

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

Vicente Moises dos Santos Junior

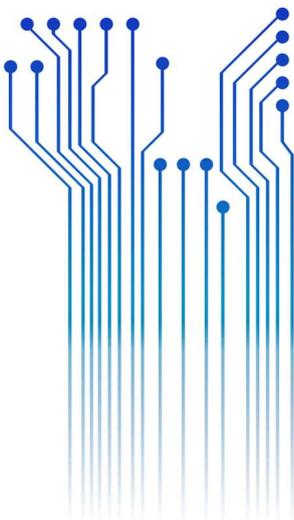


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
**AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DOS PARA-RAIOS DE  
DISTRIBUIÇÃO E A CORRENTE DE FUGA**



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande - PB  
2021



VICENTE MOISES DOS SANTOS JUNIOR

AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DOS PARA-RAIOS DE DISTRIBUIÇÃO E A  
CORRENTE DE FUGA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor Ronimack Trajano de Souza, Dr.

Campina Grande  
2021

VICENTE MOISES DOS SANTOS JUNIOR

AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DOS PARA-RAIOS DE DISTRIBUIÇÃO E A  
CORRENTE DE FUGA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em        /        /

**Professor Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Ronimack Trajano de Souza, Dr.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

*Dedico este trabalho aos meus pais Vicente (in memoriam) e Mirian, a minha irmã  
Suanne e a minha namorada Ana Raquel.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele eu não teria conseguido chegar onde cheguei. Ao meu Pai Vicente (in memorian) e a minha Mãe Mirian, por tudo que fizeram por mim e pela pessoa que sou hoje. Por todo o trabalho e todo esforço sempre procurando me oferecer o melhor.

À minha irmã Suanne que sempre que precisei de suas orientações estava lá para me ajudar, assim como todos os meus familiares mais próximos, por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais tristes e mais alegres, torcerem pelo meu sucesso e pela preocupação com o meu bem-estar.

Agradeço a minha namorada e companheira de todas as horas Ana Raquel, por toda paciência, amor, cuidado, palavras de apoio, companheirismo e conselhos que tanto me ajudaram no processo de amadurecimento.

Agradeço a minha segunda família em nome de Kátia e Francisco, por todo suporte, bons momentos compartilhados e torcida pelo meu sucesso.

Agradeço aos meus amigos mais próximos Artur Augusto, Barbara, Felipe Vas., Felipe Ven., Luan, Maria Clara, Patrícia, Samara e Vinicius Cruz, por todos os bons momentos compartilhados e por toda torcida.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso Evelyne, Giordano, Giovanny, José Vagne, Laécio, Lizandra, Luis, Marcus Vinicius, Samuel, Stayner e Valmir, que foram e são o suporte diante das dificuldades.

Agradeço ao meu orientador Ronimack Trajano, pelo aprendizado e conhecimento compartilhado e pela oportunidade de trabalhar com ele.

Por fim, agradeço aos demais professores e funcionários do DEE por contribuírem na minha formação de forma direta e indireta.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.  
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

**Marthin Luther King**

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de identificar a correlação entre temperatura e corrente de fuga em para-raios de distribuição, uma vez que estes são grandes indicadores de possíveis defeitos nestes equipamentos de proteção da rede elétrica. O monitoramento das condições dos para-raios é fundamental para uma maior proteção da rede elétrica, trazendo, portanto, uma maior confiabilidade para o sistema. Dado isto, foram feitas medições de temperatura e corrente de fuga em diversos conjuntos de para-raios da rede de distribuição do campus I da Universidade Federal de Campina Grande e em ambiente controlado, no Laboratório de Alta tensão da Universidade Federal de Campina Grande. Além disto, foram realizadas medições com para-raios de diferentes fabricantes, com o objetivo de obter uma maior precisão nos resultados. A partir da análise dos resultados obtidos foi possível estabelecer uma correlação entre a corrente de fuga e a temperatura dos para-raios.

**Palavras-chave:** Para-raios, corrente de fuga, temperatura, distribuição.

## ABSTRACT

This work was developed with the objective of identifying the correlation between temperature and leakage current in distribution lightning rods, since these are great indicators of possible defects in these electrical network protection equipment. Monitoring the condition of the lightning rod is essential for greater protection of the electrical network, thus bringing greater reliability to the system. Given this, temperature and leakage current measurements were made in several arrays of the distribution network of campus I of the Federal University of Campina Grande and in a controlled environment, in the High Voltage Laboratory of the Federal University of Campina Grande. In addition, measurements were made with lightning rods from different manufacturers, in order to obtain greater precision in the results. From the analysis of the results obtained, it was possible to establish a correlation between the leakage current and the temperature of the lightning rods.

**Keywords:** lightning rod, leakage current, temperature, distribution.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Característica  $U \times I$  de um para-raios ideal
- Figura 2 – Característica  $U \times I$  para resistores não-lineares de carboneto de silício e óxido de zinco
- Figura 3 – Evolução dos para-raios
- Figura 4 – Instalação de um para-raios de distribuição junto de transformador
- Figura 5 – Detalhes construtivos do para-raios
- Figura 6 – Para-raios de corpo cerâmico para sistemas de alta tensão
- Figura 7 – Para-raios de corpo polimérico
- Figura 8 – Contador de descargas
- Figura 9 – Curvas de suportabilidade  $V \times t$
- Figura 10 – Energia máxima permitida em função da corrente de condução
- Figura 11 – Modelo de para-raios para baixas correntes
- Figura 12 – Exemplo de característica  $V \times I$  de para-raios de ZnO
- Figura 13 – Corrente de fuga total de para-raios de ZnO em diferentes condições de operação
- Figura 14 – Fenômeno da avalanche térmica
- Figura 15 – Curva de estabilidade térmica típica de um para-raios
- Figura 16 – Alicates amperímetro
- Figura 17 – Termovisor.
- Figura 18 – Transformador da UFCG utilizado nas primeiras medições
- Figura 19 – Arranjo para medição.
- Figura 20 – Para-raios modelo 39E da fabricante BALESTRA.
- Figura 21 – Para-raios modelo 37B da fabricante BALESTRA
- Figura 22 – Para-raios da Fabricante KEE
- Figura 23 – Para-raios da fabricante DELMAR.
- Figura 24 – Ilustração do kit de alta tensão utilizado no ensaio.
- Figura 25 – Formato da onda tensão de 8,13kV aplicada nos para-raios.
- Figura 26 – (A) Transformador 1; (B) Imagem térmica do transformador 1, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 24,9°C
- Figura 27 - (A) Transformador 2; (B) Imagem térmica do transformador 2, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 25,7°C.
- Figura 28 - (A) Transformador 3; (B) Imagem térmica do transformador 3, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 28,1°C.
- Figura 29 - (A) Transformador 4; (B) Imagem térmica do transformador 4, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 27,3°C.
- Figura 30 - (A) Transformador 5; (B) Imagem térmica do transformador 5, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 25,9°C.
- Figura 31 - (A) Transformador 6; (B) Imagem térmica do transformador 6, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,5°C.
- Figura 32 - (A) Transformador 7; (B) Imagem térmica do transformador 7, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,6°C.
- Figura 33 - (A) Transformador 8; (B) Imagem térmica do transformador 8, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,6°C.
- Figura 34 - (A) Transformador 9; (B) Imagem térmica do transformador 9, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,2°C.
- Figura 35 - (A) Transformador 10; (B) Imagem térmica do transformador 10, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,4°C.
- Figura 36 – Imagem térmica do para-raios BALESTRA 39E, o ponto 1 indica 28,2 °C aproximadamente.

Figura 37 – Imagem térmica do para-raios BALESTRA 37B, o ponto 1 indica 28,2 °C aproximadamente.

Figura 38 – Imagem térmica do para-raios KEE, o ponto 1 indica 29,1 °C aproximadamente.

Figura 39 – Imagem térmica do para-raios DELMAR, o ponto 1 indica 39,6 °C aproximadamente.

Figura 40 – Imagem térmica dos três primeiros para-raios. Para efeito de comparação, é possível ver que o terceiro para-raios (KEE) está mais quente que os demais.

Figura 41 – Imagem térmica dos três últimos para-raios. Para efeito de comparação, é possível ver que o quarto para-raios (DELMAR) está mais quente que os demais.

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de para-raios com relação a corrente nominal.

Tabela 2 – Dados Coletados das medições de corrente de fuga dos para-raios da rede da UFCG.

Tabela 3 – Corrente de Fuga medidas no ensaio.

Tabela 4 – Variação da temperatura dos para-raios.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SiC	Carboneto de Silício
ZnO	Óxido de Zinco
NBR	Norma Brasileira
ABRATE	Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

# SUMÁRIO

## 1 SUMÁRIO

Agradecimentos .....	vi
Resumo .....	viii
Abstract .....	ix
Lista de Ilustrações .....	x
Lista de Tabelas .....	xii
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	xiii
Sumário .....	xiv
1 Introdução .....	xv
2 Fundamentação Teórica .....	16
2.1 Para-raios .....	16
2.2 Corrente de Fuga .....	27
2.3 Características Térmicas .....	31
3 Revisão Bibliográfica .....	33
3.1 Corrente de Fuga .....	33
3.2 Uso do Termovisor .....	36
4 Materiais e Métodos .....	38
5 Resultados e Discussões .....	44
6 Conclusão .....	54
Referências .....	56

# 1 INTRODUÇÃO

Os para-raios são equipamentos fundamentais para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico. Eles protegem os equipamentos do sistema elétrico, principalmente das subestações, contra surtos de tensão devido as descargas atmosféricas e sobretensões de manobra. Eles têm como princípio de funcionamento o escoamento da corrente de surto para a malha de aterramento. Os supressores de surtos, como também são conhecidos os para-raios, são basicamente de dois tipos, os feitos com varistores de carboneto de silício (SiC) agregados a centelhadores e os fabricados com varistores de óxido de zinco (ZnO), que dispensam o uso de centelhadores, sendo o segundo amplamente utilizado atualmente.

É importante que, para o bom funcionamento da proteção da rede elétrica de distribuição, os para-raios não apresentem defeitos, a fim de que quando seu uso for solicitado, eles estejam em plena condição de suprimir o surto decorrente das sobretensões. No entanto, pode acontecer defeitos com o decorrer do tempo e assim o mesmo possa vir a falhar quando solicitado. Desse modo, faz-se necessário estudos que apresentem formas de diagnóstico de possíveis falhas para os para-raios.

Este trabalho tem como objetivo correlacionar a corrente de fuga, a qual flui constantemente pelos para-raios de distribuição do tipo ZnO, em pleno funcionamento, com a temperatura dos mesmos, visto que estas são duas formas de análise de defeito em para-raios.

O trabalho foi dividido em 6 capítulos, sendo este o primeiro que apresenta uma breve introdução acerca do tema. O segundo contém uma fundamentação teórica. O terceiro contém uma revisão bibliográfica. O quarto capítulo apresenta uma discussão de como foram realizados os experimentos, apresentando os materiais e métodos utilizados para a obtenção dos dados. O quinto capítulo traz uma análise dos resultados obtidos através das medições realizadas e uma discussão sobre esses. Por fim o capítulo 6, de conclusão, destaca os principais entendimentos do trabalho, explicita algumas das dificuldades durante as medições e também destaca algumas sugestões.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas uma fundamentação teórica sobre para-raios de forma geral, corrente de fuga dos para-raios e características térmicas dos para-raios.

### 2.1 PARA-RAIOS

Um dos grupos de procedimentos de monitoramento e diagnóstico de para-raios, numerosamente utilizados pelas concessionárias de energia elétrica,

Os para-raios, também conhecidos como supressores de surto de tensão, são os equipamentos encarregados pelo controle de parcelas das sobretensões que ocasionalmente surgem no sistema, sejam elas causadas por descargas atmosféricas ou manobras. Dada essa responsabilidade, eles são fundamentais para a confiabilidade, continuidade da operação e economia do sistema elétrico. Os para-raios atuam, de forma geral, como limitadores de tensão, impossibilitando que valores mais altos que os projetados atinjam outros equipamentos [1]. Os para-raios são utilizados para proteger os diversos equipamentos que compõem uma subestação de potência ou simplesmente um único transformador de distribuição instalado em poste. Os para-raios limitam as sobretensões a um valor máximo, que é tomado como o nível de proteção que o para-raios oferece ao sistema [3].

Apesar de sua notável atribuição, os para-raios são equipamentos com custos menores e tamanhos reduzidos, quando comparados a outros equipamentos de uma subestação. A sua precisa escolha juntamente com seu posicionamento correto dentro da subestação contribuirá na redução dos custos dos outros equipamentos, dado que o isolamento é uma parte considerável no preço de um equipamento [2].

É válido afirmar que um para-raios, de forma geral, é um equipamento simples, quando visto do ponto construtivo, uma vez que é formado por um conjunto de elementos resistivos não lineares dispostos em série, ou série-paralela, com ou sem centelhador agregado. Estes elementos são envolvidos por invólucros feitos, basicamente, de porcelana ou de um polímero amorfo ou cristalino[1]. Em sua condição normal de operação, o para-raios se assemelha a um circuito aberto, no entanto, é possível que flua

uma corrente por ele, conhecida como corrente de fuga. No momento em que acontece uma sobretensão, seja qual for sua natureza, circula pelo conjunto de resistores não lineares uma corrente, conhecida como corrente de descarga, e esta limita a sobretensão que atinge os outros equipamentos [2].

A Figura 1 expõe a característica tensão (U) x corrente (A) de um para-raios dito ideal. Nestes casos ditos ideais, a circulação de corrente só irá acontecer uma vez que a tensão de corte seja atingida.

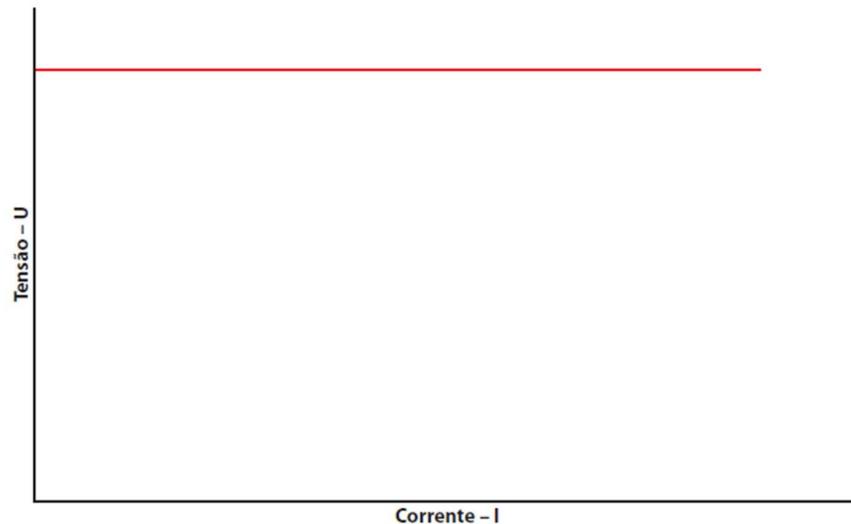


Figura 1 – Característica U x I de um para-raios ideal [1].

No entanto, a característica ideal do para-raios apresentada no parágrafo anterior não existe, tendo a característica não-linear apresentada na Figura 2. O carboneto de silício (SiC) e o óxido de zinco (ZnO) são as principais substâncias utilizadas na fabricação dos resistores não-lineares dos para-raios. A Figura 2 mostra que o ZnO exibe uma característica não linear superior à do SiC na região de intensidades de correntes mais baixas.

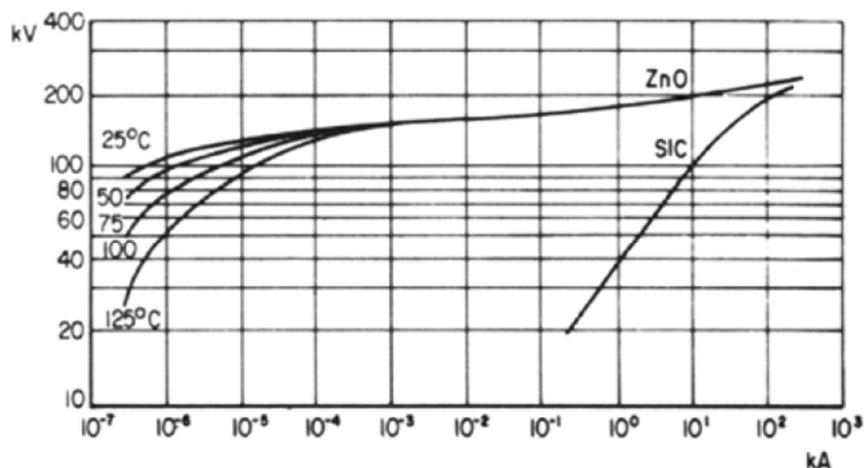


Figura 2 – Característica U x I para resistores não-lineares de carboneto de silício e óxido de zinco [1].

Por consequência da melhor característica não-linear do óxido de zinco, atualmente, o mesmo está sendo preferido em detrimento do SiC, tanto para a área de transmissão quanto de distribuição de energia elétrica, dispensando, ainda, o uso de centelhadores de qualquer natureza [1]. Além disso os para-raios de óxido de zinco apresentam como vantagem a simplicidade construtiva, uma vez que podem ser compostos apenas pelas pastilhas de ZnO, montadas dentro de um invólucro, na grande maioria, de porcelana [2].

De acordo com o que foi mencionado, os para-raios podem possuir ou não centelhadores, a depender de qual for o material utilizado na fabricação do mesmo no elemento não-linear, da aplicação do para-raios e de como foi projetado pelo fabricante [1].

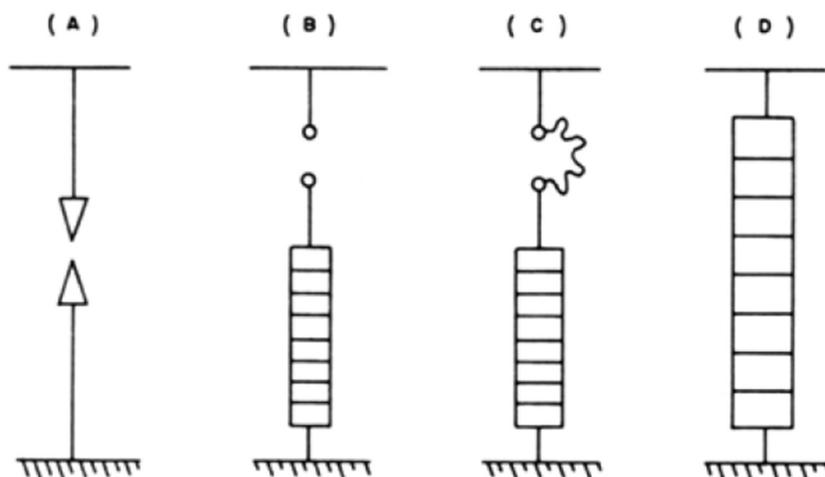


Figura 3 – Evolução dos para-raios [2].

Na Figura 3 é apresentado o curso evolutivo dos para-raios ao longo da história. A ilustração (A) aponta o primeiro dispositivo utilizado na proteção dos equipamentos em uma subestação, o centelhador. Ainda hoje este tipo de dispositivo possui aplicação, eles estão em sistemas e redes de baixa tensão, telecomunicação e eletrônicos, onde a corrente é, em frequência nominal, inferior a 50 ampères [1]. Este tipo de dispositivo apresenta como grande desvantagem o estabelecimento de um curto-circuito, o qual deve ser extinto pelo sistema de proteção o quanto antes [2]. Com a finalidade de evitar essa desvantagem, foi idealizado o dispositivo apresentado na ilustração (B), que é conhecido como para-raios “convencional”, este consiste, basicamente, em um centelhador em série com um resistor não-linear, com o objetivo de limitar a corrente de descarga. Comumente, os resistores não-lineares apresentam resistência elevada, o que acarreta uma tensão residual elevada nos terminais do para-raios. No entanto, na prática, isso não é um problema grande, uma vez que os equipamentos são projetados com níveis de isolamento elevados [1].

A ilustração (C) apresenta a evolução do dispositivo que utiliza o centelhador com os resistores não-lineares. O seu funcionamento é baseado no alongamento do arco através do centelhador com o auxílio de um campo magnético, o qual permite um alongamento do arco elétrico, provocando um aumento da tensão nos terminais do para-raios, o que limita a corrente até sua extinção [2]. A ilustração (D) apresenta a fase atual de desenvolvimento dos para-raios, nos quais são utilizados, em sua confecção, somente blocos de resistores não-lineares. Tais resistores são fabricados a partir de um procedimento cerâmico sendo o óxido de zinco o principal elemento, e, dada essa característica de fabricação, o resistor não-linear de óxido de zinco apresenta propriedade não-linear superior a do carboneto de silício [1]. Esta alta não-linearidade do ZnO permitiu a dispensa do uso dos centelhadores, o que simplificou a fabricação dos para-raios e aumentou a confiabilidade.

Quanto aos aspectos construtivos, podemos separar os para-raios fabricados de carboneto de silício (SiC) dos para-raios de óxido de zinco (ZnO) para maior compreensão. Os para-raios de SiC são basicamente constituídos de seis partes: resistores não-lineares feitos de carboneto de silício, corpo de porcelana, centelhadores, desligador automático, protetor contra sobrepessão e a mola de compressão [3], no entanto este tipo de para-raios não estão sendo mais utilizados no mercado.

A Figura 4 apresenta como o para-raios é fixado junto de um transformador de distribuição.



Figura 4 – Instalação de um para-raios de distribuição junto de transformador [3].

Já os para-raios constituídos de óxido de zinco – que foram desenvolvidos em 1979 - são formados basicamente de três partes, variando de fabricante para fabricante, sendo elas: os resistores não-lineares (constituídos por blocos cerâmicos compostos a partir de uma mistura de ZnO, em sua maioria, e de outros óxidos metálicos, como o manganês e o cobalto, e a partir de processos fabris como a prensagem e o aquecimento, que chega a 1.300°C, são obtidos os blocos), corpo cerâmico (formado por uma única peça de cerâmica na qual os varistores serão alocados internamente, o detalhe é que o volume interno é maior que o volume ocupado pelos blocos dos resistores) ou corpo polimérico (formado por uma borracha de silicone com diversas propriedades químicas, e ao contrário do de porcelana, não possui espaços vazios aumentando sua confiabilidade e segurança em caso de falha), e o contador de descarga (que tem como objetivo contar o número de operações do dispositivo)[3].

A Figura 5 apresenta a parte interna de um para-raios feito de ZnO fabricado em um corpo de porcelana e a Figura 6 apresenta a parte externa de uma para-raios de alta tensão também em corpo de porcelana.

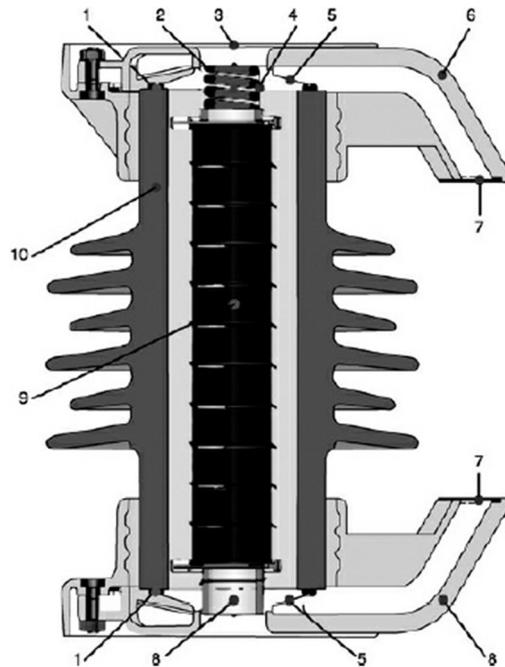


Figura 5 – Detalhes construtivos do para-raios: (1) anel de selagem; (2) mola de contato; (3) cobertura do flange; (4) fita de conexão de cobre; (5) cobertura de selagem; (6) duto de ventilação; (7) placa de dados; (8) *desiccant bag*; (9) bloco de zinco; (10) isolador de porcelana[3].



Figura 6 – Para-raios de corpo cerâmico para sistemas de alta tensão[3].

A Figura 7 apresenta a parte externa de um para-raios de corpo polimérico e a Figura 8 mostra os detalhes de um contador de descarga, cuja função é registrar o número de descargas que aconteceram no sistema, no entanto, ele é utilizado somente em subestações de alta tensão.

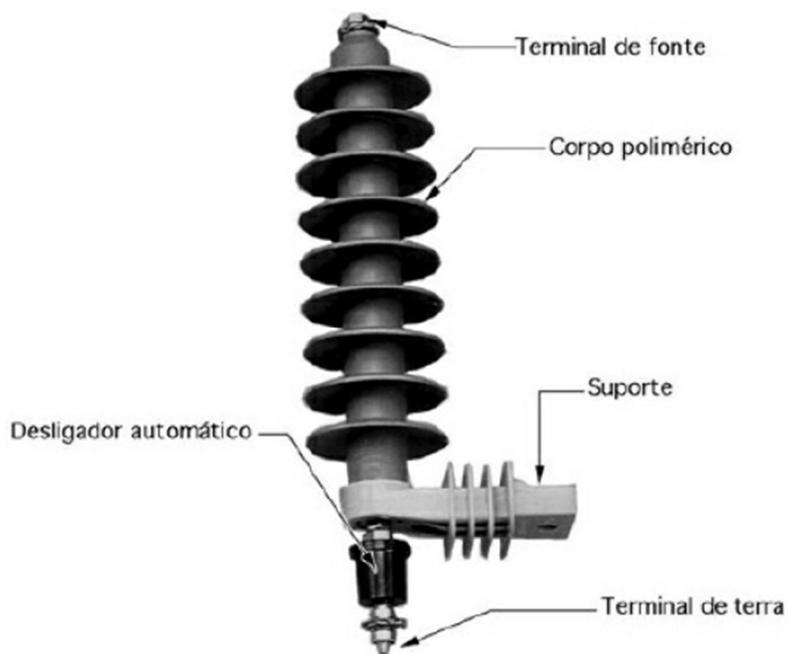


Figura 7 – Para-raios de corpo polimérico[3].

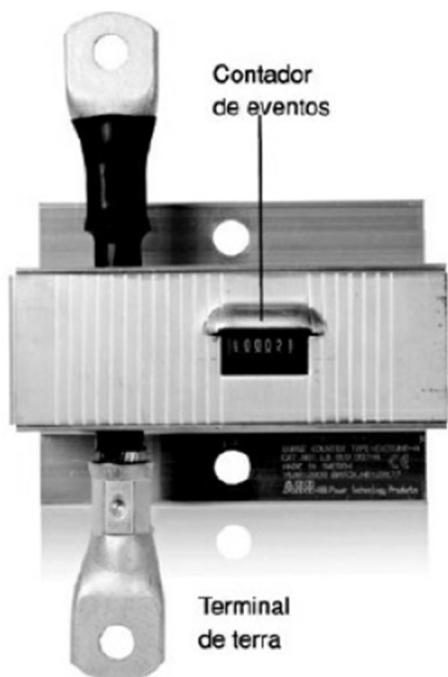


Figura 8 – Contador de descargas[3].

Os para-raios de ZnO apresentam várias vantagens técnicas e operacionais, das quais podem ser citadas: a não existência de corrente subsequente, apresentarem maior capacidade de absorção de energia, serem dotados de um nível de proteção mais bem definido, resultando em uma redução da margem de segurança do isolamento dos outros equipamentos e por não possuírem centelhadores a curva de atuação dos para-raios de ZnO não apresenta transitórios[3].

Quanto aos para-raios de corpos poliméricos, uma vez que estes também não possuem centelhador, eles permanecem energizados constantemente, fluindo por eles uma corrente de fuga (que será explicado mais a frente), exigindo que os varistores sejam de excelentes materiais.

Além disso tudo, podemos diferenciar as características elétricas dos para-raios de carboneto de silício, comumente chamados de convencionais, das características elétricas dos para-raios de óxido de zinco.

Os para-raios convencionais têm diversas características elétricas, entre elas podemos citar: tensão nominal (é a máxima tensão eficaz de frequência industrial, na qual é aplicada continuamente entre os terminais do para-raios, normalmente, esta tensão é o limite para sobretensões dinâmicas, podendo exceder esses limites quando explicitado pelo fabricante), tensão de *Reseal* (é a maior tensão para o qual o para-raios tem condições de interromper a corrente subsequente), tensão residual (é o valor máximo da tensão que aparece entre os terminais do para-raios durante a passagem da descarga), tensão disruptiva de frequência industrial (é o valor da tensão medida como valor de crista dividido por  $\sqrt{2}$ , que causa a disrupção dos centelhadores e quanto mais elevado esse valor melhor), tensão disruptiva de impulso (é o maior valor da tensão de impulso atingido antes da disrupção), tensão disruptiva na frente do impulso (é o maior valor de crista da tensão de impulso atingido na frente, antes da disrupção), tensão disruptiva de impulso atmosférico normalizado (é o menor valor de crista de impulso atmosférico que causa disrupção em todas as aplicações), tensão disruptiva de impulso de manobra (é o maior entre os valores para ambas polaridades das tensões disruptivas de alta probabilidade e de impulso de manobra na sobretensão) e a capacidade de absorção de energia (este valor abrange a capacidade dos varistores e dos centelhadores, e geralmente é da ordem de 5kWs por kV)[1].

Já com relação aos para-raios de óxido de zinco podemos citar as seguintes características elétricas: tensão nominal (é o valor máximo RMS na frequência industrial, para o qual o para-raios foi projetado), tensão máxima de operação em regime contínuo (é o maior valor de ensaio para o qual o para-raios é projetado), capacidade de sobretensão temporária (é definida em função da característica de suportabilidade tensão x duração, onde é indicada a quantidade de tempo para a qual é permitida a aplicação de uma tensão superior à tensão máxima de operação contínua, a Figura 9 apresenta tal característica), nível de proteção a impulso de manobra (depende da corrente de condução no para-raios, a qual aumenta à medida que o valor do impulso de tensão aumenta, com a ausência de

testes específicos o valor de 3kA é definido), tensão residual (é a tensão que aparece nos terminais do para-raios quando da passagem de um corrente de impulso na forma  $8 \times 20\mu s$ ) e a capacidade de absorção de energia (geralmente para-raios utilizados em sistemas de extra alta tensão têm capacidade de absorção em torno de 7 a 8 kW por kV, a Figura 10 apresenta a variação da capacidade de absorção de energia de para-raios fabricados pela *General Electric*)[2].

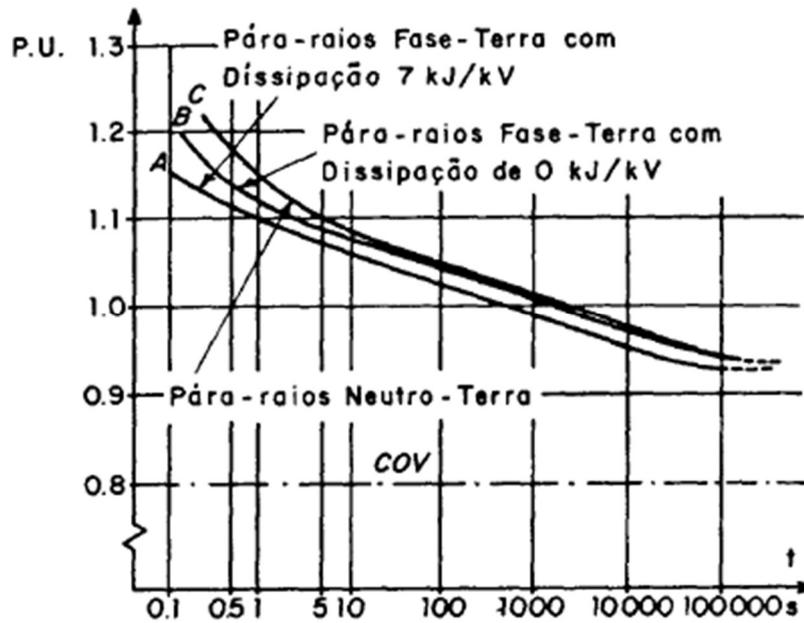


Figura 9 – Curvas de suportabilidade  $V \times t$  [2].

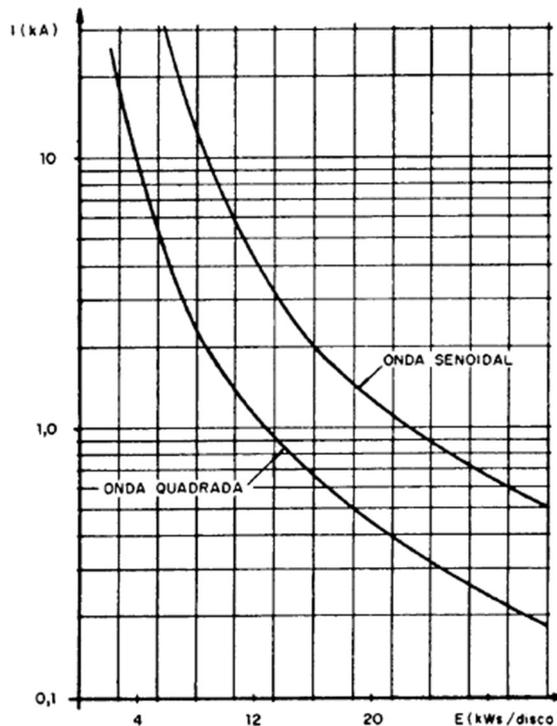


Figura 10 – Energia máxima permitida em função da corrente de condução [2].

Posteriormente, faz-se necessário algumas informações sobre aspectos relacionados com a seleção de para-raios. Tal seleção é importante para a correta proteção dos equipamentos e, por isso, precisa levar em consideração diversos fatores, como a tensão máxima de frequência industrial, sobretensões, efeito distância, características de proteção, isolamento dos equipamentos e margens de proteção [1].

Quando ocorre um surto de tensão, seja qual for a natureza, atinge o valor de corte, isto é, quando atinge a valor de atuação dos para-raios, passa a circular por eles uma corrente que pode ser aproximada pela equação 1[1].

$$I = k * U^\alpha \quad (1)$$

Em que:

- I = Corrente de descarga no para-raios.
- U = Tensão aplicada aos terminais do para-raios.
- k = Constante que depende do projeto e da tensão nominal do para-raios.

A constante  $\alpha$  está compreendida entre 4 e 6 para varistores de carboneto de silício e entre 25 e 30 para varistores de óxido de zinco. Desse modo, a partir da equação 1 podemos ver que a corrente de descarga pode alcançar muitos kA durante o processo de escoamento do surto e de algumas centenas de ampères após sua dissipação, tendo que o para-raios ser capaz de interromper essa segunda corrente, chamada de corrente subsequente. Para para-raios de óxido de zinco, devido a sua condição de condução continuada em operação normal, a corrente é de apenas alguns miliampères[1].

#### **- Tensão máxima na frequência industrial**

Com relação a tensão máxima na frequência industrial, a tensão nominal de um para-raios convencional deve ser igual ou superior à maior sobretensão na frequência industrial que pode ocorrer no sistema. Este é um critério bastante utilizado, quando determinados fabricantes garantem que seus para-raios tem a capacidade de suportar sobretensões temporárias acima da tensão nominal, para o qual foi projetado. As causas mais constantes de sobretensões temporárias são: faltas fase-terra, rejeição de carga, ferro-ressonância, indução em circuitos paralelos e perda de conexão a terra em sistemas aterrados. Para os para-raios de óxido de zinco, por causa de suas características intrínsecas, é determinado que a tensão máxima em regime contínuo não pode ultrapassar 80% do valor da tensão nominal, sempre sendo observada as informações fornecidas pelo fabricante[2].

### - Classe dos para-raios

Com relação a classe dos para-raios, é preciso selecioná-la com base no nível de proteção requerido, ou seja, o que foi decidido no projeto e também observar outros critérios como as tensões nominais disponíveis, o limite de corrente de alívio de sobrepressão, ou de suportabilidade a faltas, e as características de durabilidade que são apropriadas aos requisitos do sistema. Além disso, a classe escolhida pode ser influenciada pela importância da subestação ou do equipamento a ser protegido. Assim, os para-raios são classificados pela sua corrente de descarga nominal, capacidade de descarga de linhas de transmissão e suportabilidade a corrente de faltas[1]. Em relação a corrente nominal podemos classificar os para-raios de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de para-raios com relação a corrente nominal.

Tipo / Classe	Estação	Distribuição	Secundária
SiC	20 kA, 15 kA e 10 kA	5 kA	1,5 kA
ZnO	20 kA e 10 kA	10 kA e 5 kA	-

Adaptado de [1].

### - Características de proteção

No tocante as características de proteção, para para-raios convencionais é apresentada como uma curva de tensão x tempo e é normalmente fornecida pelos fabricantes. Normalmente as informações disponíveis são: disparo de onda escarpada, disparo para onda 1,2 x 50  $\mu$ s e tensão residual para onda 8 x 20  $\mu$ s. O detalhe fica por parte da tensão residual, esta que depende de uma sequência de considerações a respeito das características das descargas atmosféricas na região. O nível de proteção para impulso de manobra é o maior valor entre o nível de disparo para impulso de manobra e a tensão residual para ondas do tipo manobra. Os para-raios de ZnO têm suas características de proteção definidas de forma similar aos convencionais, de forma a atender as normas tradicionais e facilitar a comparação entre eles. Habitualmente, as características fornecidas são as de onda escarpada, tensão residual e impulso de manobra, além de informações sobre a variação da tensão residual em função da frente de onda[2].

O nível de isolamento de um equipamento é o grupo de valores de tensões suportáveis aplicadas ao equipamento durante os ensaios e definidas em normas específicas, que caracteriza a suportabilidade dielétrica da isolação[1]. A norma NBR 6939 estabelece que, para equipamentos com tensão máxima igual ou menor a 245 kV, o nível de isolamento é definido pelas tensões suportáveis normalizadas de impulso atmosférico e de frequência industrial. Para equipamentos com tensões maiores a 245 kV,

considera-se as tensões suportáveis normalizadas de impulsos de manobra e atmosférico[2].

Quando o para-raios não se encontra conectado diretamente aos terminais do equipamento a ser protegido, é possível que oscilações provoquem tensões superiores ao nível de proteção do para-raios, que se encontram associadas com a separação entre o equipamento e o para-raios, e conseqüentemente, aos fenômenos das ondas viajantes[2]. A avaliação da elevação da tensão nos terminais dos equipamentos a serem protegidos deve ser realizada através do uso de programas digitais de transitórios, sendo esta elevação função da taxa de crescimento da onda de tensão, do comprimento dos barramentos e das conexões situadas entre o para-raios e o transformador e das capacitâncias dos equipamentos[1].

A coordenação de isolamento é efetuada considerando-se determinadas relações entre o nível de isolamento dos equipamentos e o nível de prostração dos para-raios. Normalmente, é recomendado uma margem mínima de 15% na região de impulsos de manobra e de 205 na região de impulsos atmosféricos. O objetivo central para a adoção destas margens está relacionado com possíveis deteriorações das características de proteção dos para-raios, devido à poluição e envelhecimento[2].

É importante ressaltar as vantagens dos para-raios de óxido de zinco em relação aos convencionais, sendo elas: simplicidade na construção (aumentando a confiabilidade), o nível de proteção é mais bem definido em razão da ausência de centelhador, melhor desempenho sob contaminação, maior capacidade de absorção de energia, possibilidade de dividir a energia entre os diversos para-raios instalados na subestação e entra e sai de condução suavemente.

## 2.2 CORRENTE DE FUGA

Corrente de fuga é, basicamente, a corrente que flui pelos equipamentos em direção ao aterramento. Para os casos dos para-raios de óxido de zinco, a corrente de fuga é da ordem dos miliampères que flui continuamente por eles durante sua operação normal, devido a sua natureza construtiva anteriormente explicada. Tal corrente é separada pela literatura em suas componentes resistivas e capacitivas, com a componente capacitiva predominante e uma parte resistiva significativamente menor (5 a 20% da corrente total). A corrente de fuga capacitiva é causada pela permissividade dos varistores de óxido metálico, pelas capacitâncias parasitas e pelos capacitores de graduação

internos[4]. A componente resistiva causa mais danos aos para-raios e por isso é alvo de maiores estudos.

Como se espera que o para-raios também se comporte como isolador, as propriedades isolantes são indispensáveis para a longevidade desse equipamento e para a confiabilidade do sistema de potencial o qual ele integra[4].

A Figura 11 apresenta o modelo elétrico convencional para representar a corrente de fuga de baixa intensidade que flui pelos para-raios, tal modelo é o composto por uma capacitância  $C$ , que corresponde a permissividade dos varistores de ZnO e as capacitâncias parasitas, sendo função da tensão aplicada ao para-raios, pela resistência não-linear  $R$  representa a característica não linear da curva  $V \times I$  do para-raios, que foi mostrado na seção anterior. É importante pontuar que a resistência  $R$  também é função da temperatura do varistor[5].

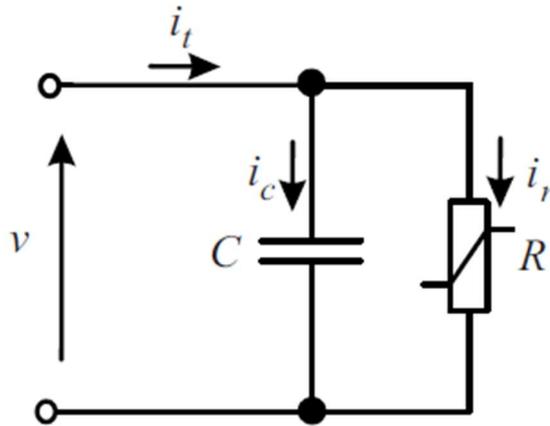


Figura 11 – Modelo de para-raios para baixas correntes[5].

A partir da Figura 11 pode-se extrair as equações 2 e 3:

$$i_t(t) = i_c(t) + i_r(t) \quad (2)$$

Em que:

$$i_c(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (3)$$

Um grande aumento na corrente de fuga resistiva é necessário antes que uma mudança perceptível ocorra no nível de corrente de fuga total. Portanto, a corrente de fuga total é inadequada para fins de diagnóstico de para-raios. Em vez disso, pode ser usado para outros fins de diagnóstico ou manutenção[4].

Podemos definir a corrente de fuga resistiva como o valor máximo da componente resistiva da corrente de fuga total, isto é o valor instantâneo da corrente quando a tensão entre os terminais dos para-raios está em seu máximo. No instante em que ocorre a

corrente de fuga, ou seja, em momentos diferentes aos de descarga, a corrente resistiva é função da temperatura e da tensão aplicada aos varistores[4].

A Figura 12 apresenta o comportamento não linear típico da corrente de fuga resistiva para temperaturas diferentes de varistores.

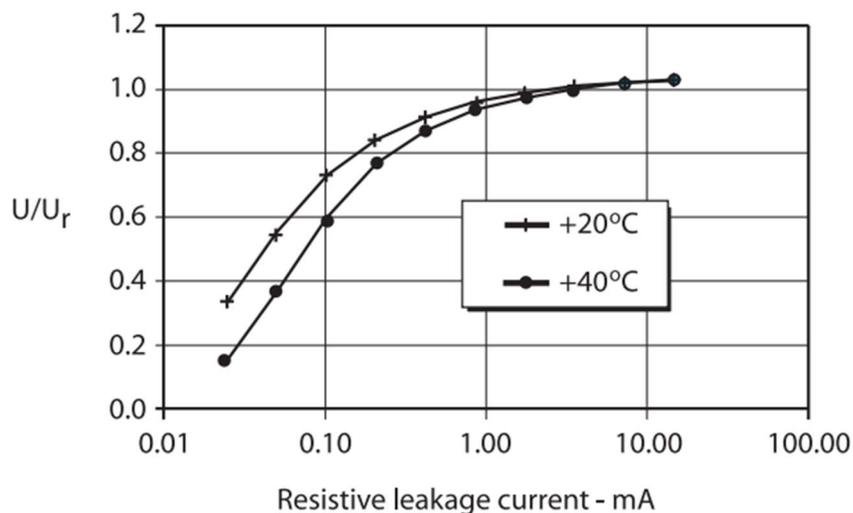


Figura 12 – Exemplo de característica  $V \times I$  de para-raios de ZnO[4].

A componente resistiva da corrente de fuga é responsável pelo aquecimento do para-raios, quando não existe outros fatores externos, e seu aumento se reflete no crescimento da temperatura do equipamento. Se o para-raios estiver em ótima condição de funcionamento, esse aquecimento é praticamente uniforme na superfície e estará dentro de limites pré-determinados. Por outro lado, a ocorrência de degradação pode alterar a distribuição das correntes nos blocos do para-raios[6].

No momento em que isso ocorre, os grãos de ZnO podem estar tolerando a passagem de uma quantidade de corrente maior ou menor que o normal. No caso em que a quantidade de corrente é maior que o normal, o grão se comporta como um curto-circuito, aumentando a corrente que passa por ele e, conseqüentemente, diminuindo a corrente em sua vizinhança. A degradação gera o aparecimento de pontos quentes ou regiões quentes. A corrente de fuga e a temperatura, portanto, apresentam uma relação complementar e podem ser combinadas para serem usadas como indicador da condição do para-raios[6].

Dada a característica não-linear de um para-raios de ZnO, ocorre o aparecimento de harmônicos na corrente de fuga e esses harmônicos dependem do grau de não-linearidade do para-raios, que por sua vez é função do estresse de tensão, da temperatura e fabricante. Pode-se dizer que o conteúdo da terceira harmônica da corrente de fuga total compõe, habitualmente, cerca de 10 a 40% da corrente resistiva[4]. O harmônico de

terceira ordem é de especial interesse a este respeito, uma vez que possui a maior magnitude dos harmônicos de corrente.

O nível de corrente de fuga resistiva verdadeira pode ser imediatamente preciso a partir de medições do terceiro harmônico, desde que a informação apropriada esteja disponível em relação ao conteúdo do terceiro harmônico da corrente resistiva no estresse de tensão e temperatura. Essas informações são particulares tanto para a marca quanto o tipo de para-raios, logo, essas informações devem ser fornecidas pelo fabricante do para-raios[4].

A Figura 13 apresenta resultados de medições de corrente de fuga total em dois para-raios distintos e em condições de trabalho divergentes em relação a quantidade de harmônicos no sistema.

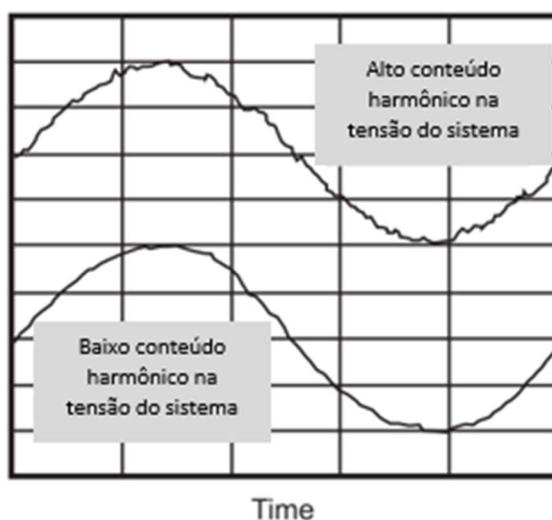


Figura 13 – Corrente de fuga total de para-raios de ZnO em diferentes condições de operação[adaptado de 4].

As componentes harmônicas das correntes capacitivas produzidas pelos harmônicos de tensão podem ser da mesma ordem de magnitude que as correntes harmônicas produzidas pela corrente de fuga resistiva não linear. Isso significa que o conteúdo do terceiro harmônico originado da tensão do sistema interfere no conteúdo do terceiro harmônico associado à corrente de fuga resistiva do para-raios. Para a realização de medições precisas da corrente de fuga resistiva por meio da análise de harmônicos de terceira ordem, é necessário compensar o conteúdo de harmônicos de terceira ordem na tensão do sistema[4]. Pode-se dizer que a harmônica de terceira ordem da corrente de fuga resistiva é o verdadeiro indicador da integridade do para-raios de ZnO em operação[6].

## 2.3 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Uma das características mais marcantes dos para-raios de ZnO é sua capacidade de absorver energia e uma das formas de energia que ele absorve é a energia térmica. Em sua operação normal, corrente de fuga que flui pelos para-raios, principalmente pelos varistores, em razão do efeito Joule, é produzido um aquecimento que o para-raios deve ter a competência de dissipar para o ambiente ou suportar sem prejudicar sua integridade e funcionamento[5]. Já no acontecimento de sobretensões, seja qual for a natureza, a corrente que flui pelo para-raios tende a se elevar, elevando as perdas por efeito Joule e, assim, elevando a temperatura do para-raios. O para-raios pode ou não conseguir suportar e dissipar a energia injetada, a depender da quantidade de energia. Caso não aconteça a suportabilidade, o para-raios pode entrar em um processo sucessivo de aumento de temperatura e da corrente de fuga, conhecido como avalanche térmica, que pode levar o para-raios a destruição[5].

A Figura 14 apresenta a curva de mudança térmica do bloco de para-raios de ZnO, nela a região abaixo do limite de temperatura “t1”, o nível de geração de calor do para-raios de ZnO é inferior ao nível de dissipação de calor. Quando a temperatura não ultrapassa esse limite, a temperatura tende a diminuir gradualmente até atingir uma condição de estabilidade conforme a curva B. Ao invés disso, quando a temperatura dos varistores de ZnO ultrapassa o limite, chegando ao nível “t2”, o nível de geração de calor torna-se superior ao nível de dissipação de calor e a degradação ocorre conforme demonstrado pela curva A, o que resulta em uma avalanche térmica[6].

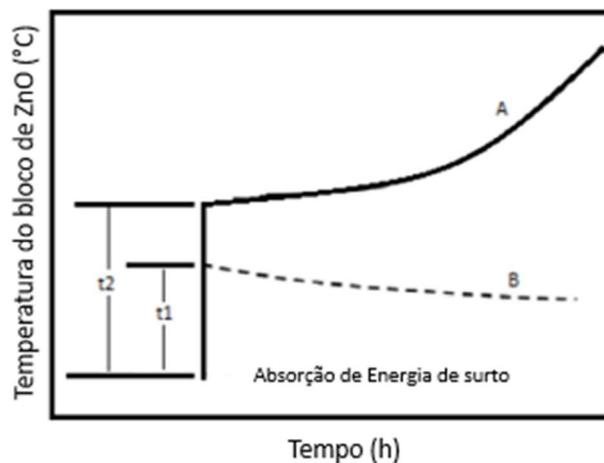


Figura 14 – Fenômeno da avalanche térmica[adaptadode6].

A estabilidade térmica é um dos critérios de aplicação importantes para para-raios de ZnO. A Figura 15 apresenta um gráfico que explica o comportamento desses para-raios. A curva do fluxo de calor representa a quantidade calor que o para-raios consegue dissipar para meio externo em função da temperatura. Já a curva de perda de potência descreve o calor gerado pelos varistores, devido ao efeito Joule, em função da temperatura e da corrente que flui por eles. Com o suporte do gráfico, fica claro que enquanto a geração de energia térmica no para-raios for menor que sua competência de dissipação, ele manterá sua estabilidade térmica, sendo o ponto ótimo a intersecção das curvas mais à esquerda. O para-raios necessita operar nessa região, permitindo-se deslocamentos ao longo da curva eventualmente, mas nunca podendo cruzar o ponto limite de estabilidade térmica. Processos que ultrapassem a estabilidade térmica podem levar ao equipamento à avalanche térmica[5].

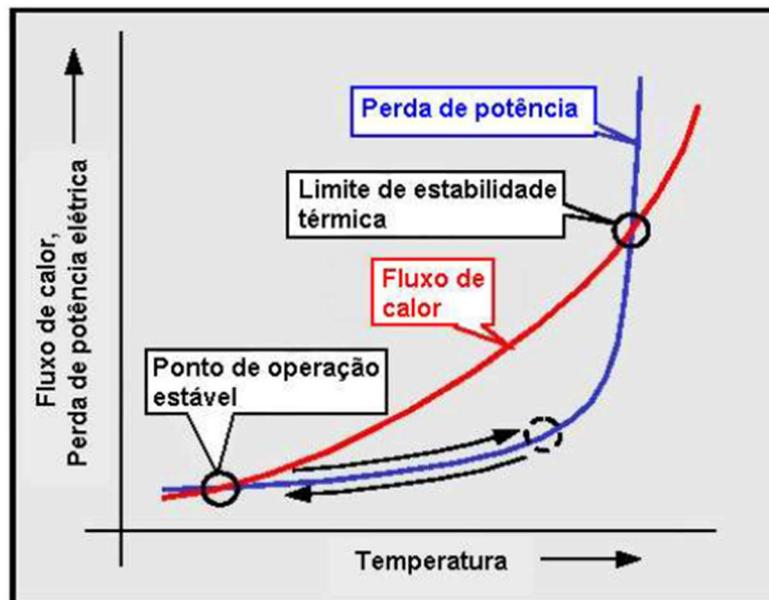


Figura 15 – Curva de estabilidade térmica típica de um para-raios [5].

Para-raios, quando corretamente projetados para sua aplicação, possuem maiores oportunidades de operar normalmente em equilíbrio térmico. Desse modo, pode-se dizer que existe a estabilidade térmica quando após a ocorrência de um surto, o para-raios volta às suas condições normais de operação e quando consegue conservar sua habilidade de dissipar o calor durante o regime de operação continuada sem promover aquecimentos exagerados.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas e discutidas algumas técnicas de monitoramento e diagnóstico de para-raios com base na medição da corrente de fuga e no uso do termovisor.

### 3.1 CORRENTE DE FUGA

Um dos grupos de procedimentos de monitoramento e diagnóstico de para-raios, numerosamente utilizados pelas concessionárias de energia elétrica, é fundamentado na medição da corrente de fuga que circula pelos para-raios em direção à terra. Os para-raios de ZnO, por encontrarem-se diretamente ligados à rede elétrica, admitem a passagem constante de uma corrente de fuga na faixa de miliamperes, quando o sistema está em regime normal de operação. Todavia, quando o sistema sofre uma solicitação elevada de corrente, como em sobretensões temporárias, de manobra, atmosféricas ou de defeitos internos, estas atingem a faixa de centenas ou milhares de amperes.

Esta revisão bibliográfica traz um apanhado das principais contribuições à literatura dos últimos 20 anos, com exceção do estudo realizado por CARLSON et al. em 1986 por se tratar de um dos primeiros estudos acerca do tema.

CARLSON et al. (1986) em *A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters* [7] elegeram como principal vantagem dessa categoria de técnica de monitoramento a oportunidade da realização da medição direta de uma grandeza elétrica, a corrente elétrica, sem a necessidade de retirá-lo de operação, como outras categorias de medição necessitam. Desse modo, numerosos estudos foram e vêm sendo agregados à literatura com o objetivo de atingir técnicas cada vez mais confiáveis que apresentem o grau de degradação dos para-raios.

Souza (2004) em *Medição e Análise Harmônica da Corrente de Fuga Resistiva em Varistores de ZnO* [8] propôs a estimação da corrente resistiva, que flui pelo para-raios, a partir da compensação capacitiva via ponte virtual. Este método utiliza uma ponte de compensação capacitiva para obter um valor equivalente à sua capacitância através de interações computacionais. Para a realização da medição proposta, torna-se necessário a medição da corrente total e da tensão aplicada sobre o para-raios.

Lee & Kang (2005) em *New On-line Leakage Current Monitoring System of ZnO Surge Arresters* [9] estimaram a corrente resistiva, que flui através dos para-raios, a partir da corrente total, tendo em consideração a defasagem constante, ou seja, o algoritmo para estimar a componente resistiva é baseado no deslocamento no tempo. Segundo os autores, esse tempo de defasagem é o mesmo tempo que o sinal de tensão medido atinge seu máximo, deste modo, equivale ao momento em que ocorre o valor máximo da corrente resistiva. Para tal método faz-se necessário a medição da corrente total, dispensando a medição da tensão. Essa metodologia esbarra no fato de que os autores partiram da premissa que a defasagem entre as correntes capacitivas e resistivas é sempre de  $90^\circ$ , o que não é sempre verdadeiro.

Karawita & Raghuveer (2006) em *Onsite MOSA Condition Assessment — A New Approach* [10] sugeriram uma nova maneira de investigação do nível de degradação dos para-raios através da componente fundamental da corrente resistiva. Para tal medição da corrente resistiva, eles se valeram da decomposição da corrente via medição da defasagem entre a tensão aplicada e a corrente total, ou seja, utilizaram uma relação entre o valor de pico da componente fundamental da corrente resistiva e as defasagens entre a componente capacitiva e a corrente total. Os autores mostraram que isso independe da temperatura dos varistores, da degradação do para-raios e dos harmônicos na tensão. Para tal método é necessário a medição da corrente total e da tensão aplicada no para-raios, além disso, a técnica necessita da retirada do equipamento de operação.

Lira (2007) em *Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Para-raios de Óxido de Zinco* [11] e Macedo (2010) em *Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-Raios de Óxido de Zinco* [12], a partir de um sistema de monitoramento a distância, elaborado por eles, por meio de sensores indutivos, fizeram a verificação da degradação dos para-raios fazendo a medição e análise da corrente de fuga. O sistema desenvolvido propõe a decomposição da corrente medida em suas componentes, ou seja, as componentes resistiva e capacitiva. Além disso, como diferencial, ainda é realizada a separação da harmônica de terceira ordem. Todas essas decomposições são realizadas a partir da medição da defasagem entre a corrente total que flui pelo para-raios e do sinal de tensão aplicado no mesmo.

Novizon et al (2008) em *A New Method To Separate Resistive Leakage Current Of ZnO Surge Arrester* [13] propõem um novo método para separar a componente resistiva da corrente de fuga total. O método é baseado no cancelamento da componente capacitiva da corrente de fuga total por meio da adição de uma nova corrente capacitiva

com ângulo de fase diferente de  $\pi$ . Este método não depende da medição da tensão aplicada ao para-raios.

Lira (2012) em *Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total* [5], diferentemente de diversos autores, não utiliza a decomposição do sinal total da corrente de fuga devido à dificuldades, como a medição de tensão aplicada para a determinação da defasagem entre a tensão e a corrente total, a não possibilidade de sempre poder medir em campo essa tensão, e também devido as imprecisões de quando não se realiza a medição de tensão, dos métodos numéricos para estimativas das componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga total. Ele propõe a extração da corrente de fuga total dos para-raios com suas características, ou seja, suas componentes harmônicas, para que a partir destas seja construído um banco de dados que relaciona as características com o estado de operação do para-raios. Depois, estes dados são utilizados para alimentar um sistema de treinamento para classificação do estado de operação do para-raios, com base em Redes Neurais Artificiais, a fim de que seja realizado o processo de classificação e diagnóstico da condição do para-raios.

Khodsuz et al (2015) em *Metal Oxide Surge Arrester Condition Monitoring Based On Analysis Of Leakage Current Components* [14] propuseram o uso de indicadores baseados na amplitude máxima da componente fundamental da corrente resistiva da corrente de fuga, na amplitude máxima do terceiro harmônico da corrente de fuga resistiva e a amplitude máxima da fundamental da corrente de fuga capacitiva, pouco utilizada na literatura. Para a avaliação dos critérios de monitoramento, os autores produziram uma base de dados do sinal e seus componentes harmônicos da corrente de fuga total, obtidos a partir da medição da tensão em média e alta tensão em diferentes condições de operação, incluindo a flutuação de tensão. Os autores chegaram as seguintes conclusões: para o caso da flutuação de tensão o melhor indicador é a corrente capacitiva; Todos os indicadores de corrente mostram incrementos, no entanto a componente capacitiva se mostra melhor para a identificação da sobretensão; A presença do terceiro harmônico na tensão impacta mais diretamente a componente de terceiro harmônico da corrente resistiva.

Metwally et al (2017) em *Online Condition Monitoring of Surge Arresters Based on Third-Harmonic Analysis of Leakage Current* [15] propõem uma técnica de monitoramento online de para-raios em circunstancias de tempo seco e de poluição, medindo a corrente de fuga total. A técnica baseia-se na extração de características como a magnitude, frequência e ângulo de fase do sinal de todos os componentes de frequência.

A partir disso, viram que o uso da técnica proposta é viável para o tratamento de sinais estacionários e não estacionários, e que essa técnica pode ser facilmente adotada para para-raios novos ou já deteriorados.

### 3.2 USO DO TERMOVISOR

O uso do termovisor é uma técnica não intrusiva e a mais utilizada por empresas do setor elétrico brasileiro para a medição da temperatura de diversos equipamentos elétricos. É um método eficiente e que pode ser realizado sem a retirada de operação do equipamento em análise, por se tratar de um método online. A medição da temperatura é, basicamente, realizada através do registro da radiação infravermelha, ou seja, do calor emanado pelo equipamento. O calor emanado por determinadas partes do equipamento, em geral, é causado pela componente resistiva da corrente de fuga, que pode ser provocada por fatores variados, tais como poluição, entrada de umidade no equipamento, entre outras causas.

De acordo com a Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ABRATE) [16], esta técnica tem diagnósticos positivos em análises de defeitos. Essas avaliações positivas desse método de análise se deve, basicamente, ao bom custo benefício, uma vez que um único termovisor pode ser utilizado várias vezes e em diversos equipamentos, além de não necessitar de muitas pessoas para realizar a medição. Com o avanço da tecnologia empregada nos termovisores, o custo vem se reduzindo e a qualidade aumentando, além do aumento da variedade de programas que processam as imagens geradas pelos termovisores.

Esse método de análise fundamenta-se na observação do perfil térmico dos equipamentos, como o para-raios, comparando a temperatura medida do equipamento com a medição da temperatura ambiente, de outros equipamentos similares próximos, ou até mesmo, com o equipamento considerado com funcionamento perfeito, para que assim, por meio da comparação possa ser definido se tem ou não um defeito. Uma forma recomendada é a conferência a cada 120°, dessa forma o equipamento pode ser totalmente analisado de forma homogênea.

Ainda que muito empregado, o uso da termovisão esbarra em algumas limitações, tais como: o horário da medição, uma vez que é necessário esperar que a calor proveniente do sol tenha sido emanado totalmente, logo, é necessário que as medições sejam realizadas a noite, assim é possível que pequenas alterações de temperatura sejam

detectadas; A temperatura externa nem sempre corresponde ao nível de temperatura nos varistores, podendo esses ter temperaturas superiores a da externa; Alguns defeitos no equipamento que podem não levar ao aumento da temperatura. Além disso a medição pode mudar entre modelos diferentes de para-raios, uma vez que existem modelos que possuem um espaço entre os varistores e o invólucro e modelos que não possuem esse espaço, sendo este último os que apresentam melhores respostas térmicas.

WANDERLEY NETO et al. (2009) [17], LIRA et al. (2010) [18] e LIRA et al. (2011) [19] reportaram, em seus respectivos trabalhos, bons resultados na aplicação de métodos relacionados ao uso de termovisores para aferição da temperatura externa em para-raios, no entanto os problemas citados ainda perduram.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado os métodos e materiais utilizados nas medições de corrente e temperatura dos para-raios de distribuição. As medições ocorreram na rede elétrica do campus da Universidade Federal de Campina Grande e posteriormente no Laboratório de Alta de Tensão da Universidade Federal de Campina Grande.

Na primeira parte das medições, realizadas a noite no campus I da UFCG, foram utilizados um alicate amperímetro e um termovisor. A Figura 16 apresenta o alicate amperímetro utilizado e a Figura 17 apresenta o termovisor que foi utilizado nestas medições. Tais medições foram realizadas com a aferição da corrente de fuga dos para-raios de distribuição acoplados à transformadores da rede de distribuição da UFCG, além da captação das imagens dos para-raios pelo termovisor, com o objetivo de mensurar a temperatura dos para-raios em operação. Tais medições foram realizadas a noite, pois é necessário que a radiação proveniente do sol se dissipe do para-raios, para que assim a leitura da temperatura do para-raios não apresente erros significativos referentes aos fatores externos, como a componente de temperatura devido ao sol., tal motivo foi explicado na Capítulo 1 deste trabalho.



Figura 16 – Alicate amperímetro.



Figura 17 – Termovisor.

A Figura 18 apresenta a foto de um dos transformadores, do qual foi medido a corrente de fuga do para-raios e a temperatura.

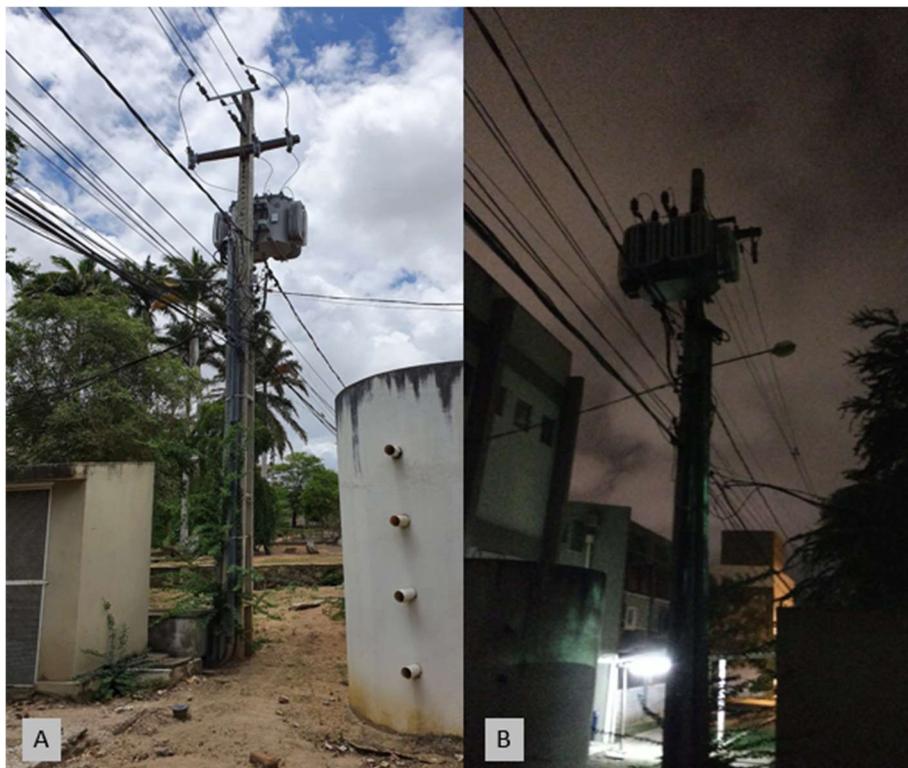


Figura 18 – Transformador da UFCG utilizado nas primeiras medições. (A) de dia;  
(B) de noite.

Para a segunda parte das medições, realizadas no Laboratório de Alta Tensão, além do alicate amperímetro e do termovisor citados e apresentados nas Figura 18 e 19

respectivamente, foram postos em operação 4 para-raios, sendo todos constituídos por varistores de óxido de zinco, envoltos por um corpo polimérico e sem centelhador, além disso possuem tensão nominal de 12 kV e corrente nominal de 10 kA. Os dois primeiros da fabricante BALESTRO, sendo o primeiro do modelo 39E e o segundo 37B, e os dois últimos das marcas KEE e DELMAR. A Figura 19 apresenta o arranjo da montagem dos para-raios para medição. Os para-raios foram instalados em cruzeta de concreto, conforme ilustrado na Figura 19. Os para-raios foram energizados e aterrados para avaliação dos parâmetros temperatura e corrente de fuga.



Figura 19 – Arranjo para medição.

As Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam em detalhe os para-raios utilizados.



Figura 20 – Para-raios modelo 39E da fabricante BALESTRA.



Figura 21 – Para-raios modelo 37B da fabricante BALESTRA.



Figura 22 – Para-raios da Fabricante KEE.



Figura 23 – Para-raios da fabricante DELMAR.

Para alimentar os para-raios foi aplicado uma tensão de aproximadamente 8 kV, por meio do kit de alta tensão do Laboratório de Alta tensão, a Figura 24 apresenta uma ilustração do kit de alta tensão utilizado no ensaio. A Figura 25 apresenta a forma de onda do sinal de tensão aplicado aos para-raios. Os sinais foram obtidos através de um osciloscópio, de acordo com a figura é possível constatar que a tensão obtida foi de 8,13 kV. Para aplicar a tensão nos para-raios foi utilizado um transformador regulador 220/0-100 kV e um sistema de controle de tensão do transformador. Em função das limitações de ajuste preciso do sistema de controle do transformador, não foi possível aplicar 8 kV aos transformadores, sendo o valor melhor ajustado de 8,13 kV.

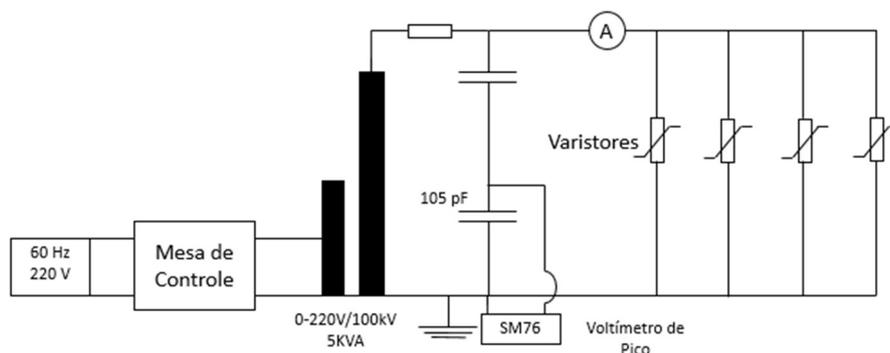


Figura 24 – Ilustração do kit de alta tensão utilizado no ensaio.

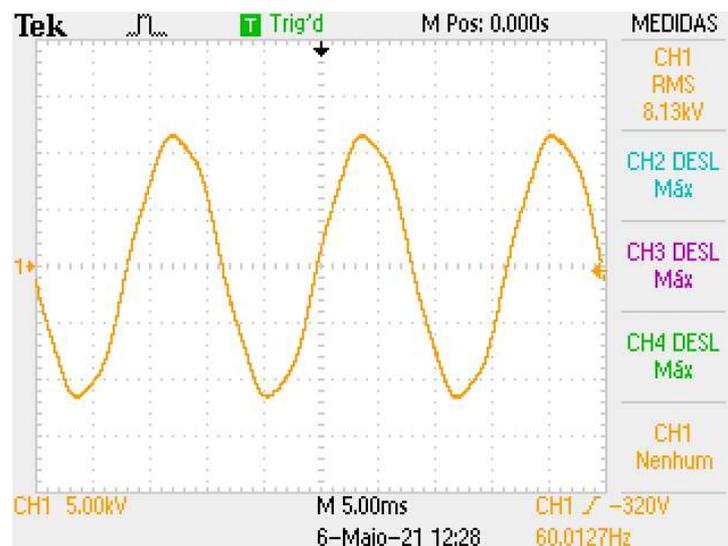


Figura 25 – Formato da onda tensão de 8,13kV aplicada nos para-raios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as medições de temperatura e corrente de fuga dos para-raios de distribuição acoplados aos transformadores da rede de distribuição da UFCG, foi obtido os seguintes resultados apresentados na Tabela 2. Com o objetivo de melhor entendimento os transformadores foram enumerados.

Tabela 2 – Dados Coletados das medições de corrente de fuga dos para-raios da rede da UFCG.

Transformador	Corrente medida
1	0,08 mA
2	1,54 A
3	20,7 mA
4	2,03 mA
5	344 mA
6	1,04 A
7	100 mA
8	0,38 mA
9	29,7 mA
11	54,3 mA

Autoria própria.

Posteriormente, para análise do perfil térmico dos para-raios foi obtido a partir do termovisor as imagens térmicas dos para-raios. As Figuras 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 35 apresentam os transformadores avaliados, nos quais os para-raios estão acoplados, com suas respectivas imagens térmicas.



Figura 26 – (A) Transformador 1; (B) Imagem térmica do transformador 1, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 24,9°C.

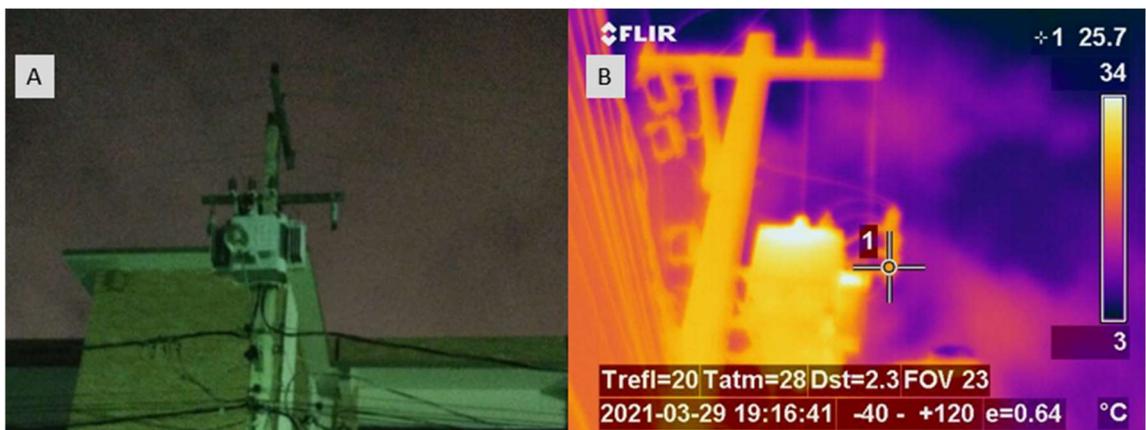


Figura 27 - (A) Transformador 2; (B) Imagem térmica do transformador 2, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 25,7°C.

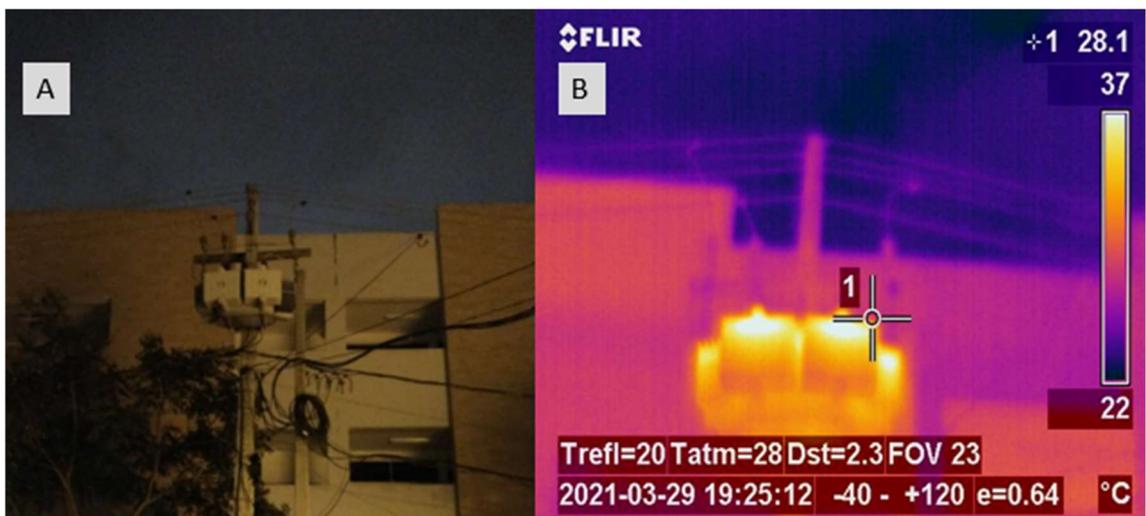


Figura 28 - (A) Transformador 3; (B) Imagem térmica do transformador 3, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 28,1°C.



Figura 29 - (A) Transformador 4; (B) Imagem térmica do transformador 4, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 27,3°C.

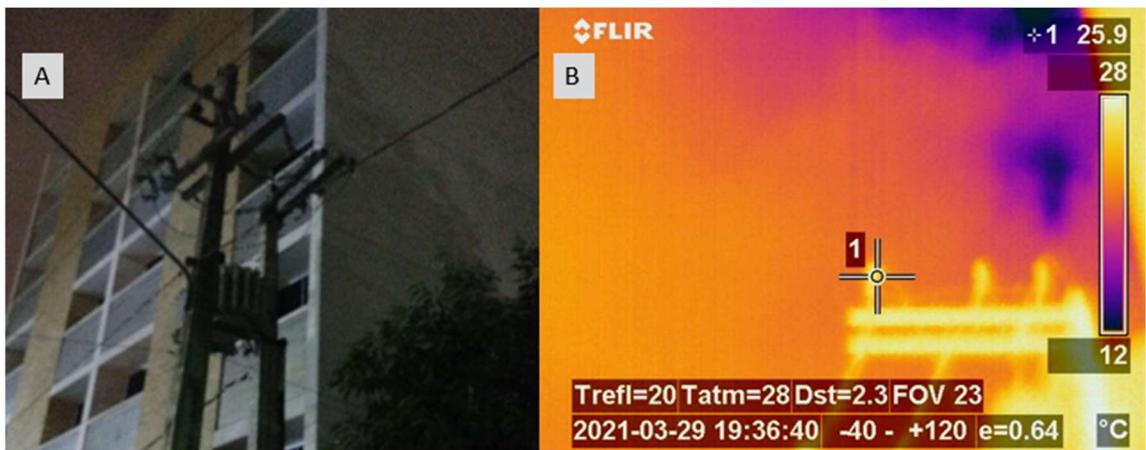


Figura 30 - (A) Transformador 5; (B) Imagem térmica do transformador 5, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 25,9°C.



Figura 31 - (A) Transformador 6; (B) Imagem térmica do transformador 6, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,5°C.

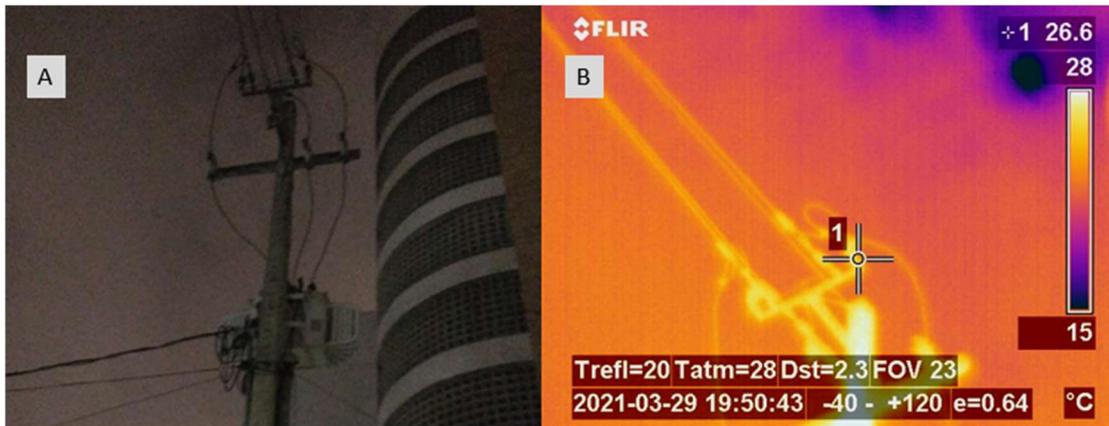


Figura 32 - (A) Transformador 7; (B) Imagem térmica do transformador 7, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,6°C.

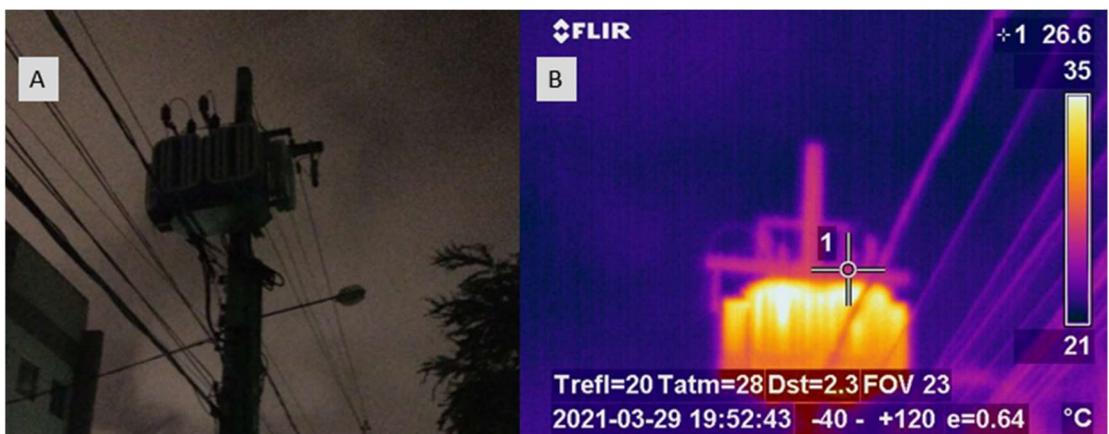


Figura 33 - (A) Transformador 8; (B) Imagem térmica do transformador 8, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,6°C.

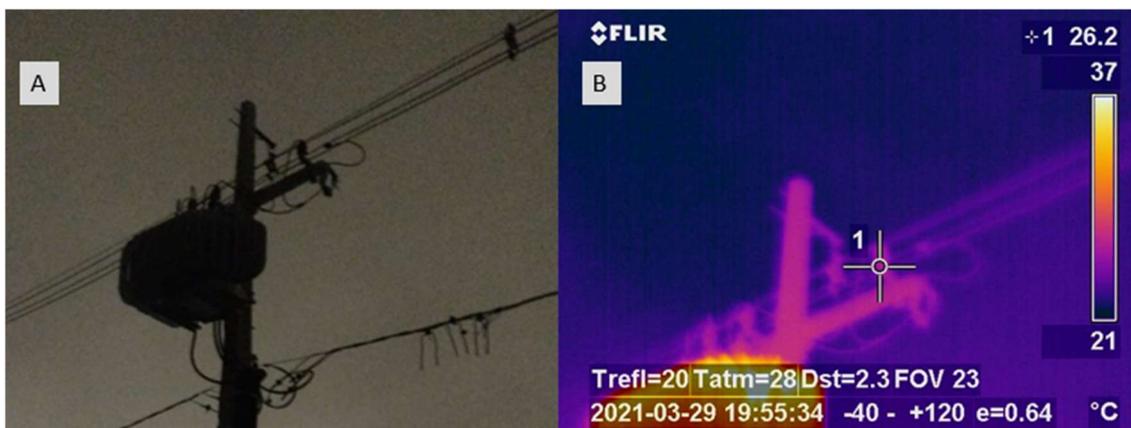


Figura 34 - (A) Transformador 9; (B) Imagem térmica do transformador 9, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,2°C.

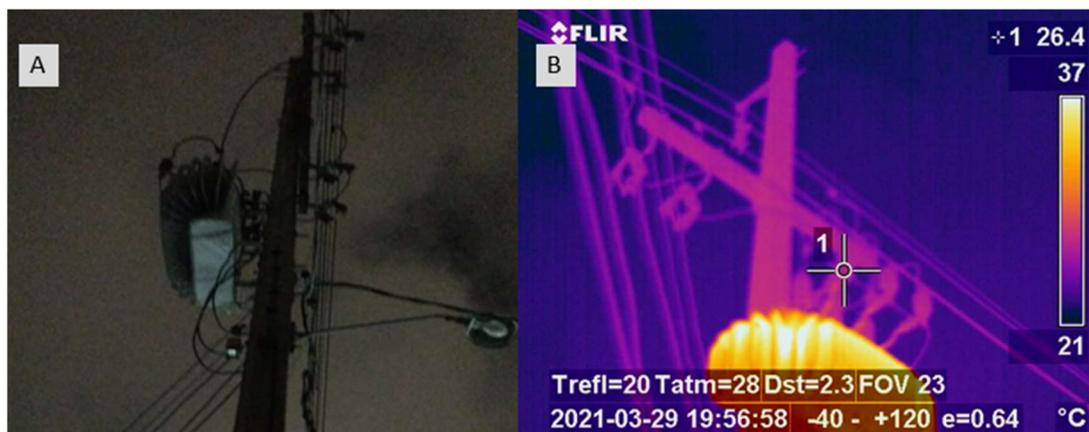


Figura 35 - (A) Transformador 10; (B) Imagem térmica do transformador 10, apontando no ponto 1 uma temperatura do para-raios de aproximadamente 26,4°C.

A partir dos resultados das imagens térmicas pode-se presumir que os para-raios avaliados estão em bom estado de operação, visto que não apresentam altas temperaturas. No tocante aos valores de corrente de fuga, com exceção dos para-raios do transformador 2 e do transformador 6, que apresentam uma corrente medida de 1,54 A e 1,04 A respectivamente, o que pode indicar algum princípio de falha, porém a leitura térmica não indica isso. Salienta-se que a corrente de fuga medida nos para-raios instalados nos postes é referente a corrente de fuga dos três para-raios. Além disso, dada a magnitude das correntes medidas se pode dizer que a leitura não foi somente da corrente de fuga do para-raios, mas sim a soma da corrente de fuga dos para-raios, da corrente de aterramento do transformador e até mesmo da corrente de fuga da carcaça do próprio transformador.

Para medição da temperatura, a grande dificuldade destas medições se encontra na distância já definidas, uma vez que os para-raios já estão em pleno funcionamento acoplados aos transformadores no alto dos postes. Desse modo, não se pode saber diversas características dos para-raios, como a corrente nominal, a classe e a tensão nominal por exemplo, além de não foi possível identificar o fabricante dos para-raios.

Dessa forma, para se ter uma maior exatidão na leitura da temperatura, com uma distância menor, mas ainda de forma segura, e ainda saber todas as características dos para-raios assim como seus respectivos fabricantes, foi feito o arranjo apresentado na Figura 21 no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

A Tabela 3 apresenta as leituras da corrente de fuga de cada um dos para-raios utilizados nas medições.

Tabela 3 – Corrente de Fuga medidas no ensaio.

Fabricante do Para-raios / Tempo da Medição	Antes de ligar	Uma hora após ligar	Duas horas após ligar
BALESTRO 39E	0 A	0,25 mA	0,30 mA
BALESTRO 37B	0 A	0,28 mA	0,32 mA
KEE	0 A	0,54 mA	0,55 mA
DELMAR	0 A	0,55 mA	0,58 mA

Autoria própria.

Já a Tabela 4 apresenta a variação da temperatura dos para-raios utilizados no ensaio.

Tabela 4 – Variação da temperatura dos para-raios.

Tempo de Medição / Fabricante do Para-raios	BALESTRO 39E	BALESTRO 37B	KEE	DELMAR
Antes de ligar	28,6 °C	28,9 °C	27,7 °C	27,4 °C
10 minutos	27,4 °C	27,6 °C	27,5 °C	30,2 °C
20 minutos	28,2 °C	27,8 °C	28,9 °C	32,2 °C
50 minutos	28,3 °C	28,4 °C	29,3 °C	36,6 °C
70 minutos	28,5 °C	28,6 °C	30,0 °C	39,0 °C
80 minutos	28,3 °C	27,8 °C	28,8 °C	38,6 °C
90 minutos	28,3 °C	28,0 °C	29,2 °C	39,5 °C
100 minutos	28,8 °C	28,7 °C	29,7 °C	39,5 °C
110 minutos	29,0 °C	29,0 °C	30,2 °C	40,9 °C
120 minutos	28,2 °C	28,2 °C	29,1 °C	39,6 °C

Autoria própria.

Considerando o valor inicial e comparando com o aquecimento máximo é possível observar que o para-raios BALESTRO 39E teve um aquecimento máximo de apenas 0,4 °C, o BALESTRO 37B teve um aquecimento máximo de meramente 0,1 °C, o KEE teve

um aquecimento 2,7 °C e o DELMAR teve um aquecimento de 13,5 °C. As medições não foram completas, uma vez que o arranjo estava energizado, e por isso o acesso a outra face estava impossibilitado por razões de segurança.

As Figuras 36, 37, 38 e 39 apresentam a imagem térmica dos para-raios na última medição, realizada 120 minutos da ligação do sistema de ensaio.

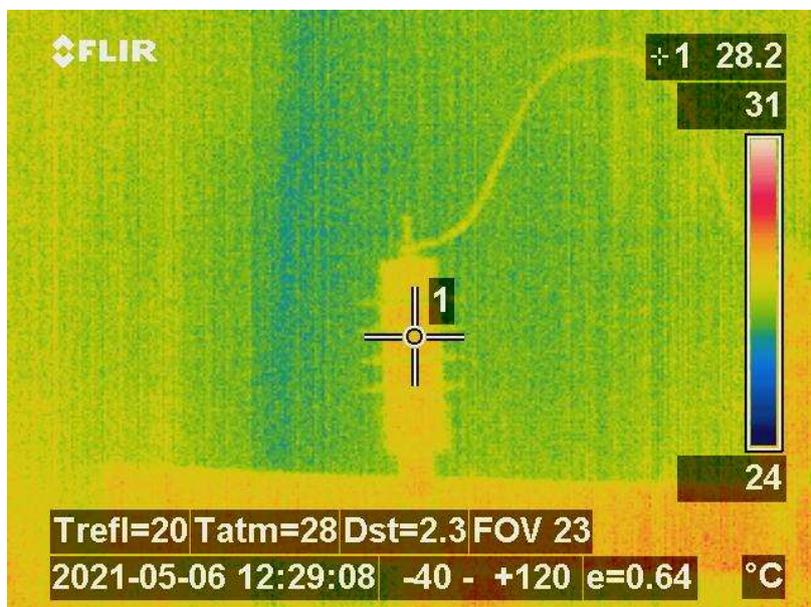


Figura 36 – Imagem térmica do para-raios BALESTRO 39E, o ponto 1 indica 28,2 °C aproximadamente.

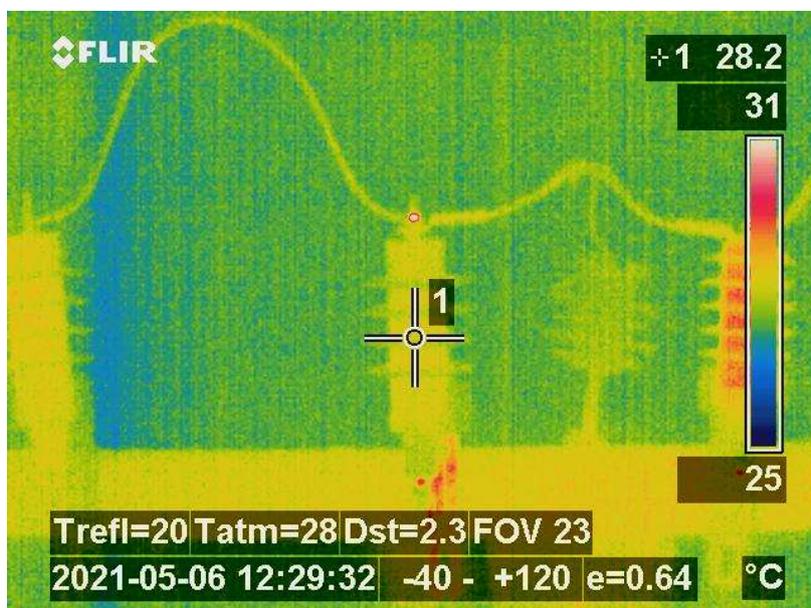


Figura 37 – Imagem térmica do para-raios BALESTRO 37B, o ponto 1 indica 28,2 °C aproximadamente.



Figura 38 – Imagem térmica do para-raios KEE, o ponto 1 indica 29,1 °C aproximadamente.

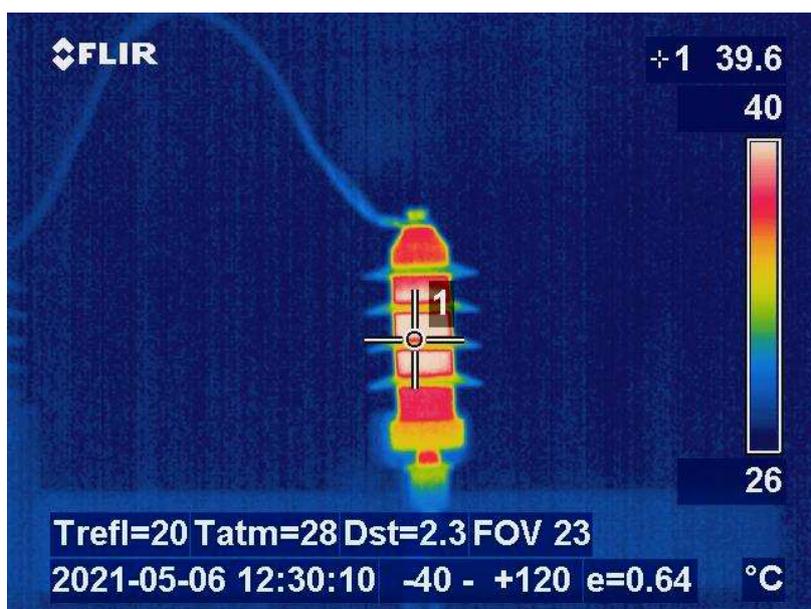


Figura 39 – Imagem térmica do para-raios DELMAR, o ponto 1 indica 39,6 °C aproximadamente.

As Figuras 40 e 41 apresentam, com o objetivo de comparação, as imagens térmicas dos para-raios lado a lado. As imagens foram divididas em consequência das limitações físicas do local do ensaio e da abertura da lente do termovisor.

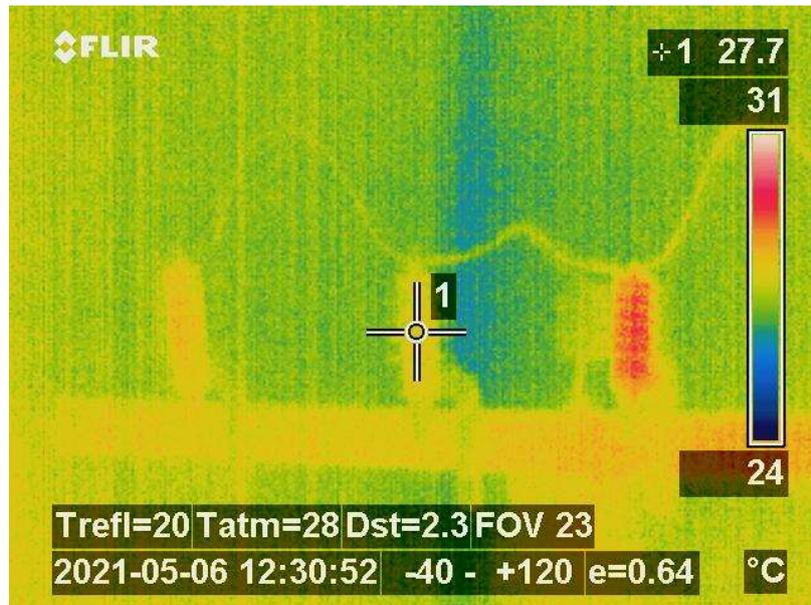


Figura 40 – Imagem térmica dos três primeiros para-raios. Para efeito de comparação, é possível ver que o terceiro para-raios (KEE) está mais quente que os demais.

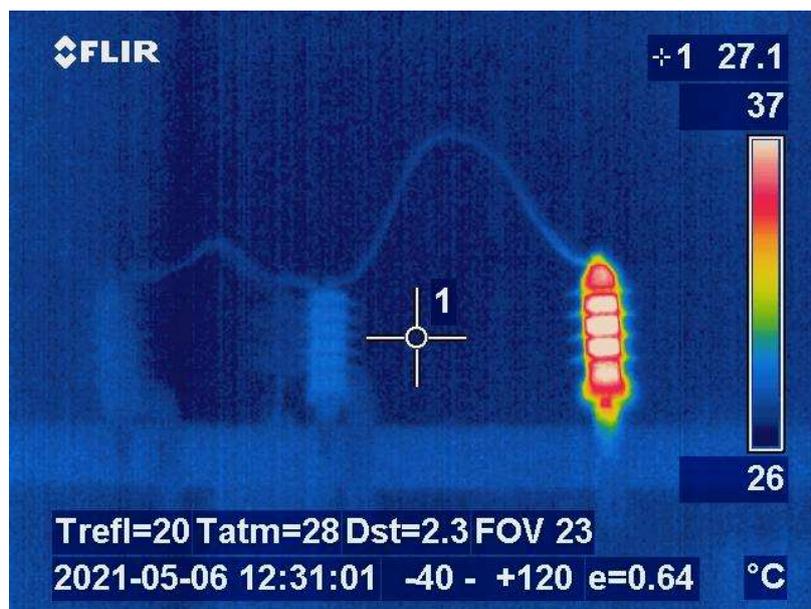


Figura 41 – Imagem térmica dos três últimos para-raios. Para efeito de comparação, é possível ver que o quarto para-raios (DELMAR) está mais quente que os demais.

A partir dos dados obtidos em laboratório após o ensaio é possível correlacionar a temperatura dos para-raios com a corrente de fuga dos mesmos. O para-raios BALESTRO 39E apresentou uma temperatura máxima de 29 °C e uma corrente de fuga 0,30 mA o que indica o bom estado de funcionamento do mesmo, uma vez que nem a corrente de fuga nem a temperatura estão elevadas. Além dele, o para-raios BALESTRO 37B também não apresenta sinais de problemas, uma vez que o mesmo apresentou temperatura máxima de 29°C e corrente de fuga máxima de 0,32 mA, o que indica,

também, o bom estado de funcionamento pelos mesmos motivos apresentados para o primeiro para-raios. O cenário muda para o para-raios da fabricante KEE, uma vez que o mesmo teve uma corrente de fuga, em comparação com os dois primeiros para-raios, cerca de 70% mais alta e uma temperatura que chegou aos 30,2 °C, mas mesmo com esses valores um pouco mais altos, pode-se dizer que o mesmo está operando normalmente. No entanto, o para-raios da fabricante DELMAR apresentou temperaturas bastante elevadas, comparado aos outros três para-raios, chegando aos 40,9 °C e sua corrente de fuga chegou a 0,53 mA, a temperatura elevada pode indicar um princípio de mau funcionamento do mesmo, como os desgastes dos varistores, uma perda de energia por efeito Joule demasiado ou até mesmo a entrada de umidade dentro do invólucro polimérico.

Desse modo, faz-se importante a correlação entre a temperatura e corrente de fuga dos para-raios de distribuição, pois assim, através do monitoramento periódico dos para-raios é possível identificar qual conjunto de para-raios apresenta princípio de falhas, através da medição da corrente de fuga dos para-raios acoplados aos transformadores nos postes, e através da aferição da temperatura é possível identificar com exatidão, qual dos para-raios está com defeito para que haja a substituição do mesmo, de forma preventiva e dessa forma, trazendo uma proteção maior para o equipamento ao qual o para-raios está protegendo e assim aumentando a confiabilidade do rede de distribuição.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida uma abordagem para correlacionar a corrente de fuga com a temperatura em para-raios de distribuição. Foram apresentados alguns conceitos importantes para o bom entendimento do tema e além disso, uma revisão bibliográfica para se entender o que já foi produzido na literatura.

Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A medição de temperatura dos para-raios se mostrou como uma técnica viável de monitoramento dos para-raios, possibilitando o monitoramento dos para-raios com exatidão satisfatória e segurança durante as inspeções;
- A medição de corrente de fuga dos para-raios não se mostrou como uma técnica viável de monitoramento dos para-raios, tendo em vista que houve uma discrepância muito alta entre os diversos para-raios avaliados. Além disso, não foi possível obter a corrente individual de cada para-raios instalado nos postes, visto que a corrente medida é referente aos três para-raios do sistema;
- As medições em laboratório, com condições adequadas de posicionamento do termovisor, possibilitou que os resultados obtidos com os para-raios dos postes fossem mais bem avaliados. A partir da medição individual de corrente e temperatura é possível estabelecer uma correlação entre temperatura e corrente de fuga dos para-raios de distribuição;

Como apresentado no capítulo 3, é sim possível constatar uma correlação entre a temperatura e corrente de fuga que flui pelos para-raios, uma vez que a corrente de fuga tem seu valor aumentado, a temperatura tende a se elevar junto, o que pode indicar possíveis falhas neste equipamento.

Através do monitoramento periódico dos para-raios de distribuição é possível identificar princípio de falhas nestes equipamentos.

A técnica de monitoramento de temperatura apresenta melhores indicativos, já que é possível realizar a avaliação individual de cada para-raios.

No tocante a medição da corrente de fuga, em virtude do cabo de aterramento estar conectado aos três para-raios, é impossível definir se um acréscimo na corrente de fuga é

devido a falha de um ou dois para-raios, ou de todo o conjunto. Deste modo, esta técnica isoladamente não apresenta resultados conclusivos do estado operacional do para-raios.

## REFERÊNCIAS

- [1] Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas / Sergio de Oliveira Frontin (organizador) – Brasília: Teixeira, 2013.
- [2] D'AJUZ, Ary et al. Equipamentos elétricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985.
- [3] Mamede Filho, João. Manual de equipamentos elétricos /João Mamede Filho. - 4. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [4] ABB. Excourt II - User's Manual.
- [5] LIRA, George Rossany Soares. Monitoramento de Para-Raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2012.
- [6] ABDUL-MALEK, Z. et al. Prediction of ZnO Surge Arrester Degradation Based on Temperature and Leakage Current Properties. Jurnal Nasional Teknik Elektro, Vol. 7, No. 2, 2018.
- [7] CARLSON, W. G.; GUPTA, T. K.; SWEETANA, A. A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters. IEEE Transactions on Power Systems, v. 1, n. 2, p. 67–73, 1986.
- [8] SOUZA, R. T. Medição e Análise Harmônica da Corrente de Fuga Resistiva em Varistores de ZnO. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.
- [9] LEE, B. H.; KANG, S. M. A New On-line Leakage Current Monitoring System of ZnO Surge Arresters. Materials Science and Engineering B, v. 119, n. 1, p. 13–18, 2005.
- [10] KARAWITA, C.; RAGHUVVEER, M. R. Onsite MOSA Condition Assessment — A New Approach. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 21, n. 3, p. 1273–1277, July 2006.
- [11] LIRA, G. R. S. Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Para-raios de Óxido de Zinco. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, março 2008.
- [12] MACEDO, E. C. T. Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-Raios de Óxido de Zinco. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, março 2010.
- [13] NOVIZON, N.; ABDUL-MALEK, Z.; AULIA. A New Method to Separate Resistive Leakage Current off Zno Surge Arrester. In: TeknikA, No. 29 Vol.2, Thn. XV, April 2008.
- [14] KHODSUZ, M.; MIRZAIE, M.; SEYYEDBARZEGAR, S. Metal oxide surge arrester condition monitoring based on analysis of leakage current components. In:

Electrical Power and Energy Systems, University of Technology, Babol, Iran, 66 (2015) 188–193.

[15] METWALLY, I. et al.: Online Condition Monitoring of Surge Arresters Based on Third-Harmonic Analysis of Leakage Current. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 24, No. 4; August 2017

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS GRANDES EMPRESAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRATE). FT técnicas preditivas de diagnóstico de parraios. Subgrupo de manutenção de equipamentos. [s.l.], Novembro 2012.

[17] WANDERLEY NETO, E. T.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Artificial Neural Networks Used for ZnO Arresters Diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 24, n. 3, p. 1390–1395, July 2009.

[18] LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; ALMEIDA, C. W. D. Self-Organizing Maps Applied to Monitoring and Diagnosis of ZnO Surge Arresters. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION LATIN AMERICA. São Paulo, Brazil, 2010.

[19] LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; BRITO, V. S.; NOBREGA, L. A. M. M. Adaptive Resonance Theory Applied to MOSA Monitoring. In: PROCEEDINGS OF THE XVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Hannover, Germany, 2011.