autores concluíram que existia uma forte relação entre a intensidade das descargas parciais e o nível de poluição a que o isolador está exposto. Além disso, concluíram que a partir da análise das variáveis estatísticas das descargas parciais é possível identificar os níveis de poluição e umidade a que os isoladores são expostos. Apesar disso, os resultados só foram validados em laboratório e sendo necessária a experimentação em campo.

Germano (2010), em sua dissertação buscou entender o processo de degradação dos isoladores, espaçadores e laços plásticos a partir da exposição das amostras a diferentes técnicas de envelhecimento acelerado. Os processos utilizados para envelhecer os equipamentos consistiam em expô-los de forma intensa a fatores como radiação ultravioleta (UV), imersão em água, alta temperatura e alta tensão associada ou não à névoa. O autor pode analisar a

influencia desses fatores de forma isolada ou associados, utilizando cinco técnicas de diagnóstico: medição corrente de fuga, análise das descargas parciais, ensaios de tensão suportável a 60 Hz e de tensão disruptiva, à seco e sob névoa salina.

Após a análise dos dados, dentre as principais observações, o autor pôde constatar a corrente de fuga aumenta consideravelmente nos isoladores expostos a alta tensão com e sem névoa salina evidenciando uma forte deterioração da superfície do isolador. E, observou também, que as descargas próximas ao condutor deterioram tanto o equipamento quanto o cabo necessitando de medidas para a diminuição de descargas.

Germano (2010) concluiu então que a redução das descargas parciais deve ser uma medida para que não se tenha o envelhecimento acelerado dos materiais isolantes em campo, além disso, a partir dos resultados obtidos, pôde concluir que quando expostos a radiação UV de forma mais intensa os isoladores tendem a ter menor tensão disruptiva, que deve ser corrigida buscando-se desenvolver materiais que sejam influenciados de forma menos intensa pelos fatores destacados.

Ferreira (2011), em sua tese, propôs estimar o grau de poluição dos isoladores de vidro utilizados em linhas de 69 kV a partir da análise acústica dos ruídos ultrassônicos. O primeiro passo do estudo consistiu em digitalizar o sinal de ruído e analisar quais as bandas de frequência são mais significantes no sinal, para isso fez uso de algoritmo computacional baseado na análise dos Vetores de Energia dos Centróides das Sub-bandas Espectrais (VECSE). A técnica consiste em dividir o sinal obtido pelo detector de ruído ultrassônico em sub-bandas, para cada sub-banda identifica-se o centróide e em seguida calculou-se sua energia ao seu redor. A base de dados obtida da análise foi processada via redes neurais artificiais, e seguida a técnica foi testada em campo.

Os resultados obtidos por Ferreira (2011) em laboratório identificaram que isoladores poluídos expostos a umidade elevada tem ruídos ultrassônicos bem maiores do que quando expostos a baixa umidade. Tal situação pode gerar problemas nas medições em campo, mas de acordo com o autor essa situação pode ser contornada com a criação maior banco de dados extenso que contemple diferentes níveis de umidade, embora se saiba que em campo sua variação não é tão grande. Quando testada em campo o autor também pôde observar a eficiência

da técnica, com cerca de 81% de assertividade. Apesar disso, a técnica é menos eficiente quando se tem mais classes na classificação, restringindo assim a quantidade de situações que podem ser observadas. Por fim, o autor concluiu que quando associada às redes neurais artificiais a técnica é viável e tem notável confiabilidade.

Barros 2015 em sua dissertação validou a utilização da câmera UV para detecção do efeito corona utilizando como referência a medição das descargas parciais em experimentos envolvendo eletrodos ponta-plano, verificando a aderência dos resultados dos métodos. Comprovada sua eficiência o autor utilizou o método para identificar o grau de poluição superficial em isoladores poliméricos de 69 kV.

Inicialmente o autor constatou nos experimentos com eletrodos ponta-plano que conforme a tensão se elevava tanto a câmera UV quanto o detectos de descargas parciais registraram uma maior quantidade de descargas corona. E quando aumentou a distância entre a câmera UV e o ponto energizado, observou uma redução na quantidade de pontos medidos. Para finalizar a validação do método, comprovou que o resultado do processamento das imagens era coerente com as medições.

No passo seguinte, Barros (2011) utilizou três isoladores sem defeitos, um envelhecido e outro com defeitos, e simulou a operação de cada um deles em ambientes com três níveis de poluição. Dados os resultados dos experimentos, o autor pôde concluir que:

- A umidade é um fator determinante para a medição de descargas corona.
- Conforme a degradação do isoladore aumenta a quantidade e a intensidade das descargas também aumenta.
- Quanto maior a poluição do ambiente maior a quantidade das descargas, mas a umidade pode influenciar consideravelmente nos resultados obtidos.

Seguindo uma metodologia semelhante, Guedes (2015) realizou ensaios isoladores de tensão utilizados em linhas de transmissão da CHESF de 230 kV, as amostras foram cedidas pela companhia e apresentavam diferentes níveis de degradação. A autora buscou analisar os isoladores a partir da análise das

descargas corona nas proximidades do isoladores quando aplicada a tensão nominal de operação. Para isso utilizou um equipamento que possibilita a visualização em tempo real das descargas corona e utilizando técnicas de processamento de imagens a autora pode determinar a quantidade de pontos de descarga por minuto. O escopo do trabalho ainda propunha analisar o efeito da umidade nas medições.

Após a análise dos resultados, Guedes (2015) pôde concluir que a inspeção visual não traz resultados conclusivos quanto às condições de operação dos equipamentos em campo. Também observou que a umidade influencia diretamente na observação dos sintomas da degradação, isso porque percebeu que o aumento da umidade aumentava a intensidade das descargas. Sabendo que a quantidade das descargas por minuto e a umidade eram os fatores que mais impactavam nos resultados a autora desenvolveu um sistema lógico *fuzzy* como ferramenta auxiliar na tomada de decisões quanto ao estado de degradação dos isoladores, concluiu então que resultados da técnica eram promissores podendo agora ser testado em campo.

Florentino (2015) propôs, em sua dissertação, a análise do sinal de ruído ultrassônico advindo das descargas nas proximidades de isoladores poliméricos utilizados em linhas de 230 kV. O método dos VECSE, proposto por Ferreira (2011), foi utilizado como ferramenta de extração de atributos. A frequência de radiação acústica dominante dos sinais de energia extraídos pelo método dos VECSE foi utilizada como fator de classificação dos estados de degradação dos isoladores. Então, o autor utilizou redes neurais artificiais como ferramenta de auxílio na tomada de decisões. O autor concluiu que a análise feita se mostrou promissora, permitindo identificar o estado de degradação dos isoladores, embora ainda necessite de um aprimoramento na extração de atributos visando detalhar as informações espectrais. Além disso, pôde comprovar a eficiência das redes neurais artificiais obtendo, independente do modelo de rede proposto, uma taxa de acerto acima de 80%.

Souza (2016) em sua dissertação experimentou a técnica de termovisão para determinação do estado de degradação. O autor realizou ensaios para que fossem adquiridas imagens térmicas das amostras de isoladores sob três ângulos distintos em três distâncias diferentes. As imagens registradas passaram por um

processamento de imagem e em seguida foram avaliadas por uma rede neural projetada pelo próprio autor. Semelhante a o que foi concluído por Guedes (2015), o autor concluiu que a inspeção visual é ineficiente, além disso, pôde observar a eficiência da técnica empregada para a inspeção de isoladores.

Os mesmo isoladores utilizados nos trabalho de Guedes (2015), Florentino (2015) e Souza (2016) foram utilizados nesse trabalho, sendo agora analisados com base nas informações contidas no sinal de corrente de fuga, método este bastante utilizado na literatura para análise da degradação de materiais isolantes. No tópico a seguir serão apresentados trabalhos que utilizaram a técnica e os resultados obtidos.

4.2 MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

Sabendo que os isoladores poliméricos ganhavam cada vez mais espaço no mercado, Gubanski *et al.* (1996), analisaram um conjunto com seis amostras de isoladores utilizados em 33 kV, dentre eles três de borracha de silicone, um de borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM), um de silicone vulcanizado à temperatura ambiente (RTV) e um de porcelana. Os isoladores foram poluídos artificialmente com salinidade constante de 50 g/l de sal e 40 g/l de kaolim e foram realizados ensaios variando a tensão aplicada de 5 kV à 19 kV.

Após a realização dos ensaios foi observado que o isolador de porcelana apresentou um nível de corrente de fuga cinco vezes maior que os demais tipos. Em relação às componentes harmônicas, observou-se nos isoladores poliméricos uma forte presença da terceira e da quinta harmônica, mas, mesmo com mudança dos níveis de tensão, a variação das mesmas não variou de maneira proporcional à tensão. A conclusão do artigo permitiu vislumbrar um caminho para se analisar isoladores poliméricos.

El-Hag *et al.* (2001) utilizou em seus ensaios uma metodologia semelhante a Gubanski *et al.* (1996), buscando relacionar a terceira e a quinta harmônicas do sinal de corrente com o das descargas externas devido às bandas secas e a degradação do isolador. Para isso utilizou três modelos de isoladores que foram desenvolvidos e utilizados nos ensaios. Todos possuíam a mesma distância de escoamento, o mesmo material (silicone HTV) e diâmetro do núcleo, sendo

diferentes na quantidade saias, onde o primeiro tinha quatro, segundo duas e o terceiro nenhuma.

As amostras foram submetidas a ensaios sob duas condições de esforços elétricos, uma com névoa salina e outra com o ambiente seco. Foram então medidas a amplitude da frequência fundamental, terceira e quinta harmônicas a cada minuto durante todo o experimento, que durou cerca de dez horas. El-Hag *et al.* (2001) observaram que sob névoa, as componentes harmônicas eram maiores que em um ambiente seco, e que aumentavam a medida que o terminal que era energizado. Concluíram então que, pela medição das componentes harmônicas era possível observar tanto o efeito da poluição por névoa salina quanto o envelhecimento do material polimérico, mas ainda assim os autores não testaram o experimento em equipamentos instalados em campo nem tampouco se estimou níveis de controle para as harmônicas estudadas.

Pinheiro (2008) em sua tese além de propor um equipamento de análise de corrente de fuga que investigava a relação entre a terceira harmônica do sinal com a componente fundamental em materiais isolantes em redes de baixa tensão, buscou determinar uma metodologia de monitoramento dos isoladores. Seu método propunha um monitoramento em tempo real, analisando a frequência em que a proporção entre as harmônicas era maior que 35% do valor da componente nominal.

Após análises em campo e em laboratório, o autor comprovou que a corrente de fuga é uma ferramenta permitiu resultados satisfatórios no que diz respeito à análise da degradação de materiais poliméricos. Embora pudesse ter permitido uma visão do estado de degradação, se sabe que algumas causas de falhas podem ser minimizadas, sem a necessidade de troca do equipamento.

Oliveira (2008), na sua tese desenvolveu um sistema ótico de monitoramento para cadeias de isoladores de baixo custo. O transdutor desenvolvido consistiu em um LED de luz infravermelha acoplado a uma fibra óptica, que era alimentado pela corrente de fuga. O sinal luminoso era captado por um módulo de processamento onde os valores medidos eram armazenados. Devido as características dos equipamentos, só era possível visualizar o ciclo positivo da tensão, e então foi feita a contagem dos picos de corrente. Segundo o

autor, a alternativa gerou uma solução satisfatória, já que eliminou as interferências eletromagnéticas que afeta os métodos mais tradicionais de medição de corrente de fuga, além disso, o baixo custo permite que sejam instalados mais sensores ao longo das linhas ampliando assim a quantidade de elementos monitorados.

Sabendo que a medição de corrente de fuga permite uma identificação das características dos isoladores e até do nível de poluição Mendonça *et al.* (2010) propôs a implantação de sensores para monitoramento da corrente de fuga dos isoladores nas linhas de transmissão. O princípio do sensor era semelhante ao utilizado por Oliveira (2008) e fazia a contagem das ocasiões em que a corrente de fuga ultrapassava um determinado valor (de 2 mA a 12 mA), enviando a informação para uma unidade concentradora via sinal RF. Os isoladores estavam expostos a condições bem degradantes de elevada umidade e em contato permanente com a brisa salina, foram monitorados pelos sensores cerca de quatro meses e em seguida enviados para análise laboratorial.

A primeira conclusão de Mendonça *et al.* (2010) foi que os sensores funcionaram de forma satisfatória e que para as condições que foram submetidos. Após a medição das correntes de fuga em laboratório que o valor limite de operação em campo inicialmente seria de 4mA para que fosse realizada a lavagem. Concluíram também que a corrente de fuga está diretamente à poluição depositada em sua superfície, e que a limpeza à jato diminuiu de 30 a 50% a amplitude da corrente de fuga.

Bashir *et al.* (2010) conduziram ensaios com isoladores de vidro retirados de campo que foram classificados de acordo com o tempo de uso em campo. Dentro de uma câmara climática os isoladores foram submetidos a diferentes níveis de stress mecânico e elétrico onde se mediu a corrente de fuga. Os dados foram então tratados via LabVIEW e analisados utilizando a Transformada Rápida de Fourier.

Após a análise dos dados, Bashir *et al.* (2010), concluíram que existe uma forte correlação entre a terceira e a quinta harmônica do sinal de corrente de fuga e o tempo de vida útil dos isoladores. Além disso, a relação entre essas componentes sofrem bastante influência da quantidade de poluição e o nível de

tensão aplicado. Por fim, os autores utilizaram redes neurais para auxiliar na tomada de decisões e obtiveram resultados satisfatórios.

Já Terrab *et al.* (2015) utilizou isoladores cerâmicos como amostras do sua pesquisa. O objetivo dos autores foi classificar as condições da superfície dos isoladores de acordo com as informações do sinal de corrente de fuga. Para isso realizaram ensaios aplicando 5 kV de tensão eficaz e mediu a corrente de fuga do isolador nas diferentes condições ambientais. Por fim, baseado no desvio padrão da corrente fuga, que pode ser considerado como uma medida de energia do sinal, e o ângulo de fase da componente fundamental os autores criaram um sistema *fuzzy* que classificaria as condições superficiais do isolador.

Baseado nas variáveis ditas o Terrab *et al.* (2015) conseguiram uma assertividade de 96% durante ensaios realizados em laboratório mas o método deve ser testado em campo para confirmar sua aplicabilidade.

Pelo que foi exposto fica evidente que o estudo das relações entre as amplitudes das correntes de fuga é promissor está relacionado às características físicas do isolador.

O resumo dos textos estudados relacionados à inspeção de isoladores e medição de corrente de fuga em isoladores é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos trabalhos desenvolvidos sobre os temas estudados.

Ano	Autores	Contribuição	II	CF	RH	LF
1996	Fernando e Gubanski	Observaram a relação entre os diferentes materiais utilizados na fabricação de isoladores e a variação dos valores de corrente de fuga e a terceira e quinta harmônicas.	X	X		
2001	El-Hag	Estudaram o efeito das características físicas do material isolando e da poluição como fatores que influenciam nas amplitudes das harmônicas de baixa frequência.	X	X		
2005	Neri	Estudou o comportamento das descargas parciais e da temperatura em isoladores de 69 kV submetidos a envelhecimento acelerado e inserção de defeitos que simulariam condições de campo.	X			

2007	Ferreira	Estudou a influência do posicionamento do anel equalizador no efeito corona e na temperatura do corpo do isolador, além disso, propôs um novo modelo de anel que se mostrou viável e eficiente perante a aplicação.	X			
2008	Pinheiro	Propôs um instrumento capaz de medir em tempo real os valores de corrente de fuga a partir da relação entre a terceira harmônica e a componente fundamental.	X	X	X	
2008	Oliveira	Propôs um sensor óptico de baixo custo que permitia a leitura do sinal de corrente de fuga em isoladores poliméricos instalados em linhas de transmissão.	X	X		
2009	Silva	Analisou isoladores poliméricos a partir de ensaios utilizando equipamento que permitiam a visualização de fissuras e suas características físicas dos componentes do isolador.	X			
2010	Chandrasekar e Kalaivanan	Realizaram ensaios para análise das descargas parciais em isoladores e concluíram que a poluição e a umidade influenciam diretamente à quantidade de descargas.	X			
2010	Germano	Analisou materiais isolantes poliméricos expostos a diferentes processos de envelhecimento acelerado utilizando diferentes técnicas para analisar quais os fatores que mais influenciavam na possível falha de isolação.	X			
2010	Mendonça	Utilizou sensores para a medição de corrente de fuga e analisou a quantidade de picos do sinal de corrente ao longo de um determinado período para determinar o valor da amplitude referência para o sinal de corrente de fuga.	X	X		

2010	Bashir <i>et al.</i>	Analisaram os isoladores e concluíram que a terceira e a quinta harmônica tem forte relação no que diz respeito à degradação dos isoladores.		X	X	
2011	Ferreira	Realizou ensaios para análise de ruídos ultrassônicos em isoladores poliméricos de 69 kV por meio do VECSE e em seguida comprovou a eficiência da técnica em situações operacionais de campo.	X			
2011	Barros	Avaliou técnicas de inspeção em isoladores poliméricos de 69 kV utilizando câmera UV e medição de descargas parciais.				
2015	Guedes	Analisou os isoladores poliméricos de 230 kV utilizando um equipamento específico para determinar a intensidade do efeito corona a partir da emissão UV e a influência dos meios externos, processando os resultados via lógica <i>fuzzy</i> .	X			X
2015	Florentino	Classificou os isoladores poliméricos de 230 kV por meio da inspeção acústica do ruído ultrassônico produzido nas proximidades dos isoladores, utilizando redes neurais artificiais como ferramenta de auxílio na tomadas das decisões.	X			
2015	Terrab <i>et al.</i>	Os autores utilizaram lógica <i>fuzzy</i> como ferramenta para classificar o estado da superfície dos isoladores cerâmicos, como variáveis de entrada utilizou o ângulo de fase da componente fundamental e o desvio padrão do sinal.				X
2016	Souza	Avaliou isoladores poliméricos de 230 kV utilizando o processamento das imagens térmicas, utilizando redes neurais para a análise.	X			

2016	Este trabalho	Propôs uma técnica de auxiliar que utilizando os valores e as relações entre as componentes harmônicas da corrente de fuga (3 ^a , 5 ^a e 7 ^a) e lógica <i>fuzzy</i> como ferramenta de apoio à tomada de decisões, estimaria o estado de degradação do isolador.	X	X	X	X
<p>II – Inspeção em isoladores;</p> <p>CF – Medição de corrente de fuga;</p> <p>RH – Relação entre as harmônicas;</p> <p>LF – Utilizou lógica <i>fuzzy</i>.</p>						

Neste capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica visando apresentar os trabalhos mais relevantes sobre isoladores poliméricos, corrente de fuga e lógica *fuzzy*. O próximo capítulo será dedicado à descrição das amostras utilizadas nesta pesquisa, como também os métodos utilizados para a medição de corrente de fuga.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

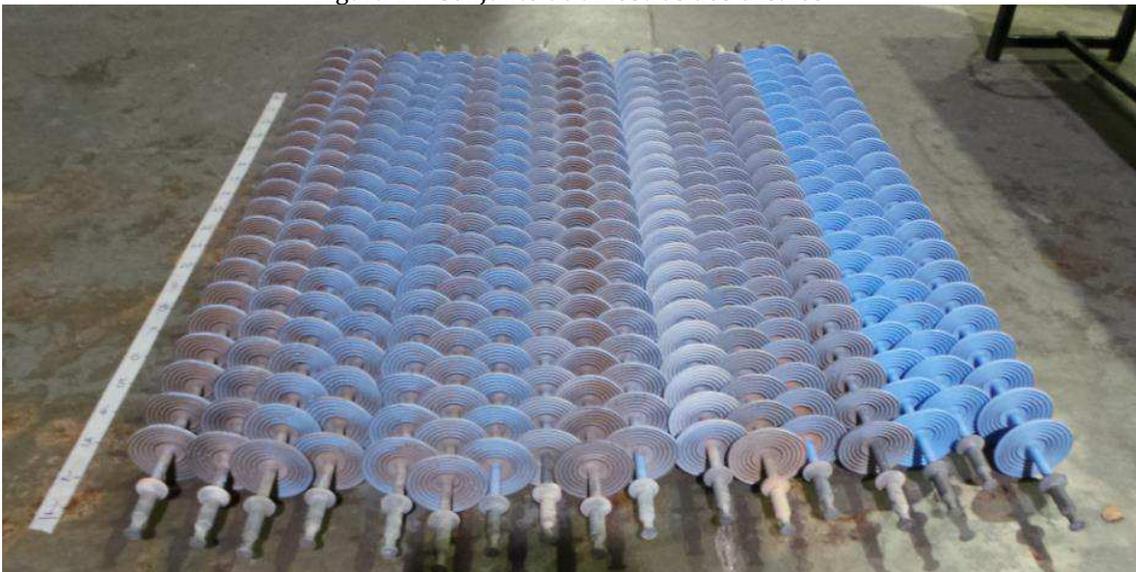
Neste capítulo são descritos o material aplicado e os métodos empregados nas medições, em laboratório, da corrente de fuga em isoladores poliméricos.

5.1 MATERIAL

Os isoladores poliméricos que foram utilizados nos ensaios encontravam-se anteriormente instalados em linhas de transmissão da CHESF e, por esse motivo, apresentavam diferentes níveis de poluição e estados de degradação. Os dezessete isoladores que foram cedidos para os ensaios são exibidos na Figura 11, e apresentam as seguintes especificações:

- Tensão de operação: 230 kV;
- Número de aletas: 21;
- Comprimento: 2,4 m;
- Peso: 8,8 kg;
- Terminal: tipo elo/bola.

Figura 11: Conjunto de amostras dos ensaios.



Fonte: Próprio Autor.

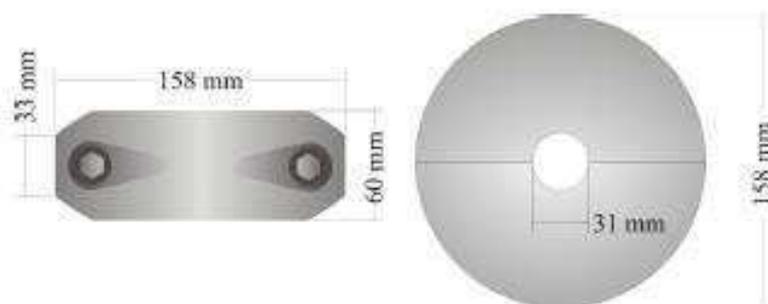
O núcleo dos isoladores é formado por uma resina resistente à hidrólise aplicada as fibras de vidro com plástico reforçado. Uma camada de 3 milímetros de espessura de silicone HTV (*High Temperature Vulcanization*) é colada quimicamente ao núcleo, protegendo-o durante o manuseio e melhorando as características mecânicas do isolador.

As saias são de silicone a base de polímero, e possuem alta hidrofobicidade, proteção contra raios ultravioleta e maior resistência ao efeito corona. Elas também são coladas quimicamente ao revestimento do núcleo.

Os terminais metálicos são fixados diretamente ao núcleo de fibra de vidro para assim obter-se a máxima resistência mecânica. Além disso, utiliza-se uma vedação com silicone para impedir a entrada de umidade no núcleo (LAPP INSULATORS, 2006).

Cada um dos isoladores foi equipado com um anel equalizador com 158 mm de diâmetro ilustrado na Figura 12, modelo este recomendado pelo fabricante do isolador e analisado em Ferreira, (2007).

Figura 12: Representação do anel equalizador a ser utilizado nos ensaios.



Fonte: FERREIRA, 2007.

5.2 MÉTODOS

A metodologia aplicada para se atingir os resultados pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Classificação dos isoladores via inspeção visual;
- Montagem do arranjo experimental e do circuito de medição;
- Realização de ensaios;

- Processamento dos dados;
- Desenvolvimento da ferramenta de apoio à tomada de decisões.

5.2.1 Classificação dos isoladores via inspeção visual

Devido aos diferentes estados de conservação dos isoladores entendeu-se que seria necessária a criação de um método de inspeção que possibilitasse classificá-los de acordo com suas características físicas e a partir de uma análise minuciosa de cada isolador.

Para isso, serão elencados fatores que melhor indicariam o estado de degradação do equipamento. Os fatores escolhidos analisarão as seguintes características:

- Nível de exposição do núcleo: procuram-se pontos onde o núcleo está exposto devido à degradação do polímero que o reveste.
- Nível de erosão do isolador: trata-se de uma avaliação a procura de fissuras no polímero, mesmo que estas ainda não exponha o núcleo.
- Nível de poluição: avaliará o quão poluído encontra-se o isolador.
- Estado de corrosão dos terminais: avalia o nível de oxidação dos terminais, dando uma atenção maior ao terminal que se conecta à fase.
- Estado de degradação das aletas: serão identificados cortes, arranhões, presença de excessos de materiais e qualquer espécie de dano físico nas aletas.
- Estado de degradação do selo: será verificado o quanto o selo está danificado.

Os isoladores terão, então, as características descritas classificadas e em seguida serão separados em três níveis ou nos estados de degradação a seguir:

- Críticos: Apresentando condições operacionais críticas para o sistema;
- Médios: Apresentando condições operacionais de desgaste médio para o sistema;

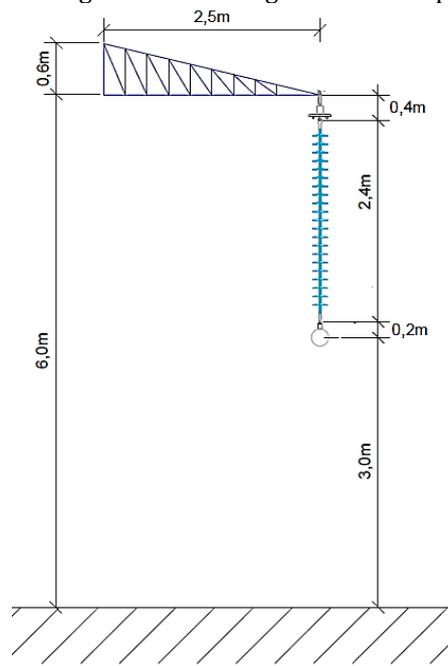
- Novos: Apresentam condições semelhantes a isoladores novos.

5.2.2 Montagem do arranjo experimental e do circuito de medição

Os ensaios foram realizados nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Na primeira fase da montagem foi feita a análise das dependências do laboratório, aterrando todos os equipamentos que se encontravam próximos à área do ensaio para evitar qualquer risco de descarga elétrica devido à indução eletromagnética.

Para suporte do isolador foi projetada uma estrutura que simula uma mísula de uma torre de transmissão, permitindo que o terminal energizado do isolador ficasse posicionado a 3 metros de altura do chão do laboratório. A mísula projetada tem 2,50 metros de comprimento em forma de uma pirâmide de base retangular de 1,00 m de largura e 0,60 m de altura, sendo fixada a 6 metros do chão, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Diagrama da montagem da mísula projetada.



Fonte: Próprio autor.

No passo seguinte foi montado o eletrodo que simulava os cabos da linha de transmissão. Usou-se um tubo de alumínio circular oco com 4 cm de diâmetro e 3 m de comprimento. Nas extremidades do tubo foram fixadas esferas de alumínio

de 25 cm de diâmetro para suavizar os contornos da superfície e evitar a forte incidência de descargas corona.

Para finalizar a montagem, foi instalado um isolador de bloqueio entre a amostra e a mísula, conforme mostrado na Figura 14. Em paralelo a ele foi conectado o resistor *shunt* utilizado na medição de corrente de fuga, melhor detalhado posteriormente.

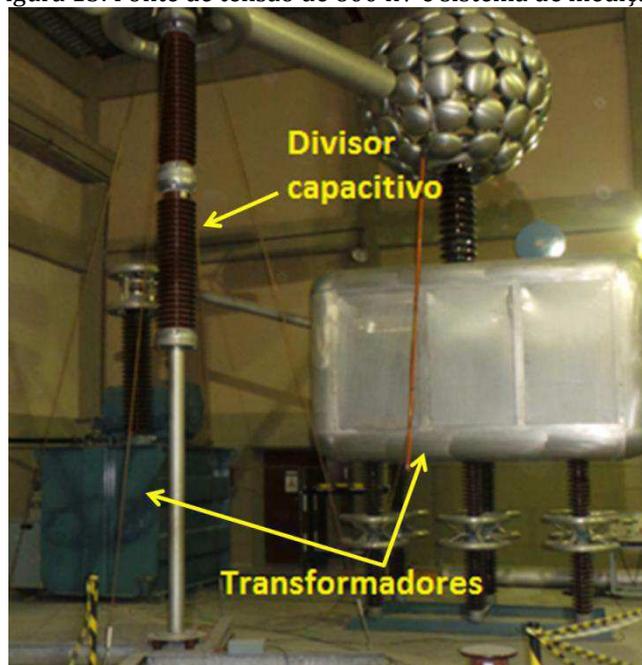
Figura 14: Detalhe do isolador de bloqueio utilizado na montagem dos ensaios.



Fonte: Próprio autor.

A fonte de alta tensão utilizada é constituída por dois transformadores interligados em cascata localizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. Cada transformador tem a capacidade de aplicar até 300 kV e uma corrente máxima de operação de 1 A. Devido à ligação o conjunto pode atingir até 600 kV. Para a medição da tensão aplicada usou-se um divisor capacitivo. O controle e regulação do nível de tensão para o valor desejado foi realizada na cabine de comando. Na Figura 15 são mostrados os equipamentos citados e suas interligações.

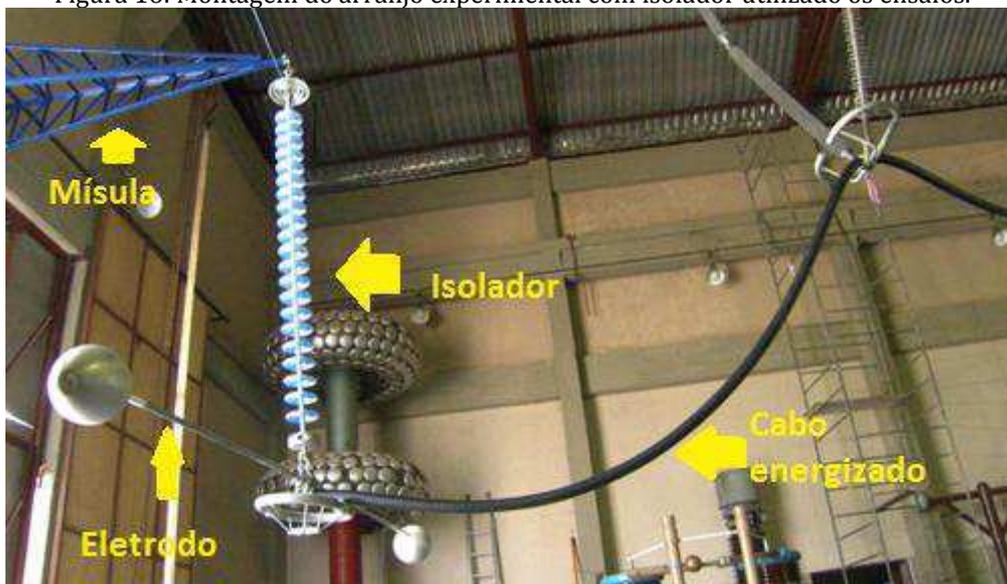
Figura 15: Fonte de tensão de 600 kV e sistema de medição.



Fonte: Próprio autor.

Após a conexão de todos os componentes o arranjo fica como mostrado na Figura 16.

Figura 16: Montagem do arranjo experimental com isolador utilizado os ensaios.



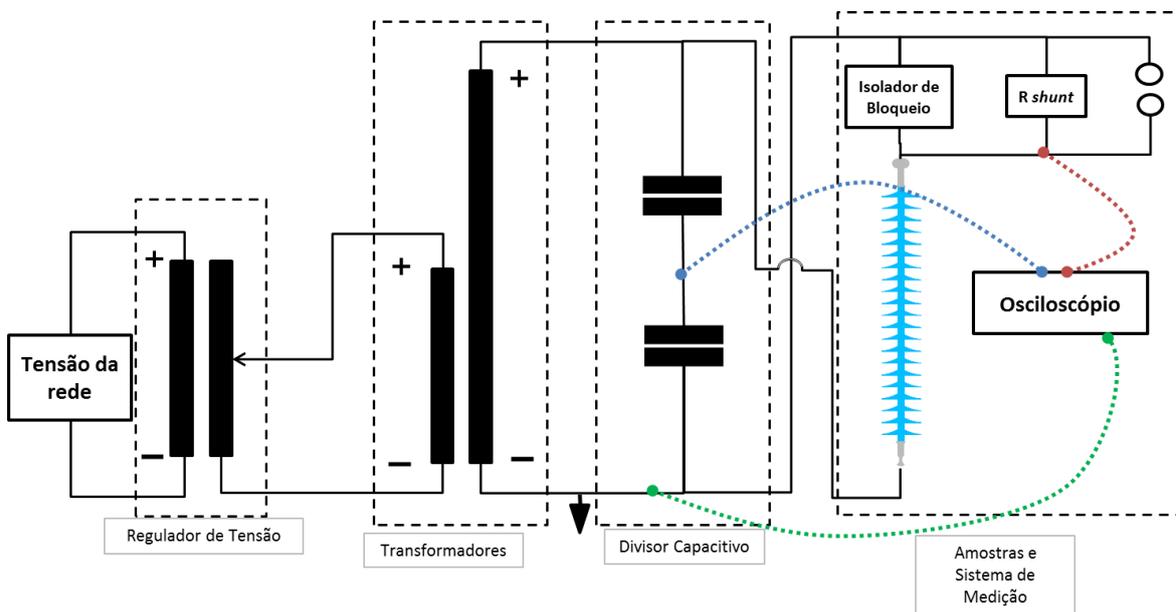
Fonte: Próprio autor.

Método de medição de corrente de fuga

A medição da corrente de fuga foi realizada utilizando uma resistência *shunt* (R_{shunt}) de 0,98 k Ω , esta foi conectada em série à amostra e em paralelo ao isolador de bloqueio. Como a resistência elétrica do isolador de bloqueio é muito superior, quase a totalidade da corrente que circula no isolador polimérico é conduzida ao R_{shunt} , gerando um sinal de tensão que foi medido.

Em paralelo à medição de corrente de fuga, também foi feita a medição da tensão aplicada sobre o objeto de teste, sendo o sinal adquirido do divisor capacitivo. Um osciloscópio digital, modelo MDO4104B-3 fabricado pela Tektronix, foi utilizado para a visualização dos sinais e para a aquisição dos dados. Por fim, um gap para proteção foi inserido em paralelo à medição para proteção das pessoas e dos instrumentos de medição, o diagrama do circuito elétrico da montagem é mostrado na Figura 17.

Figura 17: Diagrama elétrico da montagem.



Fonte: Próprio autor.

5.2.3 Realização dos ensaios

Após a seleção dos isoladores via inspeção visual, e a montagem do arranjo, foram iniciados os ensaios, começando pelos isoladores novos, depois pelos mais degradados e finalizando com os em condições medianas. A tensão aplicada foi de 134 kV fase-terra, valor de operação nominal dos equipamentos testados. Após 10 minutos, tempo esperado para a estabilização do sinal, foi iniciada a aquisição dos dados das medições. Os dados eram adquiridos a cada 10 minutos, até serem feitas um total de 15 medições. Os dados de corrente de fuga e de tensão aplicada foram adquiridos com um total de seis ciclos completos do sinal, ou 0,1 segundos de duração, a uma taxa de amostragem de 100 kHz, conforme mostrado na Figura 18.



Fonte: Próprio autor.

Esse procedimento foi repetido para todos os isoladores, e, além disso, as condições ambientais, como temperatura e umidade, também foram medidas.

5.2.4 Processamento dos dados

Após a aquisição dos dados de todas as medições, os arquivos foram processados de forma que se obtivesse as componentes harmônicas de baixa frequência pela transformada rápida de Fourier (*FFT*). O software escolhido para o processamento foi o Matlab® e todas as medições foram devidamente tratadas, com os resultados fazendo parte de um conjunto de dados. Conforme já dito anteriormente, escolheu-se a *FFT* por ser um método largamente utilizado e de

resposta rápida, além disso, é uma ferramenta de fácil aplicação e que atende as necessidades das medições em campo.

No conjunto de dados foram verificadas as médias e os valores máximos das amplitudes das harmônicas até a décima quinta (900 Hz). Sabe-se que a componente fundamental do sinal é diretamente relacionada a fatores como: nível de tensão aplicado, variações de temperatura e de umidade e principalmente às distorções do sinal de tensão provenientes da própria rede de distribuição. Como solução foi feita a normalização das harmônicas em relação à componente fundamental, para que se pudessem eliminar esses fatores comuns a todas as medições.

Inicialmente, serão analisadas as variáveis a seguir:

- Amplitude da componente fundamental do sinal;
- Amplitude das componentes harmônicas do sinal;
- Amplitude das componentes harmônicas do sinal normalizadas em relação a componente fundamental;
- Relação entre a terceira e a quinta harmônica;
- Relação entre a terceira e a sétima harmônica;
- Relação entre a sétima e a quinta harmônica.

Porém, foram escolhidas as variáveis que mais foram coerentes com o nível de degradação do isolador vista na análise visual, e então criado um sistema *fuzzy* para a classificação dos isoladores, utilizando seus resultados como variáveis de entrada.

5.2.5 Sistema *fuzzy* desenvolvido

O sistema *fuzzy* que foi desenvolvido teve como objetivo classificar os isoladores poliméricos quanto ao seu estado de degradação a partir dos valores das harmônicas obtidos após a finalização do processamento dos dados. Para isso, foi utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox* da ferramenta Matlab®, seguindo as seguintes etapas:

- Fuzzificação: etapa onde foram feitas as definições das variáveis linguísticas de entrada do sistema, inicialmente chamadas de I1 e I2, bem como os valores de referência que limitaram os conjuntos *fuzzy* de entrada.
- Inferência: etapa onde ocorreu a definição das regras do sistema, usou-se o método de Mamdani pela sua simplicidade e eficiência;
- Desfuzzificação: foi onde utilizando os valores das entradas, aplicou-se o método do centróide para obter-se o valor da variável “Estado” que representa o grau de degradação do isolador.

Com todos os resultados obtidos, foi feita então a análise a aderência do sistema *fuzzy* projetado com as avaliações feitas via inspeção visual.

Neste capítulo foram apresentados os isoladores utilizados na pesquisa e os métodos utilizados para alcançar os objetivos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados das medições e da lógica *fuzzy* criada para auxiliar na classificação do estado de degradação do isolador.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

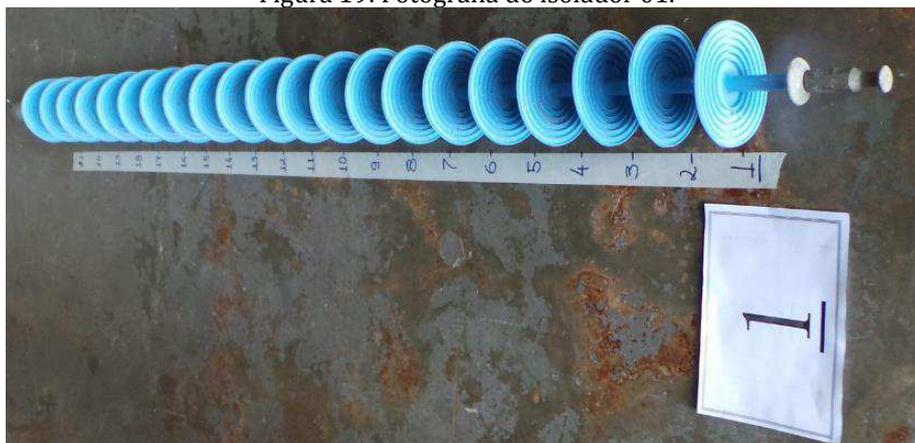
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da inspeção visual e quais os isoladores foram selecionados para os ensaios. Em seguida, serão apresentados os resultados das medições das correntes de fuga e os valores das harmônicas determinados. Em seguida, apresentar-se-á as correlações entre os níveis das componentes harmônicas e a análise visual dos isoladores. E, por fim, o resultado da classificação do estado operativo dos isoladores utilizando o sistema *fuzzy* desenvolvido e a sua aderência à classificação via inspeção visual.

6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ISOLADORES VIA INSPEÇÃO VISUAL

Os isoladores poliméricos foram minuciosamente inspecionados antes dos ensaios, e foram classificados levando em consideração as variáveis descritas de acordo com a metodologia proposta. Os isoladores foram devidamente enumerados e fotografados os potenciais pontos de falha. Analisou-se um total de 17 isoladores, desse universo, selecionaram-se os isoladores descritos a seguir:

1. Isolador 01: conforme mostrado na Figura 19, o isolador encontrava-se com pouquíssima poluição, e não há registro da sua instalação em campo.

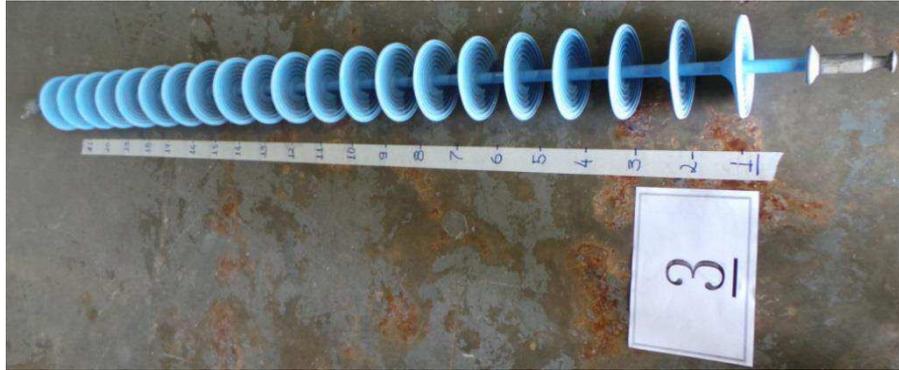
Figura 19: Fotografia do isolador 01.



Fonte: Próprio autor.

2. Isolador 03: apresentou as mesmas condições do isolador 01, conforme mostrado na Figura 20;

Figura 20: Fotografia do isolador 03.



Fonte: Próprio autor.

3. Isolador 05: Conforme mostrado na Figura 21, o isolador possuía uma considerável degradação da cobertura de silicone (a) e poluição acentuada (b) na região mais próxima ao lado fase, e algumas saias estavam começando a se rasgar nas regiões mais centrais do isolador (c);

Figura 21: Degradação da superfície protetora (a), poluição (b), e saias danificadas (c) encontradas no isolador 05.



(a)

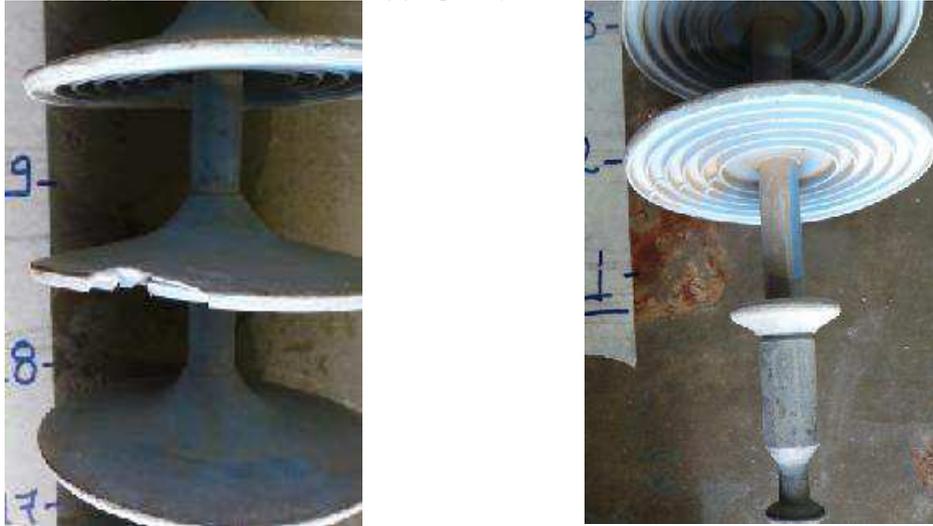
(b)

(c)

Fonte: Próprio autor.

4. Isolador 07: apresentou uma das saias danificada na região mais próxima do lado conectado à terra (a) e um pouco de poluição (b), conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22: Saia danificada (a) e poluição moderada (b) no isolador 07.



(a)

(b)

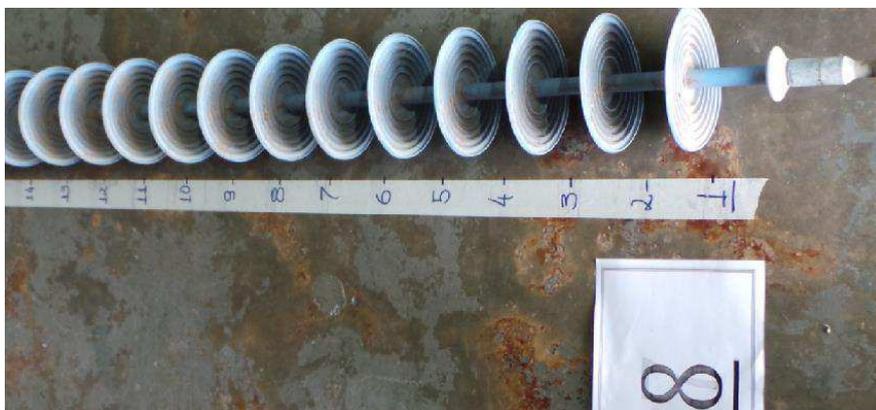
Fonte: Próprio autor.

5. Isolador 08: o isolador estava poluído em todo seu comprimento tanto na parte superior (a) quanto na inferior das saias (b), conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23: Poluição na região superior (a) e inferior (b) das saias.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

6. Isolador 10: apresentou elevado grau de poluição (a), núcleo bastante exposto próximo ao terminal do lado fase (b) e as saias com rachaduras ao longo do seu comprimento (c), conforme mostrado na Figura 24;

Figura 24: Poluição ao longo do isolador 10 (a). núcleo exposto ao lado do conector de fase (b) e saias rachadas ao longo do isolador (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio autor.

7. Isolador 11: O isolador estava com bastante poluição em todas as suas saias (a) e apresentava sinais de corrosão do núcleo e do selo (b), bem como a exposição do núcleo do lado do terminal de fase, as características citadas são apresentadas na Figura 25.

Figura 25: Poluição elevada (a) e núcleo exposto (b) no isolador 11.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

8. Isolador 16: apresentou poluição em algumas regiões e algumas saias danificadas, conforme mostrado na Figura 26;

Figura 26: Saias danificadas do isolador 16.



Fonte: Próprio autor.

Dadas às características obtidas, podem-se classificar os isoladores pelo nível de poluição, pela exposição do núcleo e pela corrosão do pino e do selo, a regra utilizada na classificação foi a seguinte:

- Quando uma ou mais características apresentavam nível **Alto** o isolador era considerado **Crítico**;
- Quando uma ou mais características apresentavam nível **Médio** e nenhuma era classificada como **Alto**, o isolador era considerado **Médio**;
- Quando todas as características apresentavam nível **Baixo** o isolador era considerado **Novo**;

O resumo da classificação das características é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Isoladores classificados por características físicas.

	Poluição	Exposição do Núcleo	Corrosão (pino e selo)
1	Baixo	Baixo	Baixo
3	Baixo	Baixo	Baixo
5	Médio	Médio	Alto
7	Médio	Baixo	Médio
8	Médio	Baixo	Médio
10	Alto	Alto	Alto
11	Alto	Alto	Alto
16	Médio	Baixo	Médio

Fonte: Próprio autor.

Por fim, baseados nas regras antes descritas os isoladores foram classificados de acordo com a Tabela 3, ilustrada abaixo.

Tabela 3: tabela de classificação dos isoladores pela inspeção visual.

Isoladores	Condição operacional
1, 3	Novo
7, 8, 16	Médio
5, 10, 11	Crítico

Fonte: Próprio autor.

6.2 RESULTADO DAS MEDIÇÕES

Após a montagem do circuito, aterraram-se os equipamentos próximos para evitar choques acidentais por indução e a integridade dos equipamentos eletrônicos. Os isoladores foram devidamente acoplados da mísula de apoio e aos transformadores do laboratório. Sinalizou-se então a área do laboratório para segurança de todos os envolvidos e iniciava-se então a energização do circuito.

A partir do momento em que se atingia a tensão nominal do isolador, 134 kV, aguardava-se até a estabilização da tensão e só então iniciava-se a aquisição dos dados no osciloscópio digital descrito no capítulo anterior. As 15 medições eram armazenadas e foram formatadas para a leitura da rotina que calculava o valor da amplitude das harmônicas, o código da rotina foi gerado no Matlab® utilizando método da Transformada Rápida de Fourier. Todos os isoladores foram submetidos ao mesmo nível de tensão e suas medições seguiram os mesmo processos, após devidamente processadas obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Amplitude das harmônicas corrente de fuga (em mA).

Isolador	60Hz	180Hz	300Hz	420Hz	540Hz	660Hz	780Hz	900Hz
1	0,1568	0,0091	0,0509	0,0066	0,0012	0,0019	0,0040	0,0013
3	0,1481	0,0072	0,0413	0,0014	0,0005	0,0013	0,0028	0,0004
5	0,1503	0,0063	0,0398	0,0019	0,0007	0,0006	0,0014	0,0003
7	0,1564	0,0082	0,0473	0,0059	0,0008	0,0012	0,0036	0,0008
8	0,1473	0,0066	0,0407	0,0011	0,0006	0,0012	0,0023	0,0006
10	0,1458	0,0071	0,0374	0,0025	0,0007	0,0006	0,0021	0,0005
11	0,1550	0,0076	0,0469	0,0039	0,0007	0,0008	0,0039	0,0007
16	0,1532	0,0082	0,0466	0,0053	0,0011	0,0013	0,0036	0,0010

Fonte: Próprio autor.

Durante a análise dos sinais observou-se que o sinal de tensão apresentava uma forte distorção resultante tanto do sinal da rede que alimenta o laboratório quanto das perdas de magnetização dos transformadores do laboratório. Sendo assim, sabia-se que a influência do nível de tensão seria considerável no sinal de corrente de fuga. Como todos os isoladores foram submetidos ao mesmo sinal de tensão, normalizaram-se os valores das harmônicas pela componente fundamental. O resultado geral é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Amplitude das harmônicas corrente de fuga normalizados.

Isolador	180Hz	300Hz	420Hz	540Hz	660Hz	780Hz	900Hz
1	0,0588	0,3277	0,0426	0,0080	0,0125	0,0265	0,0087
3	0,0486	0,2795	0,0094	0,0034	0,0085	0,0188	0,0027
5	0,0419	0,2651	0,0126	0,0046	0,0038	0,0093	0,0020
7	0,0534	0,3090	0,0388	0,0053	0,0079	0,0231	0,0052
8	0,0451	0,2771	0,0074	0,0041	0,0083	0,0159	0,0042
10	0,0497	0,2592	0,0181	0,0048	0,0039	0,0144	0,0036
11	0,0498	0,3030	0,0254	0,0044	0,0055	0,0255	0,0048
16	0,0538	0,3047	0,0348	0,0075	0,0085	0,0233	0,0063

Fonte: Próprio autor.

Em complemento à Tabela 5 foram avaliadas mais três variáveis que relacionam a quinta e a terceira harmônica, a terceira e a sétima e a quinta e a sétima, semelhante ao estudo feito por Bashir *et al*, (2010). Os resultados estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6: Relação entre das harmônicas corrente de fuga.

Isolador	300Hz/180Hz	180Hz/420Hz	300Hz/420Hz
1	5,6623	1,8140	9,1628
3	6,1667	7,0000	40,3000
5	6,6333	3,6471	23,1765
7	5,8375	2,1579	12,3421
8	6,2615	8,2500	49,6250
10	5,8438	5,3846	28,3077
11	6,7971	5,2857	31,5714
16	5,8987	1,6000	9,2000

Fonte: Próprio autor.

Além disso, foram observados e medidos os valores médios de temperatura e da umidade no momento dos ensaios de cada isolador apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Condições ambientais durante os ensaios.

Isolador	Temperatura (°C)	Umidade Relativa do Ar
1	26,0	56,0
3	25,5	64,0
5	27,8	49,0
7	25,9	60,0
8	27,8	49,0
10	26,8	51,0
11	24,9	62,0
16	26,8	51,0

Fonte: Próprio autor.

Diferentemente do esperado, o isolador 3 apresentou elevados valores de corrente de fuga, tanto em valores nominais quanto na relação entre as harmônicas. A possível causa desse fato é que internamente o isolador esteja danificado, mas infelizmente uma análise semelhante a feita por Silva (2009) não estava no escopo desse trabalho. Além disso, a umidade estava elevada no momento do ensaio o que influenciou bastante no resultado. De todo modo, sabendo que estrutura interna do isolador não pôde ser observada, o estado de degradação do isolador passou a ser considerado Médio.

De acordo com a Tabela 6, o isolador 8 apresentou o valor mais alto no que diz respeito à relação entre a sétima e a quinta harmônica. A mesma amostra em Guedes (2015) apresentou elevada presença de descargas corona dentre os demais e a principal característica que pode ser responsável por essa variação é a erosão apresentada no selo do isolador.

Os isoladores 1, 7, 16 apresentaram valores semelhantes na relação entre as harmônicas sendo o 1 apresentou um nível bem menor da relação entre a quinta e a terceira harmônicas, o principal fato observado nesse isolador é a poluição baixíssima, nos demais os níveis de poluição eram bem moderados apesar de apresentarem alguma.

Os isoladores 10 e 11 que eram os mais degradados apresentou valores da relação entre as harmônicas da corrente de fuga bem distintas. Enquanto esperava-se que o isolador 10 apresentasse valores maiores que o isolador 11, de acordo com a Tabela 6, aconteceu o contrário. Observa-se que a principal diferença ocorreu entre a umidade durante os ensaios, enquanto no ensaio do isolador 10 a umidade estava em 51% no isolador 11 era de 62%. Constatou-se então a

influencia direta na corrente de fuga nos casos que se tem uma camada de poluição nos isoladores e a presença de umidade.

De forma geral, quando se analisou a relação entre a terceira e a quinta harmônica e os níveis de poluição dos isoladores é possível poluição e a corrosão do pino, constatou-se que esta relação foi maior, da mesma forma que Bashir *et al* (2006). Por representar características bem determinantes na classificação do isolador, a relação entre a terceira e a quinta harmônica foi a primeira a ser tomada como variável de entrada do sistema *fuzzy*, sendo a variável I1.

Também foi observado dentre os valores apresentados na Tabela 6 da relação entre a terceira e a sétima, e a quinta e a sétima harmônica uma forte coerência entre si, variando de forma igual em relação ao nível de exposição do núcleo. Além disso, o isolador que apresentou maior valor dessa variável apresentou problemas no selo e elevada presença de descargas corona no trabalho de Guedes (2015). Dados os fatos descritos, será considerada a relação entre a sétima e a terceira harmônica, como a entrada I2 do sistema *fuzzy*.

Na análise das componentes individuais (3^a, 5^a e 7^a harmônicas), não foi possível evidenciar de forma clara a relação entre os valores e os estados de degradação, sendo necessária uma análise mais demorada e aprofundada das características do sinal. Essa análise em tempo real pode demandar um esforço computacional maior e uma demora na resposta, portanto, decidiu utilizar a relação entre as amplitudes das harmônicas pela fácil associação descrita anteriormente.

6.3 SISTEMA FUZZY DESENVOLVIDO

Com base nas análises descritas no tópico anterior, constatou-se que a relação entre as características físicas do isolador e a Tabela 6 era bem evidente e proporcional. Além disso, os dois valores escolhidos para análise sintetizavam bem características de forte influência no estado de degradação. Para relacionar essas duas entradas viu-se que pela sua simplicidade, um sistema *fuzzy* atenderia a necessidade do problema.

Baseando-se então nas variáveis escolhidas, um sistema *fuzzy* foi desenvolvido para estimar o estado de degradação dos isoladores poliméricos analisados, definindo-o como:

- Novo: para quando possuam características de pouca ou nenhuma degradação;
- Médio: para quando possuam alguma degradação, mas que ainda permita que o isolador exerça suas funções sem o comprometimento da isolação;
- Crítico: para quando o nível de degradação for suficiente para a realização da troca do equipamento.

Para a variável de entrada I1, que foi considerada como sendo a relação entre a terceira e a quinta harmônica, deu-se quatro classificações: Baixa, Média, Média Alta, e Crítica. E para a entrada I2, que representa a relação entre a terceira e a sétima harmônica, deu-se três: Baixa, Média e Crítica. Os valores dessas variáveis por isolador estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Valores das entradas por isolador.

Isolador	$I_1 = 5^a/3^a$	$I_2 = 7^a/5^a$
1	5,6623	1,8140
3	6,1667	7,0000
5	6,6333	3,6471
7	5,8375	2,1579
8	6,2615	8,2500
10	5,8438	5,3846
11	6,7971	5,2857
16	5,8987	1,6000

Fonte: Próprio Autor.

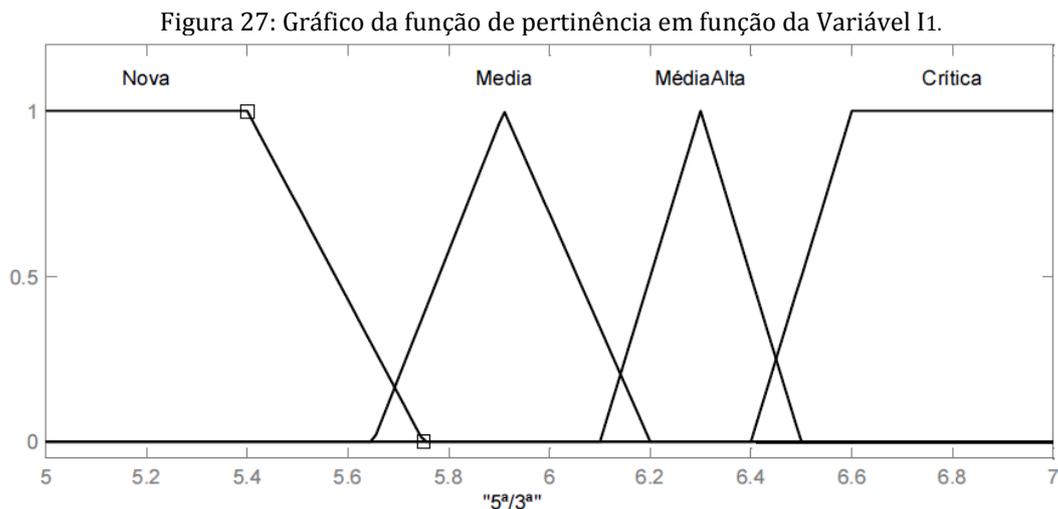
Os parâmetros para as funções de pertinência de entrada em relação à variável I1, podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada I1.

Função de pertinência	Parâmetros
Baixa	$\mu_B(I_1) = \begin{cases} 1, & \text{se } I_1 < 5,40 \\ \frac{5,75 - I_1}{0,35}, & \text{se } 5,40 \leq I_1 < 5,75 \end{cases}$
Média	$\mu_M(I_1) = \begin{cases} \frac{I_1 - 5,65}{0,26}, & \text{se } 5,65 \leq I_1 < 5,91 \\ \frac{6,20 - I_1}{0,29}, & \text{se } 5,91 \leq I_1 < 6,20 \end{cases}$
Média alta	$\mu_{Ma}(I_1) = \begin{cases} \frac{I_1 - 6,10}{0,20}, & \text{se } 6,10 \leq I_1 < 6,30 \\ \frac{6,50 - I_1}{0,20}, & \text{se } 6,30 \leq I_1 < 6,50 \end{cases}$
Crítica	$\mu_C(I_1) = \begin{cases} \frac{I_1 - 6,40}{0,20}, & \text{se } 6,40 \leq I_1 < 6,60 \\ 1, & \text{se } 6,60 \leq I_1 \end{cases}$

Fonte: Próprio autor.

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada I1 está apresentada na Figura 27.



Fonte: Próprio autor.

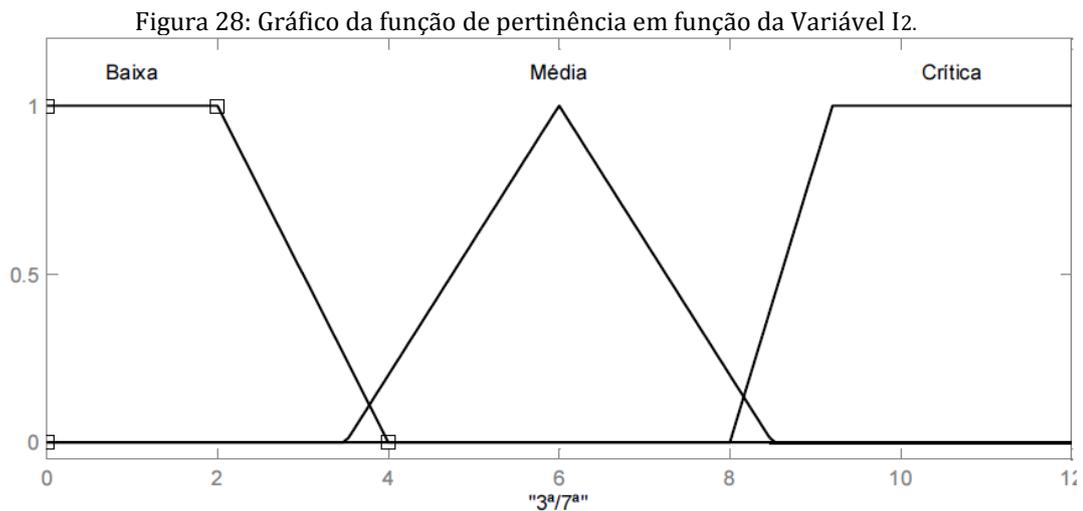
Os parâmetros para as funções de pertinência das variáveis de entrada relacionadas à entrada I2 podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros para as funções de pertinência das variáveis linguísticas, em função da entrada I2.

Função de pertinência	Parâmetros
Baixa	$\mu_B(I_1) = \begin{cases} 1, & \text{se } I_1 < 2,00 \\ \frac{4,00 - I_1}{2,00}, & \text{se } 2,00 \leq I_1 < 4,00 \end{cases}$
Média	$\mu_M(I_1) = \begin{cases} \frac{I_1 - 6,00}{2,50}, & \text{se } 3,50 \leq I_1 < 6,00 \\ \frac{8,50 - I_1}{2,50}, & \text{se } 6,00 \leq I_1 < 8,50 \end{cases}$
Crítica	$\mu_C(I_1) = \begin{cases} \frac{I_1 - 8,00}{0,50}, & \text{se } 8,00 \leq I_1 < 8,50 \\ 1, & \text{se } 8,50 \leq I_1 \end{cases}$

Fonte: Próprio autor.

A ilustração gráfica das funções de pertinência que representam cada variável linguística em função da entrada I2 está apresentada na Figura 28.



Fonte: Próprio autor.

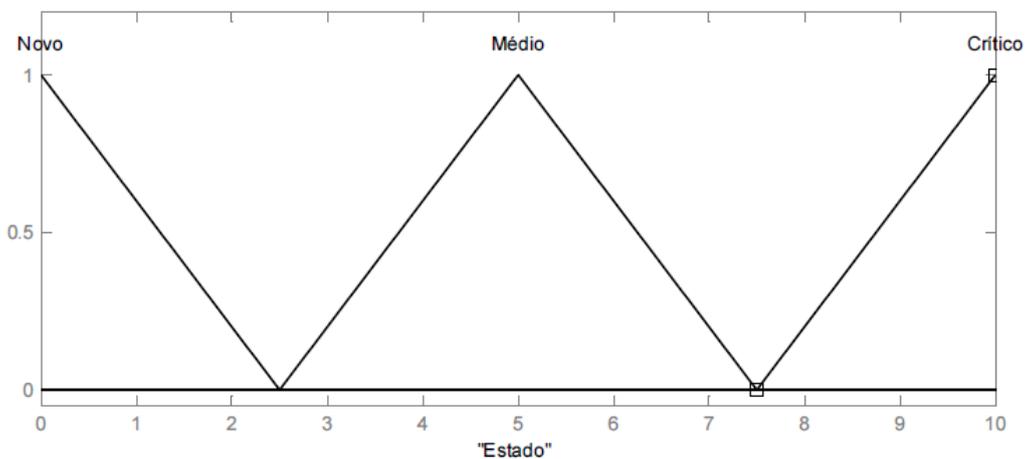
Durante os ensaios realizados, observou-se que os isoladores que apresentavam um grau de exposição do núcleo entre médio e alto, possuíam valores medianos de I1, dentro da faixa considerada MédiaAlta. Como essa característica é determinante e pôde ser observada na variação de I2, utilizou-se o resultado de suas funções de pertinência para auxiliar na classificação geral da variável Estado, formando o seguinte conjunto de regras:

- Regra 1: se I1 = Baixo, então Estado = Novo;
- Regra 2: se I1 = Médio, então Estado = Médio;
- Regra 3: se I1 = Alta, então Estado = Crítico;
- Regra 4: se I1 = MédiaAlta e I2 = Alta, então Estado = Crítico;
- Regra 5: se I1 = MédiaAlta e I2 = Baixa, então Estado = Médio;
- Regra 6: se I1 = MédiaAlta e I2 = Média, então Estado = Médio.

Para se estimar o estado de degradação do isolador, as variáveis linguísticas da saída Estado foram associadas a uma escala de 0 a 10, onde 0 representava um isolador sem nenhuma degradação ou falha, e 10 o mais degradado possível. Sendo assim, a correlação entre os valores da escala ilustrado na Figura 29, segue os seguintes valores:

- Se $0 < \text{Estado} < 2,5$: NOVO;
- Se $2,5 < \text{Estado} < 7,5$: MÉDIO;
- Se $7,5 < \text{Estado} < 10,0$: CRÍTICO;

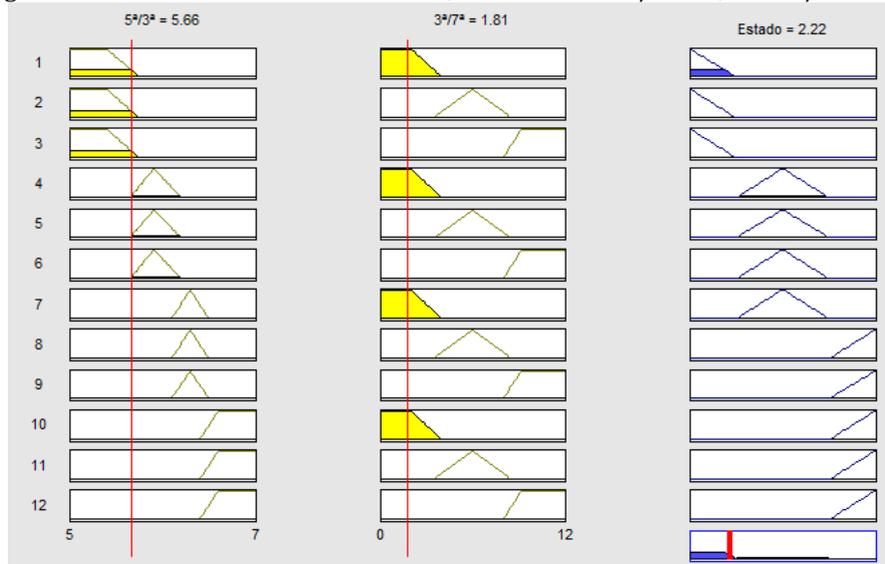
Figura 29: Gráfico da função de pertinência da variável de saída "Estado".



Fonte: Proprio Autor.

Para o isolador 01, que apresentou uma relação baixa entre a quinta e a terceira e entre a sétima e a quinta harmônica teve seu estado de degradação classificado como novo pelo sistema *fuzzy* desenvolvido, com um valor em 2,22 conforme mostrado na Figura 30. Tal fato foi observado na inspeção visual.

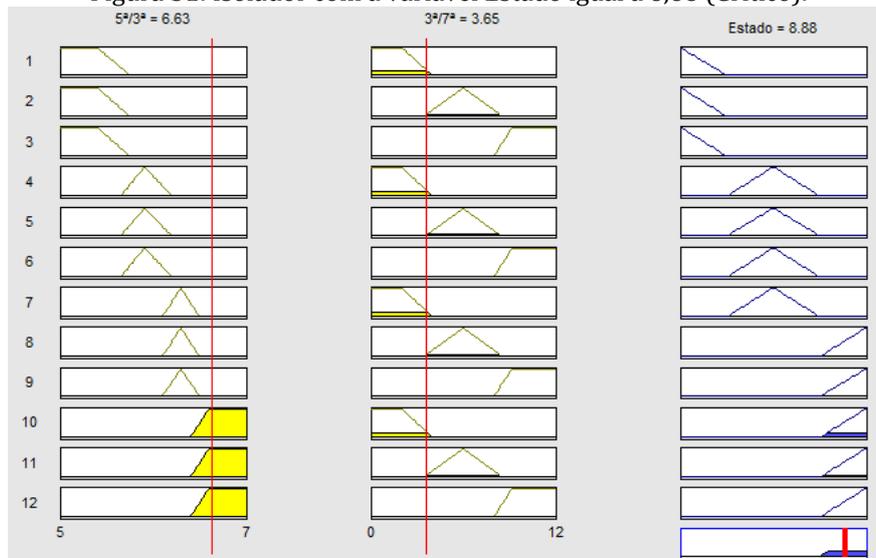
Figura 30: Isolador 01 considerado Novo, com valor da $5^a/3^a = 5,66$ e $3^a/7^a = 1,81$.



Fonte: Próprio Autor.

O isolador 05 que a quinta harmônica foi 6,63 vezes maior que a terceira, mesmo com uma relação mediana entre a sétima e a terceira, foi considerado crítico com valor de estado de degradação de 8,88, conforme pode ser visto na Figura 31. Esse mesmo isolador foi classificado crítico no processo de inspeção visual, com alto índice de corrosão no pino, além disso, apresentou níveis consideráveis de poluição.

Figura 31: Isolador com a variável Estado igual à 8,88 (Crítico).

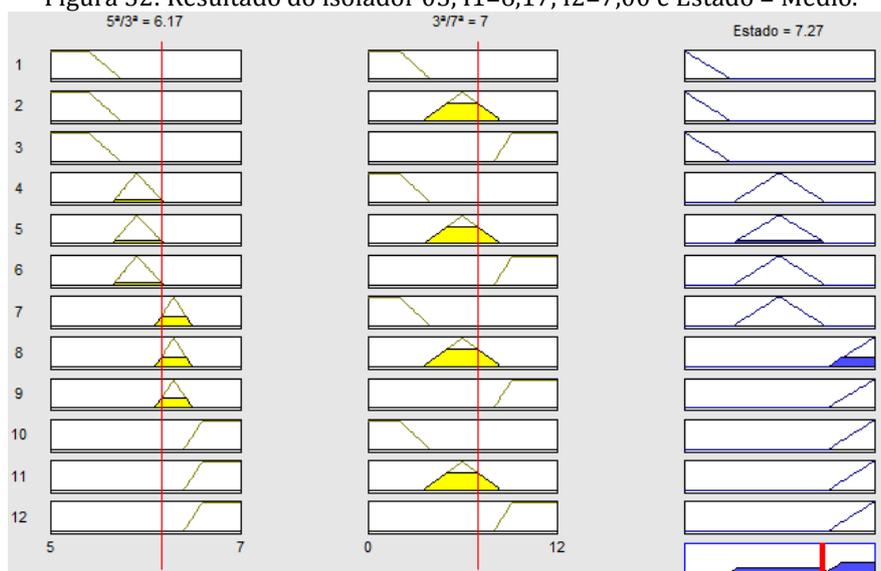


Fonte: Próprio Autor.

Nos casos em que se classificou a variável I1 como MédioAlto tivemos duas situações distintas: na primeira, com o valor de I2 foi de 7,00 e na segunda, 8,25. O caso comprova que a relação entra a sétima e a quinta harmônica pode ser

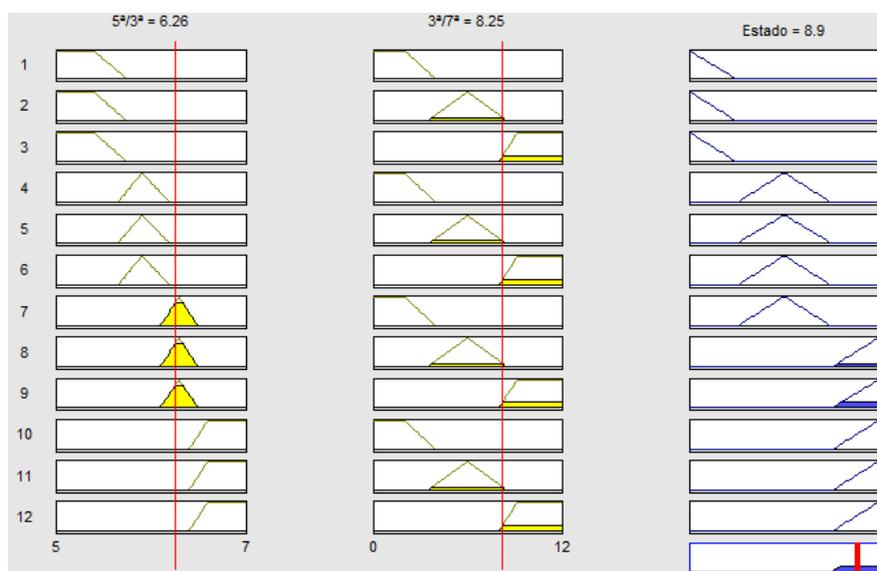
decisiva. Os isoladores que tiveram esses resultados foram respectivamente os isoladores 03 e 08, conforme mostrado na Figura 32 e na Figura 33. O primeiro foi considerado novo, mas como já dito antes, apresentou elevados níveis de corrente de fuga, e o segundo foi considerado mediano. Assim, a classificação do estado dos isoladores foi, respectivamente, Médio e Crítico.

Figura 32: Resultado do isolador 03, $I_1=6,17$, $I_2=7,00$ e Estado = Médio.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 33: Resultado do isolador 08, $I_1=6,26$, $I_2=8,25$ e Estado = Crítico.

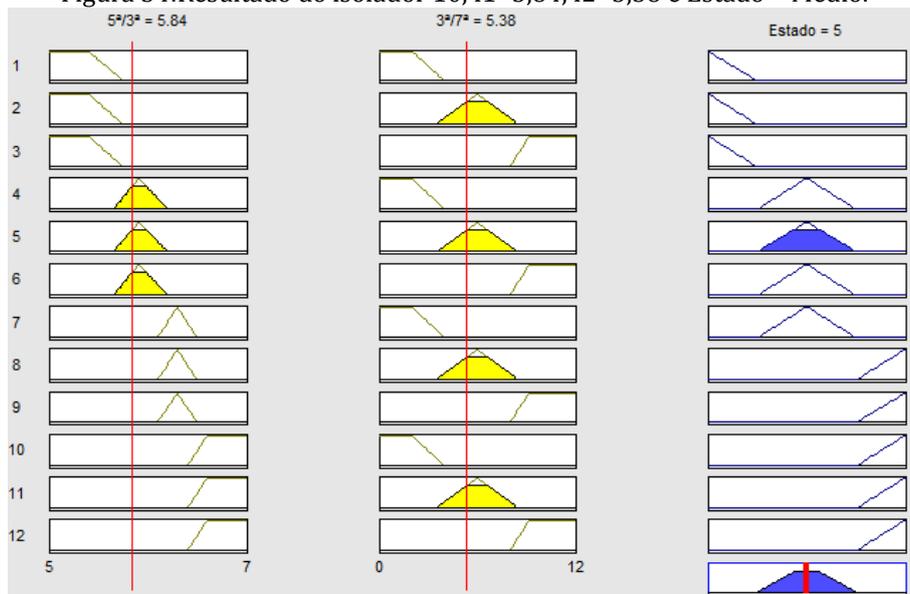


Fonte: Próprio Autor.

Observou-se que para os isoladores classificados como médio de acordo com a relação entre a quinta e terceira harmônicas - isoladores 07, 10, e 16 respectivamente com valores de I_1 iguais a 5,84, 5,84 e 5,9 - diferiram nos valores da relação entre a sétima e a quinta harmônica de forma coerente com as

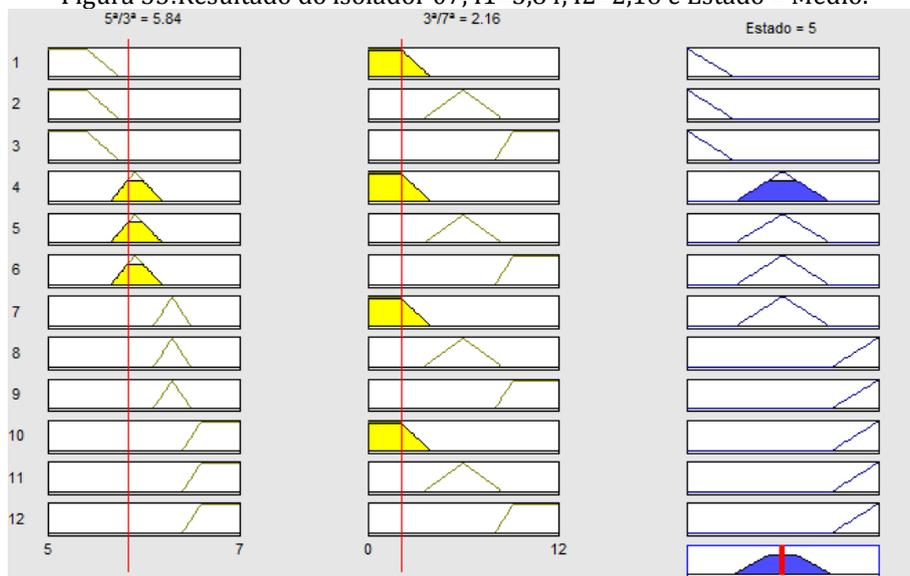
características físicas dos mesmos. O isolador 10, que apresentava muita poluição e um início de erosão na região mais próxima da conexão com as partes energizadas, apresentou um valor de 5,38, conforme mostrado na Figura 34, em comparação com 2,16 e 1,6 dos isoladores 07 e 16, respectivamente mostrados na Figura 35 e Figura 36.

Figura 34:Resultado do isolador 10, I1=5,84, I2=5,38 e Estado = Médio.



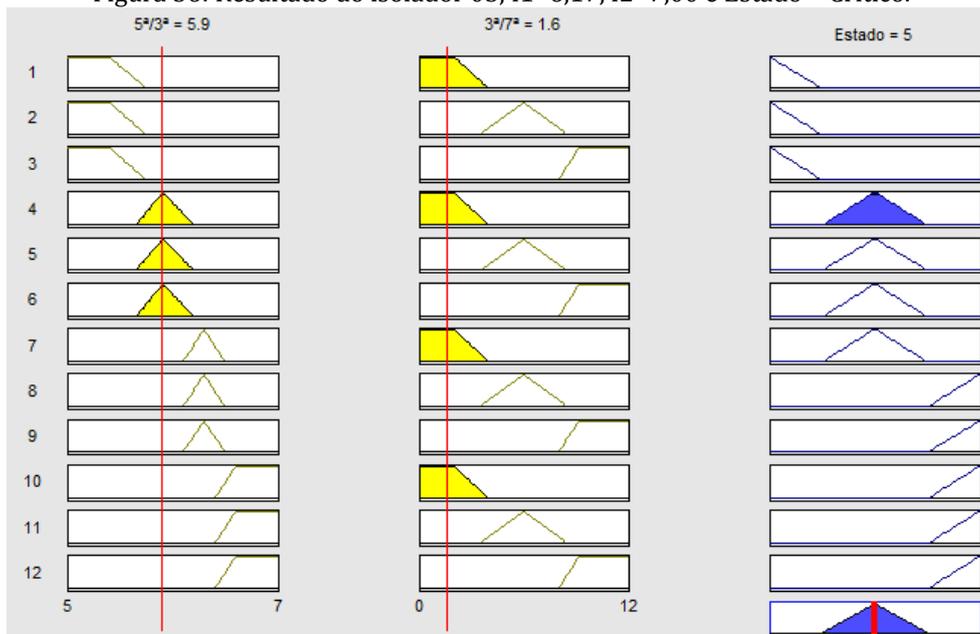
Fonte: Próprio Autor.

Figura 35:Resultado do isolador 07, I1=5,84, I2=2,16 e Estado = Médio.



Fonte: Próprio Autor.

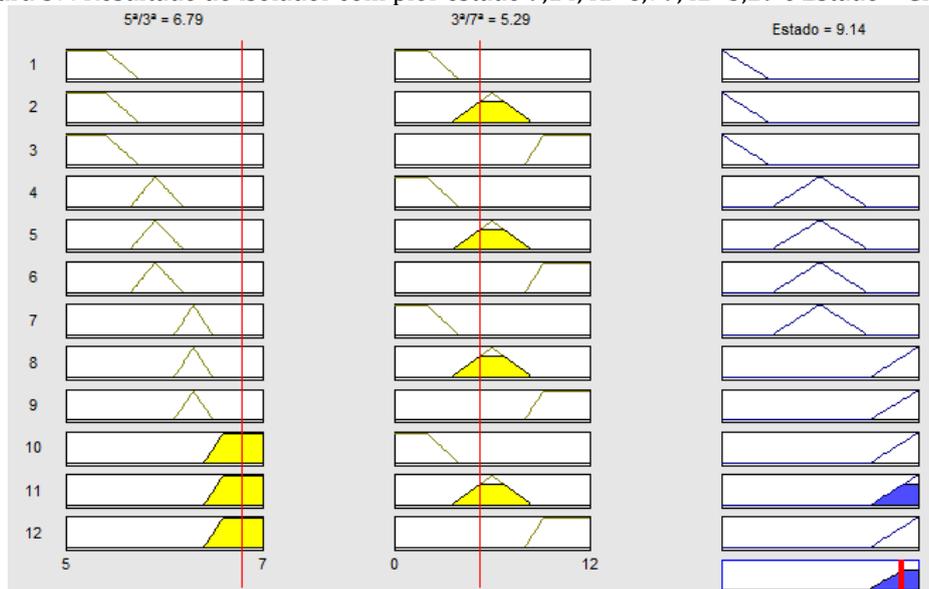
Figura 36: Resultado do isolador 03, I1=6,17, I2=7,00 e Estado = Crítico.



Fonte: Próprio Autor.

Por fim, o isolador que apresentou o pior resultado da variável Estado e mostrado na Figura 37, com o valor 9,14 foi o isolador 05. Este foi considerado Médio pela inspeção visual, mas pelos resultados apresenta problemas, isto significa que mesmo que se possa analisar o isolador de perto, algumas falhas ainda passam despercebidos, ou estão diretamente ligadas a estrutura do núcleo. Para uma análise mais completa, fazem-se necessários ensaios destrutivos da amostra ou a utilização de raio-X para a visualização de falhas internas do equipamento. Estas técnicas estão fora do escopo do trabalho.

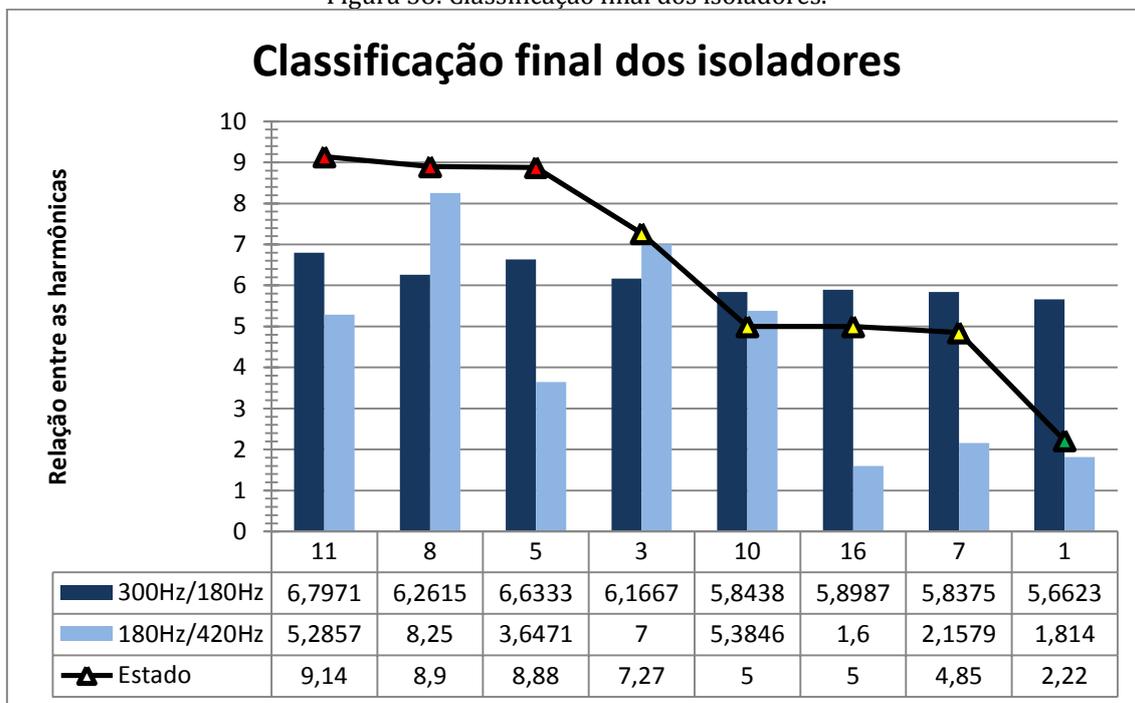
Figura 37: Resultado do isolador com pior estado 9,14, I1=6,79, I2=5,29 e Estado = Crítico.



Fonte: Próprio Autor.

A classificação dos isoladores é mostrada na Figura 38, onde se pode verificar a ordem crescente da classificação de acordo com a variável Estado. E na Tabela 11 pode-se observar a comparação entre a classificação via lógica *fuzzy* e com a inspeção visual.

Figura 38: Classificação final dos isoladores.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 11: Comparação entre a classificação via lógica *fuzzy* e a inspeção visual.

Isolador	Classificação <i>fuzzy</i>	Classificação visual
11	Crítico	Crítico
8	Crítico	Médio
5	Crítico	Crítico
3	Médio	Novo
10	Médio	Crítico
16	Médio	Médio
7	Médio	Médio
1	Novo	Novo

Fonte: Próprio Autor.

Após a análise dos resultados do sistema *fuzzy* utilizado como ferramenta auxiliar na classificação do estado de degradação do isolador, concluiu-se que esse se mostrou eficaz, acertando em 62,5% dos casos estudados. Caso considerem-se os casos em que a lógica *fuzzy* foi mais rígida que a inspeção visual corretos, ou

seja, que a criticidade da classificação foi maior, a assertividade é de 87,5%, sendo divergente em apenas em um dos casos.

Desse modo, constatou-se que o sistema utilizado neste trabalho pôde analisar as variáveis estudadas sem a subjetividade de uma inspeção em campo. Além disso, com a facilidade de aquisição e o desenvolvimento de sensores que permitem um monitoramento à distância, a ferramenta pode auxiliar na observação de um grande volume de dados, podendo classificar previamente os isoladores e filtrar as estruturas que devem ser visitadas e/ou ter seus isoladores substituídos antes da falha.

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos medições de corrente de fuga e do sistema lógico *fuzzy* desenvolvido. No próximo, serão apresentadas as conclusões.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram ensaiados isoladores poliméricos de 230 kV, utilizando o sinal de corrente de fuga como ferramenta de análise quando aplicada a tensão nominal nos seus terminais. Analisou-se a relação entre a amplitude das componentes harmônicas, buscando relacioná-las com as características físicas dos isoladores. E, finalmente, com o auxílio de um sistema lógico *fuzzy*, propôs-se uma metodologia que buscou auxiliar quanto à troca dos isoladores no sistema elétrico de transmissão, a partir do seu estado de degradação.

Foi possível concluir que mesmo uma inspeção visual minuciosa não é totalmente confiável, tornando então necessária uma inspeção mais aprofundada, e a análise da corrente de fuga foi bem eficiente.

A análise da relação da amplitude do sinal de corrente de fuga e de suas harmônicas não mostrou uma variação que evidenciasse o estado das características físicas do isolador, necessitando de uma análise mais aprofundada da relação entre as harmônicas. Além disso, durante as duas horas de medição identificou-se uma variação muito pequena das amplitudes do sinal, o que permite analisar o isolador a qualquer momento durante seu funcionamento em campo.

As análises dos dados mostraram que as deformações e os danos nas saias dos isoladores tiveram pouca ou nenhuma influência no sinal de corrente de fuga. Porém, a poluição e a corrosão nos terminais influenciaram diretamente no resultado. A exposição do núcleo e a erosão do polímero que o recobre também mostrou influência, principalmente nos casos que a poluição era menor.

A relação entre a terceira e a quinta harmônica permitiu uma visão mais geral do estado do isolador, sendo influenciada diretamente pelo nível de poluição do isolador e a corrosão do pino e do selo, e, complementarmente, constatou-se então que a relação entre a sétima e a terceira harmônica é diretamente influenciada pela erosão do polímero e exposição do núcleo.

A umidade, apesar de não ser uma das variáveis analisadas nessa dissertação, influenciou no resultado das medições e deve ser considerada na avaliação do isolador.

A correlação entre essas relações permitiu que pudesse ser feita uma análise do estado de degradação dos isoladores poliméricos, neste caso, aplicados a sistemas de transmissão de 230 kV.

Contatou-se que o sistema lógico *fuzzy* atende de forma satisfatória a correlação entre as harmônicas. Sendo assim, esta é uma ferramenta que permite eliminar o fator subjetivo da inspeção visual, ao determinar o nível de degradação do isolador.

Trabalhos futuros

Como continuação ao trabalho realizado, propõe-se:

- Realizar medições com mais amostras para se possa comprovar sua eficiência em um universo maior;
- Aumentar o banco de dados das medições, por meio da realização de mais ensaios em laboratório, e com a alteração controlada dos níveis de poluição e umidade, com a inserção de defeitos internos nos equipamentos;
- Realizar medições de descargas parciais conforme a IEC 60270 ou analisar o isolador via equipamento de raio-X, de modo a detectar possíveis defeitos internos no isolador;
- Associar a medição de corrente de fuga a outras técnicas de inspeção, tais como a medição de radiação infravermelha, de ruído ultrassônico, e efeito corona.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN, M, SALMAN, M.. Aging of Polymeric Insulators (an overview). Rev. Adv. Mater SCI, Department of Electrical Engineering, university of Engineering and Technology, Taxila, Paquistão, 2006.
- ANEEL, Manual de Fiscalização da Transmissão, Brasília, DF, 2004.
- BARONI, D. G. Desenvolvimento de técnica ultra-sônica para medida de porosidade em pastilhas de UO₂, Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- 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.
- BASHIR, N. , AHMAD, H. Odd Harmonics and Third to Fifth Harmonic Ratios of Leakage Currents as Diagnostic Tools to Study the Ageing of Glass Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 3; June 2010
- 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.
- CHANDRASEKAR, S., KALAIVANAN, C., Partial Discharge Detection as a Tool to Infer Pollution Severity of Polymeric Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 1; February 2010.
- COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; NERI, M. G. G.; CAVALCANTI, M. N. Desempenho de Isolador Polimérico por Medição de Temperatura e Corona. XIX SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- EL-HAG, A. H., JAYARAM, S., CHERNEY, E. A., Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of Silicone Rubber Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 1; June 2003.
- EL-HAG, A. H., JAYARAM, S., CHERNEY, E. A., Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-Fog, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Waterloo, Ontario, Canada, 2003.
- FERREIRA, T. V. Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.
- FERREIRA, T. V. Estimativa Inteligente da poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Abril 2011.

FLORENTINO, M. T. B., Análise De Sensibilidade Do Método Dos Vetores De Energia Dos Centroides Das Sub-Bandas Espectrais Aplicado Ao Monitoramento De Isoladores Poliméricos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2015.

GARCIA, A. R. W. S.; SANTOS FILHO, N. Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 1: inventario. Décimo Encuentro Regional Latino Americano de laCigre, 2003.

GERMANO, A.D., Análise da Degradação de Isoladores Poliméricos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R., Modelagem, Controle, Sistemas e Logica Fuzzy, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 1994.

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

GORUR, R. S.; DE LA O, A.; BURNHAM, J. T. Electrical Performance os Non-Ceramic Insulators in Artificial Contamination Tests Role of Resting Time, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 3, no.6, pp. 827–835, Dec. 1996.

GORUR, R. S.; DE LA O, A.; BURNHAM, J. T. Electrical Performance os Non-Ceramic Insulators in Artificial Contamination Tests Role of Resting Time, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 3, no.6, pp. 827–835, Dec. 1996.

GUEDES, C. P. G., Classificação das condições de degradação de isoladores poliméricos pelos níveis de radiação UV (corona) e a lógica fuzzy. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2015.

INMR, Wireless Leakage Current Monitors to Improve Network Performance, ARTICLE ARCHIVE, Utility Practice & Experience June 11, 2016. <http://www.inmr.com/wireless-leakage-current-monitors-improve-network-performance/> acessado em 03/08/2016.

JIANG, X.; YUAN, J.; SHU, L.; ZHANG, Z.; HU, J.; MAO, F.; Comparison of DC Pollution Flashover Performances of Various Types of Porcelain, Glass, and Composite Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no.2, pp. 1183–1190, Apr. 2008.

JIANG, X.; YUAN, J.; SHU, L.; ZHANG, Z.; HU, J.; MAO, F.; Comparison of DC Pollution Flashover Performances of Various Types of Porcelain, Glass, and Composite Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no.2, pp. 1183–1190, Apr. 2008.

KUMOSA, M.; KUMOSA L.; ARMENTROUT, D.. Can Water Cause a Brittle Fracture Failures of Composite Nonceramic Insulators in Absense of Electric Fields? IEEE TransactionsonDielectricsandElectricalInsulation, vol. 11, no.3, pp. 523–533, Jun. 2004.

KUMOSA, M.; KUMOSA L.; ARMENTROUT, D. Causes and Potential Remedies of Brittle Fracture Failure of Composites (Nonceramic) Insulators IEEE TransactionsonDielectricsandElectricalInsulation, vol. 11, no.6, pp. 1037–1048, Dec. 2004.

KUMOSA, M.; KUMOSA, L.; ARMENTROUT, D. Failure Analyses of NonCeramic Insulators Part 1: Brittle Fracture Characteristics. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 21, no.3, pp. 14–27, Jun. 2005.

LAPP INSULATORS; Rodurflex Composite Insulators. Catalog ROD01A, LeRoy, NY, 2006. Disponível via internet na URL: https://www.lappinsulators.com/fileadmin/user_upload/RodurflexCatalog.pdf . Arquivo capturado em Julho de 2016.

LIRA, G. R. S., Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.

MENDONCA, P. L., ANGELINI L. M. G., NALLIN F.E., COSTA, E. G., FERREIRA, T. V., GERMANO, A. D., Monitoramento de Isoladores Poliméricos em Linhas de Transmissão através de Sensor de Corrente de Fuga, XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI 2010, São Paulo, SP, Brasil.

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

PINHEIRO, W. A corrente de fuga como parâmetro indicativo do estado de degradação de materiais poliméricos de rede compacta de media tensão, instalados em ambientes agressivos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, SP, 2008.

PROTZEK, B. R., MARAN, M. A., ROSA JUNIOR A. L. R., ANDREOLI, E., GUARIZI, R. D., BORGES, D. F., Materiais elétricos: compêndio de trabalhos, Vol. 1, Laboratório de Materiais LAMAT, Universidade Federal do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu – PR, 2010.

QUEIROS, J. P. M., Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

REYNDERS J. P.; JANDRELL I. R.; REYNDERS S. M. Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outdoor use, IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, no.5, pp. 620–630, Out. 1999.

SCURI, A. E., Filtros Interativos para Imagens Digitais no Domínio da Frequência, Dissertação de Mestrado, Departamento de Informática Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

SILVA, P. P. J. C. G. P. O., Inspeção da Degradação de Isoladores de Composito de Linhas de Transmissão Através de Ensaio Não Destrutivos, Dissertação de Mestrado, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2009.

SOUZA, B. A., Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

THOMAZINI, D. Classificação da Hidrofobicidade em Isoladores Elétricos Poliméricos de Alta Tensão Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009

WANG, X.; KUMUGAI, S.; KOBAYASHI, K.; YOSHIMURA, N.; KIMURA, J.; SAKAI, H. Degradation of Surface Hydrophobicity of Outdoor Polymer Insulating Material from Erosion of Acid Rain. Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Seoul, South Korea, May 1997.

YANAGUIZAWA, J. A.; SHINOHARA, A. H. Isolamento mínimo em cadeias de isoladores de vidro danificados por vandalismo em linhas de transmissão. Cientec – Revista de Ciência, Tecnologia e Humanidades do IFPE, Recife, PE, 2011.