

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

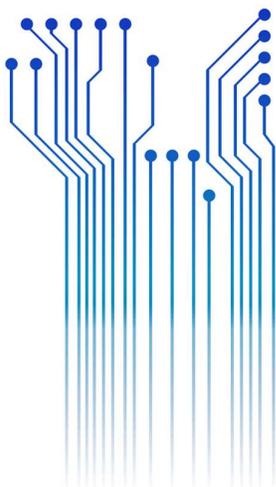
JOSUÉ MARCOS BATISTA FERNANDES



Departamento de  
Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UMA ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PARA-RAIOS DE ZnO



Campina Grande

2018

JOSUÉ MARCOS BATISTA FERNANDES

UMA ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PARA-RAIOS DE ZnO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica 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: Sistemas Elétricos

Orientador:

Professor André Dantas Germano, Dr. Eng.

Campina Grande

2018

JOSUÉ MARCOS BATISTA FERNANDES

UMA ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PARA-RAIOS DE ZnO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica 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: Sistemas Elétricos

Aprovado em        /        /

**Francisco Das Chagas Fernandes Guerra, Dr. Eng.**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

**Professor André Dantas Germano, Dr. Eng.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à todas as pessoas que me apoiaram ao longo de toda a jornada e que contribuíram para cada pequena conquista.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela vida e pela força de sempre seguir em frente, apesar das dificuldades;

Aos meus pais, Geraldo e Maria do Socorro, por tudo o que fizeram por mim ao longo de todos esses anos, por sempre me apoiarem, me darem suporte e fazerem o máximo possível para o meu bem;

À minha noiva, Rafaelle, por todo o suporte, cumplicidade e paciência. Por sempre estar ao meu lado, nos bons e maus momentos;

À minha irmã Gerlane e meu amigo Paulo, por terem compartilhado comigo a experiência de morar em outra cidade para entrar na graduação, por terem enfrentado todos os primeiros desafios juntos comigo e terem me dado todo o apoio e suporte necessário para a superação das dificuldades.

À Simone, André, Tayná e Juan, pela amizade, por toda ajuda, parceria, apoio e por terem impactado de forma tão positiva na minha vida, ao fazerem parte dela;

Aos meus companheiros de curso, em especial: Jandilson, Kaio, Samuel, Renato, Rafael, Matheus e Pedro, por terem passado essa fase compartilhando os momentos bons e ruins, ajudando uns aos outros e sempre incentivando a não desistir. Também agradeço a Tamires, que mesmo não sendo colega de curso, sempre se mostrou disposta a oferecer ajuda e apoio ao longo da graduação;

À Arthur, pela amizade, paciência, disponibilidade e toda a ajuda no meu primeiro contato com a pesquisa;

Ao professor André Germano pela orientação e por toda a sua contribuição e apoio na construção deste trabalho. Também agradeço ao professor Francisco das Chagas, por ter aceitado participar da banca avaliadora e ter contribuído para o aprimoramento do trabalho;

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado o estudo do comportamento térmico de para-raios de óxido de zinco, a partir de simulações computacionais aliadas a termografia, e para tanto, é levantado um modelo computacional, a partir de dados extraídos de para-raios reais. Ao longo do estudo, são analisadas as diferenças entre os para-raios de invólucro cerâmico e polimérico, tanto do ponto de vista construtivo como do ponto de vista da transferência de calor. Também é verificado o impacto na resposta térmica do para-raios de invólucro cerâmico ao se utilizar diferentes mecanismos de transferência de calor em sua modelagem. Além disso, é comparado o esforço computacional necessário para o processamento das simulações ao se utilizar como entrada grandezas elétricas (tensão e corrente) e ao se utilizar diretamente energia térmica, sabendo-se previamente qual será a potência dissipada pelo para-raios. Com o objetivo de observar a resposta térmica do para-raios perante uma descarga atmosférica, também foram realizadas simulações com uma entrada de energia de caráter impulsivo. Finalmente, para validar o modelo levantado ao longo do trabalho, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos nas simulações com os dados obtidos em um experimento realizado no laboratório de alta tensão, da Universidade Federal de Campina Grande.

**Palavras-chave:** para-raios, termografia, simulações, monitoramento.

## ABSTRACT

This paper shows the study of the zinc oxide surge arrester's thermal behavior, with computational simulations allied to thermography, and to do so, it was built a computational model, based on real surge arresters data. Along the study, the differences between the ceramic housing and polymeric housing surge arresters are studied, both of the constructive and thermal behavior aspects. The impact of using different heat transfer mechanisms in the simulations of the ceramic housing surge arrester is also studied. Besides, there is a comparison in the computational effort needed to process the simulation of the ceramic housing surge arrester in two models: one using electrical input (voltage and current) and another using thermal input directly, knowing the dissipated power, previously. It was simulated a situation of impulsive behavior energy as input, with the objective of study the thermal behavior of the surge arrester due to atmospheric discharge. Finally, to evaluate the model constructed in this study, a comparison is made between the results of the simulations and the data from the experiment done in the high voltage laboratory of the Federal University of Campina Grande.

**Keywords:** surge arrester, thermography, simulations, monitoring.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa isoceráunico do território brasileiro.....	05
Figura 2 - Descarga direta no condutor e ondas trafegantes.....	06
Figura 3 - Forma de onda da corrente em uma descarga atmosférica.....	06
Figura 4 - Curva de resposta de um centelhador.....	08
Figura 5 - Centelhador tipo chifre.....	09
Figura 6 - Característica tensão versus corrente dos para-raios de ZnO e SiC.....	11
Figura 7 - Evolução dos dispositivos de proteção.....	12
Figura 8 - Para-raios de invólucro polimérico e cerâmico.....	15
Figura 9 - Termograma de uma subestação.....	16
Figura 10 – Termovisor.....	17
Figura 11 - Modelo do para-raios de 12 kV.....	25
Figura 12 - Modelos de para-raios utilizados nas simulações: Modelo de 69 kV (a) e modelo de 230 kV (b).....	27
Figura 13 - Para-raios utilizados como modelo de estudo: de 69kV (a) e 230 kV (b).....	28
Figura 14 - Circuito utilizado para o ensaio.....	30
Figura 15 - Esquema elétrico do circuito utilizado.....	30
Figura 16 - Oscilograma.....	31
Figura 17 - Captura de imagem da termocâmera.....	31
Figura 18 - Gráfico da Potência calculada com o auxílio da equação (5) .....	32
Figura 19 - Pontos onde a temperatura foi analisada.....	32
Figura 20 - Mapa térmico do para-raios de 12 kV após 25 minutos (a) e após 50 minutos (b).....	33
Figura 21 - Evolução da temperatura em dois pontos do para-raios.....	34
Figura 22 - Evolução da temperatura no tempo, na coluna de varistores.....	35
Figura 23 - Evolução da temperatura no tempo, no invólucro.....	36
Figura 24 - Resultado da simulação utilizando o domínio de ar (para-raios de 230kV) ...	37
Figura 25 - Resultado da simulação utilizando o coeficiente h (para-raios de 230kV) ...	38
Figura 26 - Resultado da simulação utilizando o domínio de ar (para-raios de 69kV) ....	38
Figura 27 - Resultado da simulação utilizando o coeficiente h (para-raios de 69kV) .....	39
Figura 28 - Gráficos das temperaturas dos varistores no para-raios real e no modelo simulado.....	40

Figura 29 - Evolução da temperatura no tempo (nos pontos da Figura 19) para o impulso..... 41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes físicas usadas nas simulações de transferência de calor .....	29
Tabela 2– Tempo requerido para as simulações.....	36

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos .....	3
2	Fundamentação Teórica.....	4
2.1	Sobretensões no sistema elétrico .....	4
2.1.1	Sobretensões de manobra .....	4
2.1.2	Sobretensões provocadas por descargas atmosféricas .....	4
2.2	para-raios.....	7
2.2.1	Evolução histórica.....	8
2.2.2	Características térmicas .....	12
2.2.3	para-raios de invólucro cerâmico e polimérico.....	13
2.3	termografia .....	15
2.4	Mecanismos de transferência de calor.....	18
2.4.1	Condução .....	18
2.4.2	Convecção.....	19
2.4.3	Radiação .....	21
2.5	Método dos elementos finitos.....	23
	• Discretização do problema .....	23
	• Equacionamento dos elementos.....	23
	• Junção dos elementos.....	24
	• Solução do sistema.....	24
2.6	COMSOL Multiphysics .....	24
3	metodologia.....	24
3.1	Simulações computacionais .....	25
3.1.1	Para-raios de invólucro polimérico .....	25
3.1.2	Para-raios de invólucro cerâmico.....	25
3.1.3	Medição de temperatura em laboratório.....	29
3.1.4	Aplicação de impulso .....	32
4	resultados .....	33

4.1	Para-raios polimérico .....	33
4.2	Para-raios cerâmico .....	35
4.2.1	Utilização de diferentes mecanismos de transferência de calor .....	35
4.2.2	Modelagem da convecção: Domínio de ar versus coeficiente $h$ .....	37
4.2.3	Comparação com as medições .....	40
4.2.4	Simulação de entrada de energia impulsiva.....	40
5	conclusão .....	42
	Referências .....	44

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A eletricidade foi um dos maiores marcos na evolução da humanidade e, com o passar das décadas, tem se tornado cada vez mais indispensável ao estilo de vida do homem. O constante aumento do consumo de energia elétrica implica na necessidade de expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia para atender a demanda.

A expansão do sistema elétrico acarreta no aumento de manobras na rede, o que causa aumentos abruptos de tensão. Outra consequência é que o aumento da área física ocupada pelo sistema o torna mais susceptível à incidência de descargas atmosféricas, as quais podem causar graves danos a equipamentos, chegando até mesmo a comprometer o funcionamento de todo o sistema. O risco de ocorrência de descargas de manobra ou atmosféricas, aliado ao fato de que o fornecimento de energia elétrica deve ser feito de maneira ininterrupta, torna evidente a importância da proteção dos sistemas elétricos.

O principal equipamento de proteção contra sobretensões no sistema elétrico é o para-raios. Ele tem como função conduzir para a terra os surtos de tensão, sem interferir no funcionamento do sistema quando este opera em situação normal. Os primeiros supressores de surto consistiam apenas em centelhadores série, que apresentavam baixa eficiência. Estes foram seguidos dos para-raios de carboneto de silício, que apresentavam centelhadores menores, porém ainda com eficiência precária. O para-raios de óxido de zinco (ZnO), mais empregado atualmente, pode ser representado por uma resistência com acentuada característica não linear, de modo que, quando está submetido à tensão de funcionamento normal do sistema, apresenta alta impedância e uma pequena corrente de fuga, da ordem de microampères. Já quando é submetido a uma tensão superior a determinado nível (o que caracteriza uma sobretensão), apresenta baixa impedância, de modo que a corrente proveniente do surto é absorvida por ele e é conduzida para a terra (COLEON, 2011).

Para que a proteção dos sistemas elétricos atue de forma eficiente, é necessário que equipamentos como o para-raios funcionem perfeitamente diante de um surto a falha dos para-raios pode causar sérios danos materiais e até mesmo a morte de operários ou

usuários do sistema. Atualmente, uma das formas, que se encontra em desenvolvimento, de se garantir o bom funcionamento, é o monitoramento dos para-raios a partir de análise termográfica. De posse do mapa térmico do equipamento em determinado instante, um método de tomada de decisão adequado pode permitir determinar se já foi esgotada a vida útil do para-raios ou se ocorreu algum defeito, permitindo que sua substituição seja realizada antes que ocorra um surto, prevenindo um mal funcionamento. Tendo em vista estes fatos, para que o método de monitoramento a partir da análise termográfica seja desenvolvido, torna-se necessária uma melhor compreensão do comportamento térmico dos para-raios de óxido de zinco (ÁLVARES, 2008).

## 1.2 OBJETIVOS

**Objetivo Geral:** Realizar o estudo do comportamento térmico de para-raios de óxido de zinco de invólucro polimérico e cerâmico.

**Objetivos específicos:**

- Definir a influência de diferentes mecanismos de transferência de calor sobre a resposta térmica simulada do para-raios;
- Verificar o impacto no esforço computacional devido ao aumento da complexidade das simulações.
- Analisar o comportamento térmico do para-raios de invólucro cerâmico, diante de uma entrada de energia de caráter impulsivo.
- Obter, por meio da comparação dos dados obtidos nas simulações com dados obtidos em medições laboratoriais, um modelo adequado para a representação do comportamento térmico de para-raios.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SOBRETENSÕES NO SISTEMA ELÉTRICO

#### 2.1.1 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Manobras são mudanças na configuração do sistema, tais como a energização ou desenergização em carga de elementos indutivos e/ou capacitivos (linhas de transmissão, transformadores, bancos de capacitores e de reatores, etc.). As manobras podem acarretar transferências abruptas de energia entre campos elétricos e magnéticos, resultando em sobretensões de caráter oscilatório, com altas frequências, forte amortecimento e duração de vários milissegundos a até vários ciclos. Normalmente, apresentam valores de pico máximos em torno de 4 pu (GUERRA).

Dentre as causas das sobretensões de manobra, estão: energização ou religamento rápido de linhas de transmissão de tensão nominal elevada; interrupção de correntes capacitivas; interrupção de correntes de defeito;

Em sistemas de extra alta tensão, para-raios são utilizados para suprimir as sobretensões de manobra, devido ao altíssimo nível de tensão provocado pelos surtos.

#### 2.1.2 SOBRETENSÕES PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Descarga atmosférica é o fenômeno que resulta do acúmulo de cargas elétricas nas nuvens e a conseqüente descarga entre nuvem e nuvem ou entre nuvem e o solo, ou sobre qualquer estrutura que ofereça condições favoráveis à descarga. Por ser um fenômeno aleatório, é realizado um estudo das regiões que são mais propensas à sua ocorrência (COLEON, 2011). O termo índice cerâmico refere-se ao número de dias de trovoadas de um determinado lugar por ano. Curvas isocerâmicas são linhas que ligam pontos (localidades) que têm o mesmo nível cerâmico. O conjunto de curvas isocerâmicas de cada região geográfica denomina-se mapa cerâmico (GUERRA). Na figura 1 pode ser observado o mapa cerâmico do Brasil.

Figura 1 - Mapa isoceráunico do território brasileiro

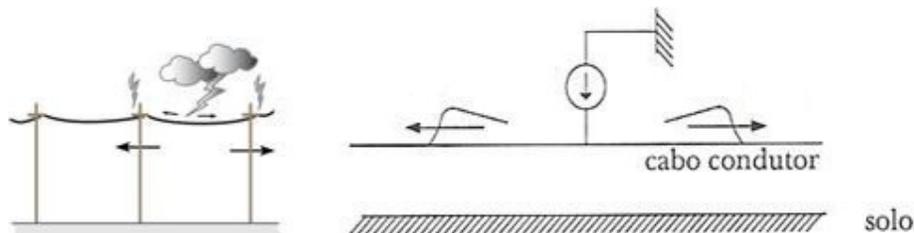


Fonte: NBR 5.419 (2018).

Ao atingir um sistema elétrico de potência, a descarga atmosférica pode provocar uma grande sobretensão aos equipamentos, dispositivos de proteção e na isolação das linhas. Caso a sobretensão produzida exceda a suportabilidade da isolação, ou seja, sua rigidez dielétrica, ocorrerá a formação de um arco elétrico que será mantido pela tensão de frequência industrial do sistema, fazendo com que seja necessária a atuação da proteção. Caso a descarga atinja transformadores, geradores, ou outros equipamentos, os danos causados são severos e irreversíveis (MARCARINI, 2012).

Ao incidir em uma linha de transmissão, uma descarga atmosférica se divide em duas frentes que se propagam em ambas as direções do condutor, a partir do ponto de incidência, como pode ser observado na Figura 2.

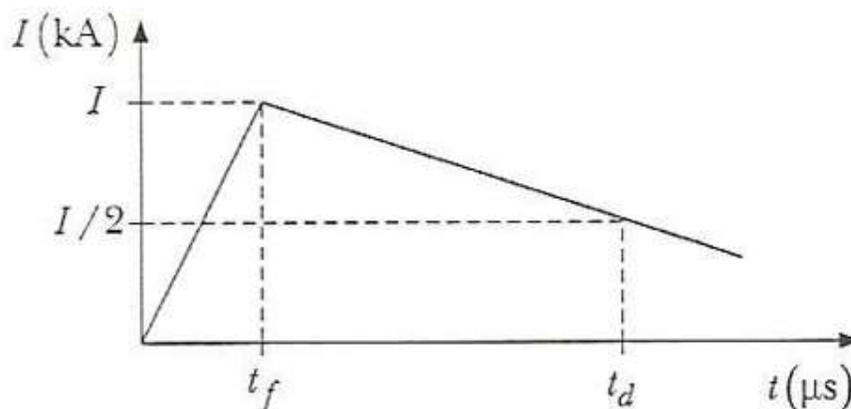
Figura 2 – Descarga direta no condutor e ondas trafegantes.



Fonte: (MARCARINI, 2012).

As frentes de onda, conhecidas como frentes de onda rápidas, possuem a característica de pulso de corrente, com duração total de cerca de 50 microssegundos, sendo a duração do zero até o pico (conhecido como tempo de crista) de cerca de 1,2 microssegundos. O tempo para a onda cair a 50% do valor de pico (conhecido como tempo de calda) varia em torno de 50 us (MARCARINI, 2012). O comportamento da corrente pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Forma de onda da corrente em uma descarga atmosférica



Fonte: (MARCARINI, 2012)

- Tempo de crista ( $t_f$ )
- Tempo de calda ( $t_d$ )

- Pico de corrente (I)

Com relação a forma como atingem o sistema, as descargas atmosféricas podem ser classificadas em dois tipos:

**Descargas de queda direta** – Estas são as descargas que incidem diretamente nos condutores de fase do sistema. Esta descarga trafega aproximadamente na velocidade da luz e atinge pontos onde podem estar localizados os equipamentos do sistema. Devido à grande sobretensão que é gerada, o valor do isolamento desses equipamentos é ultrapassado, causando grandes prejuízos e interrupção de energia.

**Descargas de queda indireta** – Apesar de não incidirem diretamente nos condutores fase, ao atingirem um elemento de proteção do sistema ou mesmo uma localidade próxima, as descargas são capazes de induzir tensões e correntes ao longo do sistema, estabelecendo um processo de propagação de ondas de tensão e corrente nos cabos para-raios, nas torres próximas e no sistema de aterramento, com reflexões determinadas conforme a impedância característica envolvida. (MARCARINI, 2012).

## 2.2 PARA-RAIOS

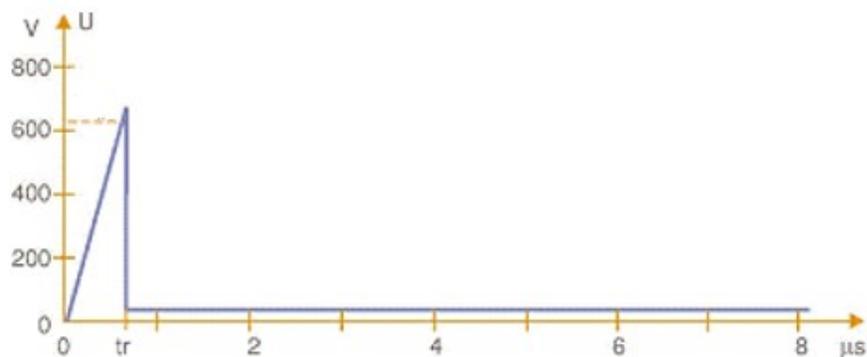
O para-raios é o equipamento de proteção responsável por mitigar os efeitos das sobretensões que atingem o sistema. Desde sua primeira concepção até a mais atual, sua função consiste em suprimir sobretensões de caráter impulsivo por meio da condução de correntes para a terra. É importante ressaltar que, devido à sua capacidade limitada de absorção de energia, o tipo de sobretensão na qual o para-raios deve atuar, deve possuir uma curta duração. No caso em que a elevação de tensão dura muitos ciclos ou até mesmo segundos, o sistema de proteção deve estar bem dimensionado de modo que outros equipamentos, tais como disjuntores, fusíveis ou seccionadores atuem. Caso o para-raios atue em tal situação, sua estrutura não suportará a quantidade de energia absorvida e isso pode acarretar em sua explosão (ÁLVARES, 2008).

## 2.2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

### Centelhadores

O primeiro modelo de para-raios para proteção de sistemas elétricos foi o centelhador. Sua estrutura consiste basicamente em dois eletrodos, separados por um dielétrico, no caso o ar, de modo que, quando a tensão entre os eletrodos excede a suportabilidade do ar, se forma um arco de impedância muito baixa, fazendo com que toda a corrente seja conduzida através do centelhador (SANTOS, 2017). Isto limita a sobretensão nos equipamentos protegidos pelo dispositivo. Na Figura 4 é possível observar a resposta de um centelhador perante uma elevação de tensão.

Figura 4: Curva de resposta de um centelhador



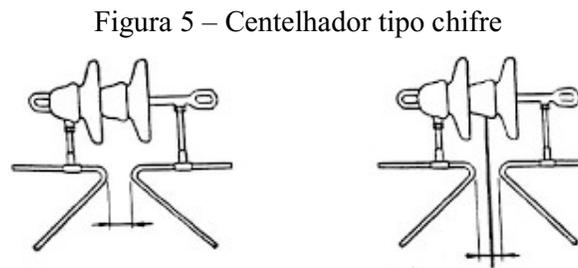
Fonte: (SANTO, 2017)

Uma das vantagens do centelhador é a sua alta capacidade de regeneração, não sendo necessário ser trocado após um determinado número de atuações. Outra vantagem é sua simplicidade e fácil manutenção. Suas principais desvantagens são (MARCARINI, 2012):

- As condições do ambiente como umidade e temperatura influenciam severamente no ponto de operação do centelhador, fazendo com que opere de forma indevida. Isso reduz consideravelmente a confiabilidade do equipamento.
- Após a formação do arco, mesmo que a tensão caia abaixo do nível nocivo, o arco voltaico leva alguns instantes para ser extinto. Isso causa perdas consideráveis e torna necessária a ação da proteção para a eliminação do curto-circuito.

- O desgaste provocado pelo arco, fazia com que a vida útil dos centelhadores fosse limitada a uma determinada quantidade de atuações.

Na Figura 5 é ilustrado o tipo de centelhador descrito acima.



Fonte: (MARCARINI, 2012).

Devido a essas desvantagens, em torno de 1920, foram desenvolvidos os centelhadores do tipo expulsão. Este possuía o mesmo princípio de funcionamento que é utilizado atualmente nos elos fusíveis de expulsão e chaves corta-circuito. Sua estrutura contava com dois centelhadores série em um tubo isolante, com espaçamentos e dielétricos diferentes, de modo que a tensão não possuía uma distribuição uniforme. Quando o dielétrico do primeiro centelhador rompia, toda a tensão era estabelecida nos terminais do segundo. O segundo centelhador contava com um material dielétrico fibroso, que, ao sofrer ruptura liberava gases que provocavam a deionização, interrompendo a corrente de forma natural, na primeira passagem pelo zero. Sua principal desvantagem estava na sua pequena vida útil, limitada pela durabilidade curta do material utilizado para deionização do arco elétrico (MARCARINI, 2012).

### **Para-raios tipo carboneto de silício (SiC)**

Os centelhadores do tipo expulsão foram rapidamente substituídos por um equipamento que ficou conhecido como para-raios tipo válvula. Estes eram basicamente constituídos de centelhadores (menores do que os usados nos modelos anteriores) em série com resistências não lineares (denominados de elementos válvula) (COLEON, 2011). Originalmente, essas resistências foram constituídas por diversos materiais, como

hidróxido de alumínio, óxido de ferro e sulfeto de chumbo. Posteriormente, passou a se usar carboneto de silício (SiC) na composição da resistência não linear que constituía o para-raios.

Os centelhadores que ainda eram utilizados nesse equipamento possuíam duas funções (COLEON, 2011):

- Isolar o para-raios do sistema em condição de regime permanente: em condições normais de funcionamento, pois os elementos de carboneto de silício apresentam uma alta corrente de fuga, que causa grandes perdas e elevações de temperatura, acarretando na sua falha em poucos ciclos caso ele esteja submetido à tensão de operação do sistema.
- Auxiliar na extinção da corrente subsequente, quando da passagem pelo zero ou proximidade do zero.

Mesmo com o equipamento demonstrando um desempenho melhor do que seus antecessores, a presença dos centelhadores em sua estrutura acarretava nos seguintes problemas (COLEON, 2011):

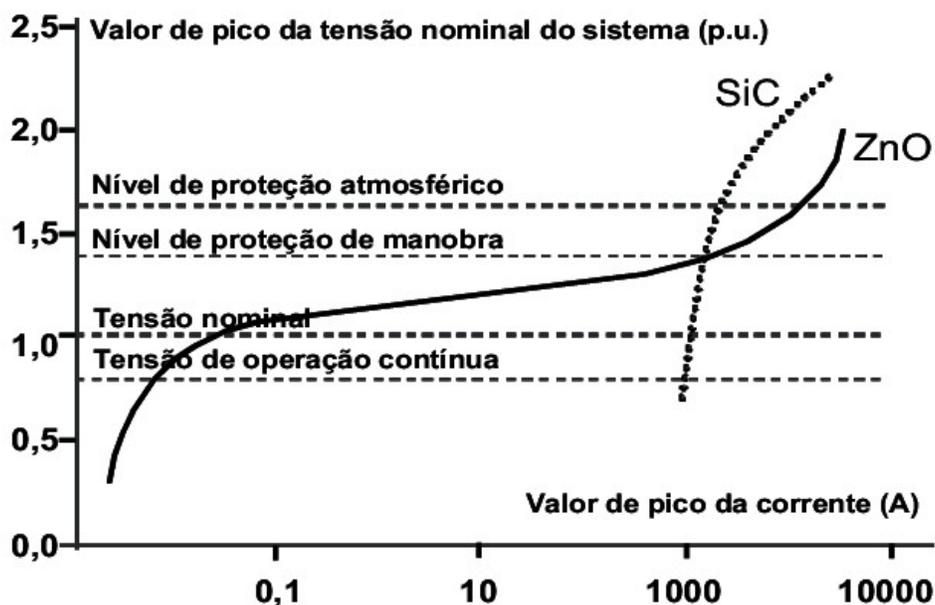
- A montagem dos centelhadores era feita, em geral, de forma manual, o que causava erros de montagem que só eram detectados por meio de ensaios de rotina;
- Dispersões significativas nos valores das tensões disruptivas de frequência fundamental e impulsivas;

Por não ter ocorrido evolução tecnológica no que diz respeito à não linearidade do SiC, não foi possível a remoção dos centelhadores de sua estrutura, limitando assim seu aprimoramento (COLEON, 2011)

### **Para-raios de óxido de zinco**

Por volta do final da década de 1960, a Matsushita Electrical Co. Ltd. desenvolveu um novo dispositivo para proteção contra sobretensões. Este dispositivo era formado por elementos cerâmicos a base de óxido de zinco, adicionado de pequenas quantidades de outros óxidos metálicos. Este material apresentara um alto grau de não linearidade na sua característica tensão versus corrente, esta característica pode ser observada na Figura 6. Essa propriedade proporcionava baixos valores de corrente na região de operação, associados a uma boa estabilidade quando os elementos cerâmicos eram continuamente solicitados pela tensão normal de operação (COLEON, 2011).

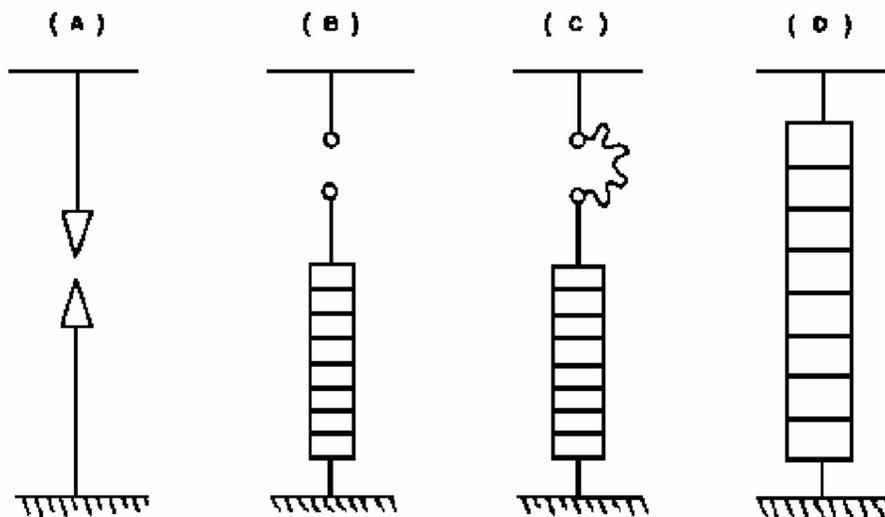
Figura 6 – Característica tensão versus corrente dos para-raios de ZnO e SiC



Fonte: (MARCARINI, 2012).

Outra grande vantagem apresentada pelo para-raios de óxido de zinco foi o fato de que a característica não linear de sua estrutura possibilitou que o projeto não necessitasse de centelhadores. Este fato simplificou o modelo e tornou seu funcionamento mais confiável e com maior durabilidade, fazendo com que o para-raios de SiC fosse ultrapassado e substituído (COLEON, 2011). Além disso, como pode ser observado na Figura 6, existe uma distância considerável entre a região de condução e a região de não condução na curva de tensão versus corrente do para-raios de óxido de zinco, isso mostra que este para-raios possui uma menor corrente de fuga e é capaz de atuar mais rapidamente diante de uma elevação de tensão acima do normal, quando comparado ao para-raios de carboneto de silício. Uma ilustração da evolução dos para-raios pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 - Evolução dos dispositivos de proteção



Fonte: CEPEL, 1977.

### 2.2.2 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

As condições térmicas exercem uma forte influência no bom funcionamento de um para-raios, devido à existência de uma relação direta entre a temperatura e grandezas como corrente de fuga. Mesmo quando submetido a um esforço elétrico, é necessário que o para-raios mantenha suas características e desempenho aceitáveis. Para tanto, ele deve ser termicamente estável (COSTA, 1999).

O para-raios deve apresentar estabilidade térmica tanto quando está submetido à tensão normal de operação quanto quando está submetido à surtos causados por descargas atmosféricas ou manobras na rede. Ele também deve ser capaz de absorver e dissipar a energia para o ambiente sem causar aumento excessivo de sua temperatura. A pequena corrente resistiva que percorre permanentemente o para-raios de ZnO tem um aumento de sua taxa de crescimento com o aumento na tensão aplicada. Assim, é de crucial importância garantir que o nível de potência absorvido não exceda o valor máximo de

dissipação do para-raios. Caso isso ocorra, haverá um aumento indefinido da corrente e da temperatura, o que acarretará em uma avalanche térmica (COSTA, 1999). A avalanche térmica consiste em um fenômeno autoalimentado, no qual o aumento da corrente acarreta no aumento da temperatura e vice-versa, até que os valores de temperatura e potência absorvida sejam superiores aos suportados pela estrutura física do para-raios, causando sua destruição.

Além da influência da tensão aplicada sobre a corrente resistiva, há também a influência da temperatura. Como os elementos não-lineares são semicondutores, o aumento da temperatura provoca o aumento da concentração de portadores de cargas, resultando no aumento da corrente de fuga resistiva com a temperatura (COSTA, 1999).

Um valor crítico de potência absorvida também pode ser utilizado como critério avaliativo da vida útil do para-raios. Para muitos casos é dado como parâmetro de valor crítico o dobro da corrente ou da potência absorvida. Caso este valor seja atingido, o para-raios é dado como “morto” e deve ser substituído para evitar eventuais acidentes (COSTA, 1999).

### 2.2.3 PARA-RAIOS DE INVÓLUCRO CERÂMICO E POLIMÉRICO

Inicialmente, todos os para-raios eram feitos com invólucro cerâmico, porém, essa estrutura apresentava certos problemas. Com o envelhecimento do material, ocorria a penetração de umidade devido à perda de estanqueidade. Quando exposto ao ambiente, como no caso dos para-raios instalados nas subestações à céu aberto, as intempéries provocam trincas e fissuras. Isso associado ao fato de que a cerâmica é um material hidrofílico, faz com que o para-raios fique vulnerável à umidade (COLEON, 2011).

Além disso, como o para-raios de invólucro cerâmico possui um espaçamento de ar entre a coluna de varistores e o invólucro, ao ser submetido à corrente de falta, ocorre a formação de gases de alta pressão em seu interior. Caso o para-raios não possua um dispositivo de alívio de alta pressão, esses gases tendem a provocar a fragmentação do invólucro ou até mesmo a explosão do equipamento. (COLEON, 2011).

Esses problemas foram significativamente reduzidos quando, em meados da década de 80, passou a ser utilizado o invólucro polimérico. Esse material apresenta característica hidrofóbica e, por não possuir um espaçamento de ar interno, é bem menos propenso à perda de estanqueidade por penetração de umidade. Ao mesmo tempo, a

ausência do espaçamento de ar interno também reduziu o problema da elevação de pressão interna durante a sua atuação, reduzindo os riscos de explosão. Além disso, dada a explosão do equipamento, os estilhaços de polímero acarretarão em consequências menos destrutivas do que os estilhaços de cerâmica. Também é importante ressaltar que uma eventual falha do para-raios não acarreta apenas na perda do equipamento, podendo causar distúrbios severos no sistema, bem como dano a outros equipamentos adjacentes. (COLEON, 2011).

Ademais, existem outras vantagens do invólucro polimérico com relação ao cerâmico (COLEON, 2011):

- Possui uma melhor distribuição de tensão e melhor desempenho sob contaminação: A umidade aliada ao depósito de contaminantes na superfície do invólucro podem causar uma elevação na corrente de fuga e uma distribuição de tensão não uniforme ao longo do para-raios. Em adição, esse fenômeno causa aquecimento excessivo nos elementos de óxido de zinco e também pode gerar uma ionização interna, que degrada estes elementos. No para-raios de invólucro polimérico, este efeito é bastante atenuado, devido ao fato de possuírem uma maior distância de escoamento e a característica hidrofóbica.
- Apresentam menores perdas por apresentarem uma menor corrente de fuga.
- Por possuírem uma maior distância de escoamento para um mesmo comprimento, é possível a construção de um para-raios de invólucro polimérico para um mesmo nível de tensão com comprimento significativamente menor. Esta redução pode chegar até a 40%, em para-raios de classe estação.
- Possuem menor peso. Tipicamente, os para-raios de invólucro polimérico são 50% mais leves do que os de invólucro cerâmico. Isso acarreta em menores esforços mecânicos sobre as estruturas onde o equipamento é instalado.
- Em geral, não necessitam de dispositivos de alívio de sobrepressão, tornando seu projeto mais simples e barato.
- Não apresentam problemas de trincas ou lascas, ocasionados por transporte, manuseio indevido durante a instalação ou vandalismo.
- Possuem melhor capacidade de dissipação de calor, melhorando suas propriedades térmicas.

Entretanto, pelo fato de o invólucro cerâmico estar consolidado no mercado há muitos anos, este continua a ser utilizado até os dias de hoje. Pelo fato de o para-raios de

invólucro cerâmico ser mais propenso a perda de desempenho com o tempo, seu monitoramento se torna vital. Na Figura 8, podem ser observados os dois tipos de para-raios: de invólucro cerâmico e polimérico.

Figura 8 – Para-raios de invólucro polimérico (à esquerda) e cerâmico (à direita)



Fonte: Google imagens

Ao lançar mão da análise termográfica, é notável a diferença do comportamento térmico entre os equipamentos com os dois tipos de invólucro. O fato de o invólucro cerâmico contar com um espaçamento de ar interno torna a transferência de calor mais complexa: Primeiro ocorre uma troca de calor entre a coluna de varistores e o ar, e em seguida, entre o ar e o invólucro. Isso faz com que seja necessário o conhecimento desse comportamento, a fim de se obter uma correlação entre as temperaturas, para que seja possível, a partir do mapa térmico do invólucro (de medição mais acessível), ter informação sobre a evolução da temperatura interna. Isso possibilita prever quando o para-raios já não está operando de forma correta e deve ser substituído (ÁLVARES, 2008).

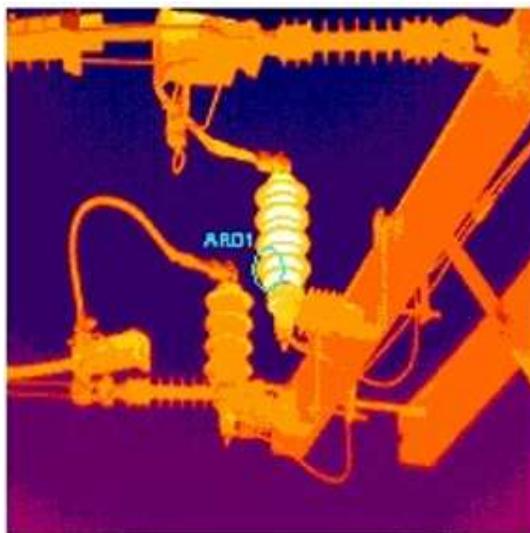
## 2.3 TERMOGRAFIA

Criada na década de 60, a termografia é a ciência de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas. É

a técnica que estende o conceito de visão humano ao espectro infravermelho, que constitui uma faixa de frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com intensidade relacionada à sua temperatura (ÁLVARES, 2008).

A termografia é comumente utilizada para a realização da manutenção preditiva, lançando-se mão da inspeção termográfica em sistemas como os mecânicos, elétricos e de processos. Ela também pode ser utilizada para emissão de laudos técnicos, ilustrando eventuais distorções operacionais com auxílio de termogramas e registros fotográficos. Para aprimoramento da análise, também pode-se empregar técnicas de processamento de imagem. Termogramas são as imagens que permitem a visualização da distribuição de temperatura da superfície focalizada. A aquisição dos termogramas é realizada por um equipamento denominado termovisor. Este é capaz de produzir uma imagem destacando o perfil térmico de um componente, detectando qualquer aquecimento anormal, fora do padrão térmico do objeto (ÁLVARES, 2008). São ilustrados um termograma e um termovisor, nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 – Termograma de uma subestação



Fonte: Adaptado de (ÁLVARES, 2008)

Figura 10 – Termovisor



Fonte: (MENDONÇA, 2005)

O fato de os instrumentos de medição não requererem contato físico para realizarem as leituras torna a termografia um processo de coleta e análise de dados térmicos bastante seguro. Além disso, possibilita que as medições sejam realizadas com os equipamentos em funcionamento, evitando a parada de uma indústria que funciona 24 horas por dia, por exemplo. Uma outra vantagem desse procedimento é seu bom rendimento de inspeção, possibilitando a cobertura de um número razoável de dispositivos em um curto período de tempo.

São alguns dos benefícios apresentados pela aplicação da inspeção termográfica em equipamentos elétricos (ÁLVARES, 2008):

- Manutenção preditiva – Permite que falhas, que causariam eventuais prejuízos, sejam detectadas e tratadas antecipadamente;
- Estoques – Evitar problemas causados por falhas permite redução do investimento em estocagem;
- Tempo – Inspeccionar vários equipamentos em menor intervalo de tempo;

- Consumo de energia – A termografia permite inspecionar e corrigir sobreaquecimentos anormais, que geram perdas e aumento no consumo;
- Vida útil – Evita queima ou perda desnecessária de dispositivos ao detectar o problema.

## 2.4 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Enquanto a termodinâmica tem seu estudo voltado para a quantidade de calor que é transferida de um corpo para outro durante um processo, a ciência da transferência de calor se preocupa com a taxa com que essa transferência acontece, relacionando a quantidade de calor transferida em um determinado intervalo de tempo (ÇENGEL, GHAJAR, 2011). A transferência de calor sempre ocorre obedecendo as duas primeiras leis da termodinâmica: A taxa de energia transferida para um sistema deve ser igual à taxa de crescimento de sua energia; O calor deve ser transferido na direção da menor temperatura. Da mesma forma que é necessária uma diferença de potencial para que haja corrente elétrica, analogamente, também é necessário que haja diferença de temperatura para que haja transferência de calor entre dois meios.

A transferência de calor entre dois meios pode ocorrer de três diferentes modos, que serão discutidos adiante: condução, convecção e radiação (ÇENGEL, GHAJAR, 2011).

### 2.4.1 CONDUÇÃO

Condução ocorre pela transferência de energia de partículas mais energéticas de uma substância/meio, para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. No caso de líquidos e gases, a condução dá-se por meio das colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios. Já nos sólidos, ocorre devido à combinação das vibrações das moléculas em rede, e a energia é transportada por elétrons livres (ÇENGEL, GHAJAR, 2011).

A taxa de transferência de calor por condução em um meio depende da geometria, da espessura e do tipo de material e da diferença de temperatura a qual o meio está submetido.

Considerando inicialmente a condução de calor em regime permanente através de uma superfície plana de espessura  $\Delta x = L$  e área  $A$ , e sendo a diferença de temperatura através da superfície  $\Delta T = T_1 - T_2$ . É experimentalmente comprovado que, a taxa de transferência de calor  $\dot{Q}$  através de uma superfície, dobra quando a diferença de temperatura  $\Delta T$  ou a área  $A$ , normal em direção da transferência de calor, são dobradas, mas é reduzida pela metade quando se dobra a espessura da superfície,  $L$ . Em outras palavras, a taxa de condução de calor é diretamente proporcional à diferença de temperatura a qual a superfície está submetida e sua área, porém, é inversamente proporcional à sua espessura (ÇENGEL, GHAJAR, 2011). Ou seja:

$$\text{Taxa de condução de calor} \propto \frac{(\text{Área}) \cdot (\text{Diferença de temperatura})}{\text{Espessura}}$$

ou ainda:

$$\dot{Q} = k \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\Delta x_x} \quad (1)$$

Em que:

$k$  é uma constante de proporcionalidade;

$A$  é a área da superfície;

$T_1 - T_2$  é a diferença de temperatura através da superfície;

$\Delta x_x$  é a espessura da superfície.

Existe um modelo matemático proposto por Joseph Fourier, que relaciona a difusão com o gradiente da variável envolvida e uma constante de proporcionalidade. No caso do modelo para condução térmica, é feita uma relação entre o fluxo de calor, o gradiente térmico e uma constante de proporcionalidade  $k$ , que é chamada neste caso de condutividade térmica. O fluxo de calor (taxa de calor transferido por unidade de área) varia de acordo com a área que ele cruza, logo, este possui natureza vetorial (ÇENGEL, GHAJAR, 2011)

#### 2.4.2 CONVECÇÃO

O mecanismo da convecção trata-se da transferência de calor entre um corpo de massa sólida e um fluido em movimento. Na ausência de movimento do fluido, a

transferência de calor se dá por condução. Quanto maior a velocidade do movimento do fluido, maior a transferência de calor por convecção.

No caso em que o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por um atuador externo, como um ventilador, compressor, ou bomba, é dito que ocorre uma convecção forçada. Por outro lado, ocorre o que é conhecido como convecção natural ou livre se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas por diferenças de densidade, decorrentes da variação da temperatura do fluido (ÇENGEL, GHAJAR, 2011). Mesmo sendo complexa, a transferência de calor por convecção é comumente considerada relacionada à diferença de temperatura, expressada pela lei de Newton do resfriamento:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Sendo:

$h$  = Coeficiente de transferência de calor;

$A$  = Área da superfície por meio da qual a transferência de calor por convecção ocorre;

$T_s$  = Temperatura da superfície;

$T_\infty$  = Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

O coeficiente de transferência de calor  $h$ , é um parâmetro determinado experimentalmente e empiricamente. Todas as variáveis que influenciam na convecção impactam no seu valor. Exemplos dessas variáveis, são: a geometria da superfície, natureza do movimento do fluido, propriedades e velocidade do fluido (ÇENGEL, GHAJAR, 2011).

A transferência de calor que ocorre devido à convecção do ar externo ao para-raios pode ser modelada por meio de diferentes tipos de aproximação. A aproximação mais simples consiste em definir um índice de troca de calor entre o ar e o invólucro, o coeficiente de transferência de calor  $h$ , que representa o fluxo de calor por unidade de gradiente de temperatura, em  $W/m^2 \cdot K$ , suposto constante. Este coeficiente, a rigor, deve ser estimado de forma empírica, fazendo-se considerações sobre a temperatura externa, a geometria do objeto analisado e a presença ou não de convecção forçada (ÇENGEL, GHAJAR, 2011). Pequenas modificações nas condições da simulação causam uma grande variação nos valores aceitáveis para o coeficiente  $h$ . A outra abordagem requer a simulação da convecção do ar adjacente ao para-raios, o que representa um esforço

computacional significativamente maior, porém é, a princípio, uma representação mais realista do problema.

### 2.4.3 RADIAÇÃO

O fenômeno da radiação consiste na emissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas, devido a mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas. Uma das principais diferenças entre a radiação e os outros mecanismos de transferência de calor, é que esta não necessita de um meio interveniente (ÇENGEL, GHAJAR, 2011). Sua ocorrência se dá na velocidade de propagação da luz no meio e pode ocorrer no vácuo sem sofrer atenuação (o que explica como o calor do sol é capaz de chegar até a Terra).

No caso da radiação térmica, o procedimento ocorre devido a temperatura dos corpos, diferentemente dos outros tipos de radiação, tais como os raios X, ondas de rádio e televisão, micro-ondas e raios gama, que não possuem nenhuma relação com a temperatura. Qualquer corpo que possua uma temperatura superior ao zero absoluto é capaz de emitir radiação térmica.

A lei de Stefan-Boltzmann expressa a taxa máxima de radiação que pode ser emitida por uma superfície na temperatura termodinâmica  $T$ , a partir da equação:

$$\dot{Q}_{max} = \sigma A_s T_s^4, \quad (3)$$

Em que:

$\dot{Q}_{max}$  é a taxa máxima de radiação;

$\sigma$  é a constante de Boltzmann;

$A_s$  é a área da superfície;

$T_s$  é a temperatura termodinâmica.

A superfície idealizada que emite radiação à essa taxa máxima denomina-se corpo negro, e a radiação emitida por este é chamada de radiação de corpo negro. Qualquer superfície real emite radiação à uma taxa menor do que a emitida por um corpo negro, na

mesma temperatura. A taxa de radiação de superfícies reais pode ser expressa pela equação:

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (4)$$

Em que:

$\dot{Q}_{emit}$  é a taxa de radiação emitida;

$\varepsilon$  é a emissividade da superfície;

$\sigma$  é a constante de Boltzmann;

$A_s$  é a área da superfície;

$T_s$  é a temperatura termodinâmica.

A emissividade é a propriedade que indica o quão próximo de um corpo negro é o comportamento de determinada superfície. Seu valor sempre está entre 0 e 1, sendo 1 no caso do corpo negro.

De maneira análoga, existe uma outra importante propriedade da radiação de uma superfície: a absorvidade  $\alpha$ . Assim como a emissividade mede a capacidade de uma superfície emitir radiação, a absorvidade mede a capacidade que a superfície possui de absorver a radiação. Seu valor também está entre 0 e 1 (ÇENGEL, GHAJAR, 2011). No caso do corpo negro, seu valor é 1, ou seja, este tem a capacidade de absorver toda a radiação incidente sobre ele, sendo configurado como um perfeito absorvedor e perfeito emissor.

A diferença entre as taxas de radiação emitida e absorvida pela superfície resulta na transferência de calor líquida por radiação. Caso a taxa de absorção de radiação seja maior do que a taxa de emissão de radiação, a superfície está ganhando energia por radiação. Caso contrário, a superfície está perdendo energia por radiação. Entretanto, para um caso real, a determinação da taxa líquida de transferência de calor por radiação entre duas superfícies é uma tarefa difícil. Seu valor depende das propriedades das superfícies, das orientações de uma em relação as outras e da interação no meio entre as superfícies com radiação (ÇENGEL, GHAJAR, 2011).

No caso da transferência de radiação de calor de ou para uma superfície cercada de gás, como o ar, ocorre paralelamente por condução (e/ou convecção, se houver o movimento da massa de gás), entre a superfície e o gás. Dessa forma, a transferência total de calor é determinada pela adição das contribuições de ambos os mecanismos de transferência de calor. Isso justifica o aumento da complexidade do modelo de estudo,

para o caso do para-raios de invólucro cerâmico, que possui uma camada de ar em seu anterior.

## 2.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) é utilizado para a solução de problemas que envolvem sistemas de equações diferenciais parciais. A geometria em estudo é subdividida em pequenas partes denominadas de elementos, as quais passam a representar o domínio contínuo do problema. Esta divisão permite que um problema complexo se torne uma série de problemas mais simples, que podem ser resolvidos com mais eficiência computacional. A motivação do MEF é que um número infinito de variáveis desconhecidas seja substituído por um número finito de elementos de comportamento bem definido, tendo as divisões diferentes formas, tais como triangular, quadrilateral, entre outras, a depender do tipo e dimensão do problema (GIACCHINI, 2012).

Devido as subdivisões da geometria, os resultados encontrados não são exatos, mas serão uma boa aproximação do comportamento físico real das variáveis do sistema referente ao problema. As etapas seguidas pelo método são (GIACCHINI, 2012):

- DISCRETIZAÇÃO DO PROBLEMA

Ocorre como descrito: representar de maneira abstrata a região de interesse, subdivisão em elementos finitos. A forma da geometria dos elementos geralmente é de polígonos simples. Então, os elementos finitos são conectados entre si por pontos, que são denominados de nós. Um agrupamento de elementos e nós é denominado de malha.

- EQUACIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Trata-se de escolher e utilizar um modelo equacional que possa reger fisicamente os elementos, como por exemplo a lei de Hooke, lei de Fourier, equação de Poisson, entre outras equações que regem fenômenos físicos. Logo após, são construídas matrizes de coeficientes referentes a cada elemento. Com essas matrizes, são montadas equações matriciais, baseadas no modelo físico adotado. Cada elemento possui uma equação matricial que o relaciona com a grandeza física sob análise.

- JUNÇÃO DOS ELEMENTOS

A junção dos elementos consiste na criação de uma matriz global a partir da junção de todas as matrizes de coeficientes. A matriz define o acoplamento entre quaisquer dois nós da malha, é simétrica e esparsa. Finalmente, é obtida uma equação matricial resultante da combinação das equações matriciais dos elementos, que representa um sistema de equações, e este sistema terá um número de equações igual aos graus de liberdade presentes nos nós do sistema analisado. Porém, como até o momento o número de incógnitas é superior ao número de equações, é necessário que sejam aplicadas condições de contorno para que o sistema se torne solúvel.

- SOLUÇÃO DO SISTEMA

Finalmente, é possível obter a solução do sistema representado na equação matricial global por meios tradicionais. A solução fornece os valores numéricos correspondentes a cada grau de liberdade de cada nó do sistema. Mesmo obtendo soluções aproximadas, é possível melhorar a precisão dos resultados através do refinamento da malha, estando sempre ciente de que o esforço computacional necessário aumenta com o aumento da precisão requerida para a solução.

## 2.6 COMSOL MULTIPHYSICS

COMSOL Multiphysics® (formalmente FEMLAB - *finite element analysis*) é um pacote de software de análise e resolução de elementos finitos com várias aplicações em física e engenharia, especialmente fenômenos acoplados ou multifísicos. O *software* disponibiliza de gráficos, imagens 2D e 3D, animações e tabelas para visualização de suas soluções, além da possibilidade de exportar tais resultados. Os estudos são realizados através de diversos módulos divididos em categorias de acordo com a física envolvida (FREI, 2017).

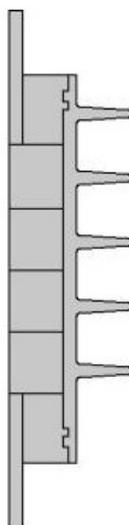
## 3 METODOLOGIA

## 3.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

### 3.1.1 PARA-RAIOS DE INVÓLUCRO POLIMÉRICO

Com o auxílio de um *software* de desenho, foi desenvolvido um modelo, que é ilustrado na Figura 11, baseado nas dimensões de um para-raios de invólucro polimérico de tensão nominal de 12 kV, classe distribuição, considerando sua larga utilização nas redes de distribuição de 13,8 kV. Tendo o objetivo de estudar o desempenho do para-raios em uma situação de stress, a simulação foi realizada com a aplicação de sua tensão nominal (como o para-raios é instalado entre a fase a terra, a tensão sob a qual ele é submetido em condições normais é a tensão de fase do sistema, que no caso de sistemas de 13,8 kV é de 8 kV). Considerando a temperatura inicial de 20°C (que é aproximadamente a temperatura ambiente) e aplicando 12 kV em seus terminais durante 50 minutos, que é aproximadamente o tempo que a temperatura do para-raios leva para se estabilizar.

Figura 11 – Modelo do para-raios de 12 kV



Fonte: Autoria própria

### 3.1.2 PARA-RAIOS DE INVÓLUCRO CERÂMICO

A fim de se verificar o impacto dos diferentes mecanismos de transferência de calor na resposta térmica do para-raios de invólucro cerâmico, bem como validar o estudo

em para-raios de classes de tensão diferentes, inicialmente, foram realizadas simulações com modelagens físicas distintas, no que se diz respeito a transferência de calor: O primeiro estudo foi feito de modo a comparar o comportamento térmico do para-raios, ao se lançar mão de diferentes mecanismos de transferência de calor na simulação. Para que a influência da utilização de todos os mecanismos de transferência de calor sobre a exatidão e esforço computacional da simulação fosse analisada, foram realizadas quatro simulações, com um aumento gradativo na complexidade da modelagem utilizada. Na primeira simulação, apenas a transferência de calor por condução foi considerada. Na segunda, foram considerados os mecanismos de condução e convecção. Na terceira, os três mecanismos foram modelados - condução, convecção e radiação. Porém, tanto na segunda quanto na terceira simulação, a convecção do ar externo ao invólucro foi modelada por meio do coeficiente de transferência de calor  $h$ . O valor inicialmente utilizado para o coeficiente de fluxo convectivo foi  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , um valor típico utilizado como estimativa inicial para a convecção natural do ar. A última simulação incorporou os três mecanismos de transferência de calor e a definição de um domínio de ar externo, no qual a convecção foi definida por meio do fluxo laminar do ar adjacente ao invólucro.

Em seguida, o estudo realizado teve enfoque em comparar os resultados das simulações que contavam com as duas modelagens para a convecção externa: o domínio de ar externo e o coeficiente de transferência de calor  $h$ . Para tal, foram utilizados dois modelos de para-raios de ZnO de invólucro cerâmico, tipo estação, um de 69 kV e outro de 230kV, construídos a partir de dados extraídos de para-raios reais, os quais são mostrados na Figura 12. O para-raios da Figura 12a é empregado em sistemas de 69 kV, enquanto o para-raios da Figura 12b é empregado em sistemas de 230 kV, tendo uma tensão nominal eficaz de 192 kV, dividido em 2 colunas de 96 kV.

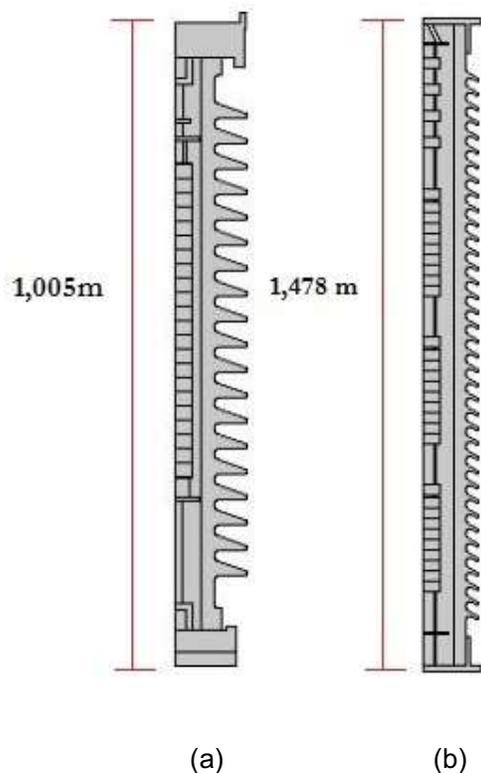
As principais diferenças entre os modelos são as dimensões e a geometria interna. O modelo da Figura 12b apresenta mais de uma coluna de varistores, espaçadas por condutores ocos de alumínio, e o modelo da Figura 12a, uma única coluna sem espaçamento entre os varistores.

Para o estudo, inicialmente foi realizada a simulação com o para-raios da Figura 12a, lançando mão de todos os mecanismos de transferência de calor e modelagem da convecção externa a partir do domínio de ar envolvendo o para-raios. Em seguida, a segunda simulação foi realizada, ajustando-se o coeficiente de transferência de calor  $h$  (o

valor estimado foi de  $0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) a fim de se obter um comportamento térmico semelhante ao da primeira simulação. Em seguida, foi feita uma comparação entre os mapas térmicos de cada simulação, bem como do esforço computacional necessário para a realização de cada uma delas.

A métrica empregada para mensurar o esforço computacional foi o tempo de simulação. O tempo de simulação pode variar de acordo com o poder de processamento do computador utilizado. O computador onde o presente estudo foi realizado possui um processador Intel Core i7-7500U 2,70 GHz, 16 GB de memória RAM e um sistema operacional de 64 bits.

Figura 12 – Modelos de para-raios utilizados nas simulações: Modelo de 69 kV (a) e modelo de 230 kV (b)



Fonte: Autoria própria

A física utilizada para a simulação do modelo de para-raios da Figura 12a conta com o módulo *Electric Currents*, que tem como resultado a potência dissipada no para-raios, a partir dos dados de tensão, corrente ou potência elétrica de entrada. No caso da simulação do para-raios da Figura 12b, a potência dissipada no para-raios foi inserida

diretamente nos varistores, utilizando-se do módulo *heat transfer in solids*, não sendo necessário a informação de entrada elétrica. No segundo caso, o resultado da situação estudada é obtido diretamente, pois o objetivo é simular a situação onde o para-raios já se encontra desgastado com o uso, e está dissipando uma potência térmica de 10 W (dado de entrada direta para o segundo caso).

A fim de verificar uma melhor relação de consistência de resultados e esforço computacional, foi feito um comparativo entre as simulações empregando os dois modelos de para-raios mostrados na metodologia, no qual foram utilizados: um domínio de ar ao redor do para-raios, para simular a convecção externa; uma aproximação da convecção externa por meio do coeficiente de transferência de calor  $h$ . Os para-raios reais, utilizados como base para a construção dos modelos computacionais podem ser observados na Figura 13.

Figura 13 – Para-raios utilizados como modelo de estudo: de 69kV (a) e 230 kV (b)



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

Na tabela 1, constam os valores das constantes físicas dos materiais utilizados nas simulações.

**Tabela 1. Constantes físicas usadas nas simulações de transferência de calor**

<b>Material</b>	<b>Condutividade e térmica (W/m·K)</b>	<b>Calor específico (J/kg·K)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade e elétrica (S/m)</b>	<b>Emissividade e</b>
<b>Porcelana</b>	1,6	776	2400	$1 \cdot 10^{-6}$	0.92
<b>Alumínio</b>	204	900	2707	$3,774 \cdot 10^7$	0.4
<b>ZnO</b>	23	456	5258	$1,1756 \cdot 10^{-6}$	0.92

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.3 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM LABORATÓRIO

De modo a se obter medidas de temperatura para comparação e ajuste das simulações, ensaios e medições foram realizados no *kit* de alta tensão do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande. O objeto de estudo foi o para-raios de 69 kV de invólucro cerâmico, representado na Figura 13a. Com o auxílio de uma termocâmera, a temperatura do invólucro foi medida em alguns pontos, ao longo do tempo. Com o objetivo de promover uma elevação apreciável de temperatura, o para-raios foi submetido a um ciclo de aplicação de sobretensão.

O para-raios foi ligado a um circuito alimentado com o auxílio de um transformador elevador de 5 kVA, 220 V - 100 kV. Um divisor capacitivo com um fator de atenuação de aproximadamente 1937 foi empregado para medição da tensão aplicada. Tensão, corrente e a temperatura do para-raios analisado foram medidos, em uma situação de sobretensão, para vários valores de tempo. Uma imagem do circuito utilizado pode ser

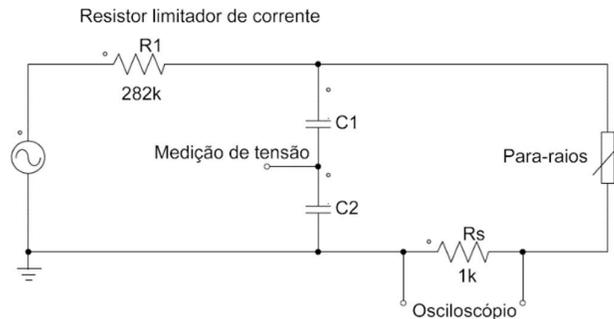
vista na Figura 14, seu diagrama elétrico é mostrado na Figura 15.

Figura 14 - Circuito utilizado para o ensaio



Fonte: Autoria própria

Figura 15 – Esquema elétrico do circuito utilizado



Fonte: Autoria própria

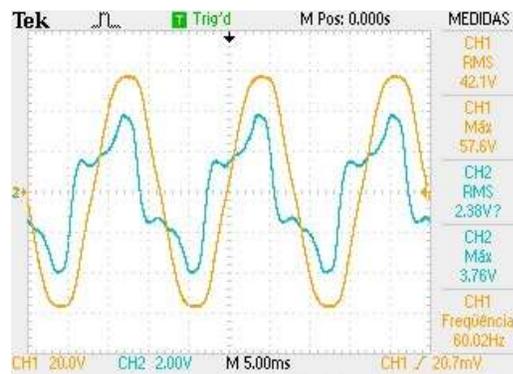
A potência absorvida pelo para-raios foi calculada através da equação (5):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt, \quad (5)$$

Em que  $v$  e  $i$  são, respectivamente, os sinais estimados de tensão e corrente, obtidos multiplicando os sinais obtidos pela constante do divisor capacitivo;  $P$  representa a potência calculada, sendo o valor médio da integral, em um período de tempo  $T$ , em três ciclos de 60 Hz. Durante o experimento, os valores de tensão e corrente foram registrados

por um osciloscópio a partir de oscilogramas (ilustrado na Figura 16), e seus valores de temperatura foram registrado por uma termocâmera, a partir de termogramas (ambos ilustrados na Figura 17).

Figura 16 - Oscilograma



Fonte: Autoria própria

Figura 17 – Captura de imagem da termocâmera

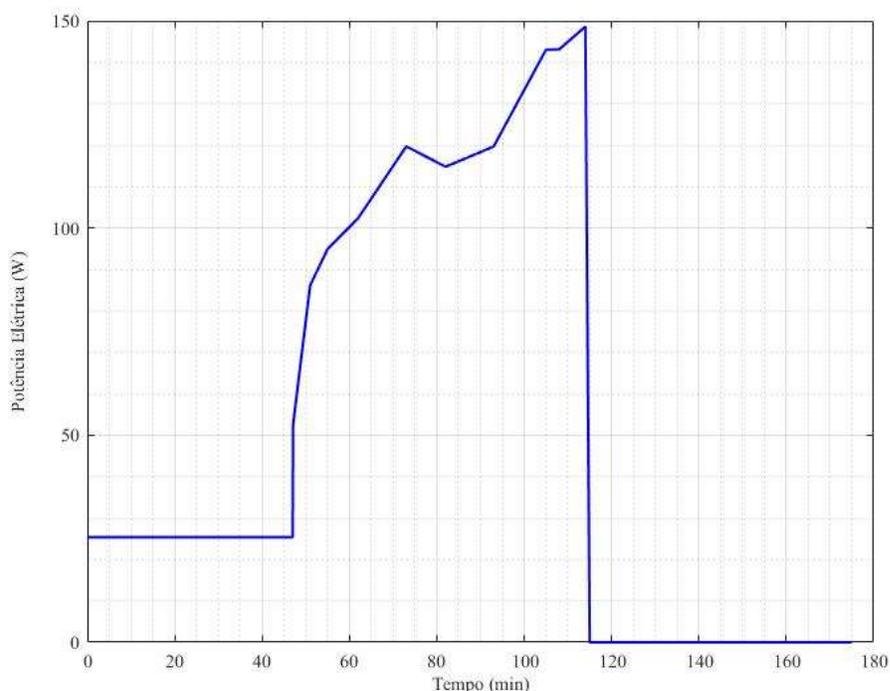


Fonte: Autoria própria

Com objetivo de validar o modelo computacional utilizado (ilustrado na Figura 12a), foram realizadas simulações utilizando o dado modelo, tendo como entrada a potência calculada pela equação (5), obtida na realização do experimento com o para-raios real, feita em laboratório. O levantamento da aproximação realizada a partir da

equação (5), que pode ser observada graficamente na Figura 18, foi feita com o auxílio dos oscilogramas obtidos ao longo da experiência. Para a simulação, foi utilizada a modelagem da convecção externa com o auxílio de um domínio de ar envolvendo o para-raios. Em seguida, os dados obtidos nas simulações foram comparados com os dados obtidos no experimento.

Figura 18 – Gráfico da Potência calculada com o auxílio da equação (5).

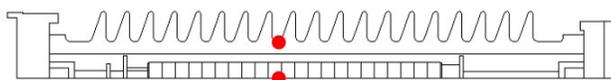


Fonte: Autoria própria

#### 3.1.4 APLICAÇÃO DE IMPULSO

A aplicação de um impulso de energia de 288 kJ também foi simulada. Este valor foi calculado a partir dos dados nominais do para-raios da Figura 12a, dado que sua capacidade de absorção de energia é de 4kJ/kV e sua tensão nominal é de 72 kV. O impulso foi modelado de modo a ter uma duração de 10 ms, seguido de um período de resfriamento de 2 horas. A temperatura do para-raios foi analisada em 2 pontos, que são ilustrados na Figura 19, um localizado na coluna de varistores e outro no invólucro.

Figura 19 – Pontos onde a temperatura foi analisada



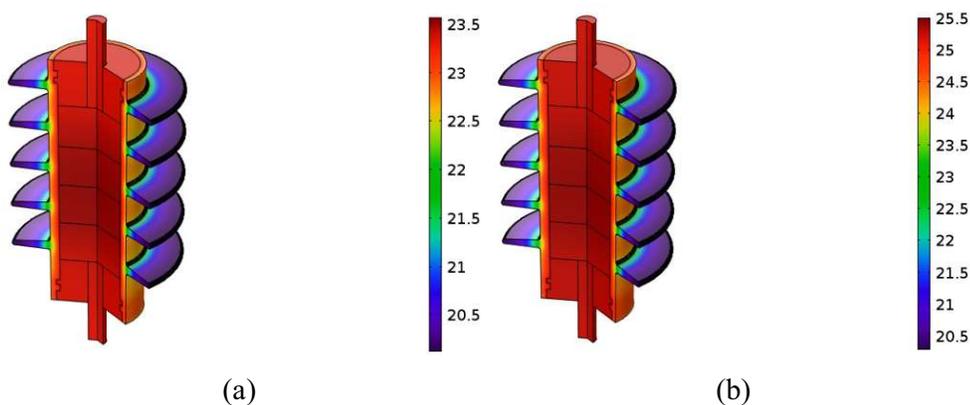
Fonte: Autoria própria

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PARA-RAIOS POLIMÉRICO

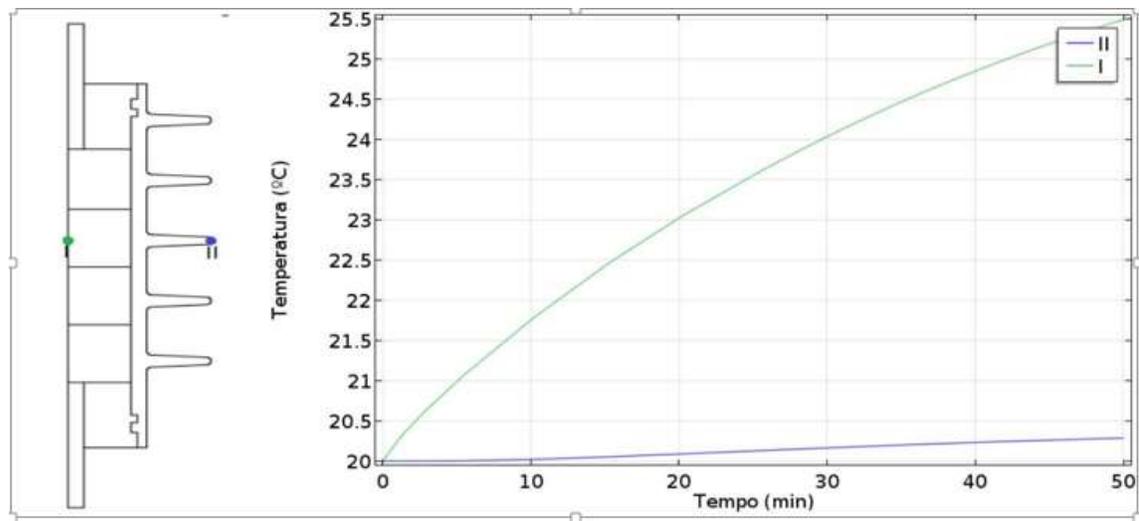
Após a realização das simulações, gráficos foram obtidos com informações referentes ao comportamento térmico dos para-raios poliméricos após um esforço elétrico durante um determinado intervalo de tempo. Em cada situação foi feita uma comparação da evolução da temperatura com o tempo em dois pontos distintos, um deles localizado na coluna de varistores e o outro no invólucro. Os perfis de temperatura do para-raios de 12 kV após 25 e 50 minutos, podem ser vistos na Figura 20. Na Figura 21, é mostrada a evolução da temperatura em dois pontos, no centro do varistor e no invólucro do para-raios de 12 kV.

Figura 20: Mapa térmico do para-raios de 12 kV após 25 minutos (a) e após 50 minutos (b)



Fonte: Autoria própria

Figura 21: Evolução da temperatura em dois pontos do para-raios



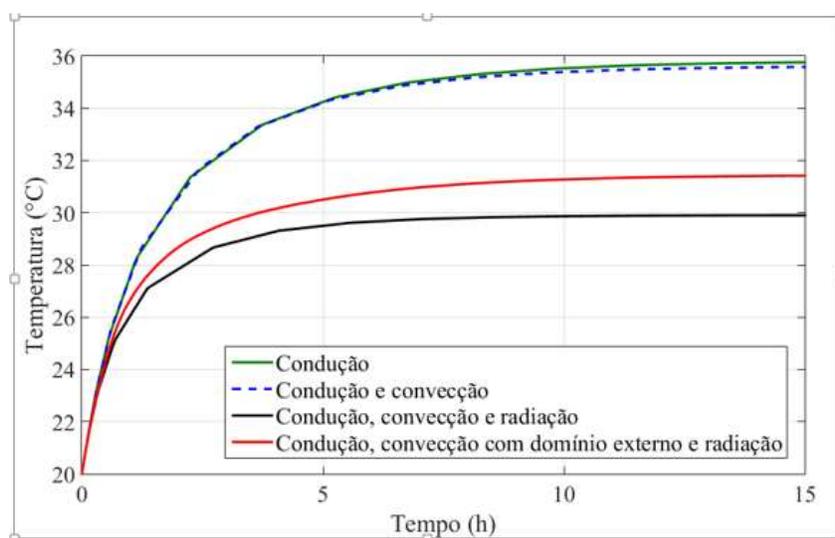
Fonte: Autoria própria

## 4.2 PARA-RAIOS CERÂMICO

### 4.2.1 UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

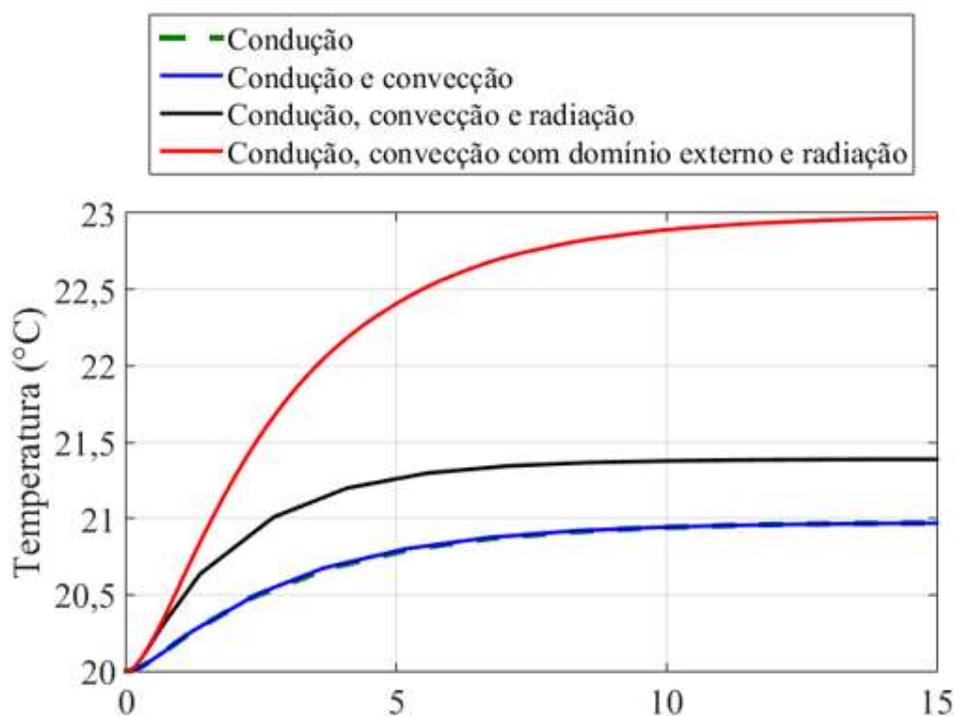
A seguir, são mostradas as evoluções no tempo das temperaturas das simulações que utilizaram diferentes mecanismos de transferência de calor. Na Figura 22 é ilustrada a evolução da temperatura na coluna de varistores, enquanto na Figura 23, a evolução da temperatura no invólucro do para-raios.

Figura 22 – Evolução da temperatura no tempo, na coluna de varistores



Fonte: Autoria própria

Figura 23 – Evolução da temperatura no tempo, no invólucro



Fonte: Autoria própria

Na tabela 2 são mostrados os tempos necessários para o processamento das simulações dos modelos de diferentes complexidades.

**Tabela 2. Tempo requerido para as simulações**

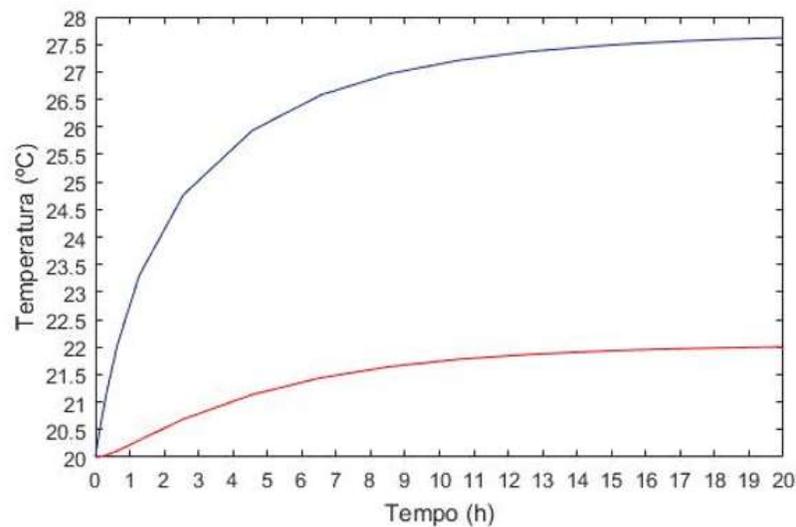
<b>Modelo simulado</b>	<b>Tempo de simulação</b>	<b>Diferença relativa (%)</b>
Condução	1 min 17 s	-76
Condução e convecção	1 min 46 s	-69
Condução, convecção e radiação	5 min 43 s	0
Condução, convecção com domínio externo e radiação	50 min 49 s	789

Fonte: Autoria própria

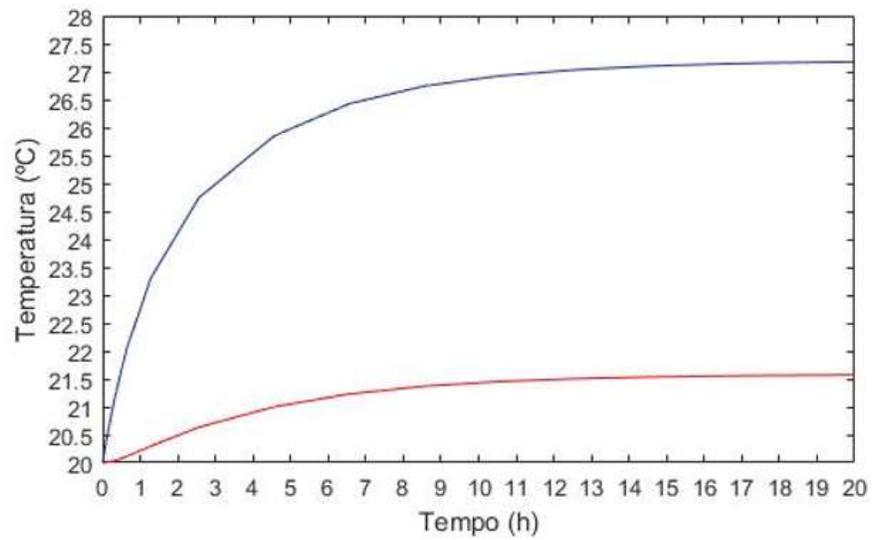
#### 4.2.2 MODELAGEM DA CONVECÇÃO: DOMÍNIO DE AR VERSUS COEFICIENTE $H$

A seguir, são mostrados os gráficos das simulações com a modelagem da convecção externa a partir de um domínio de ar (que é ilustrado na Figura 24 para o para-raios de 230 kV e na Figura 26 para o para-raios de 69 kV) e do ajuste do coeficiente de transferência de calor  $h$  (que é ilustrado na Figura 25 para o para-raios de 230 kV e na Figura 27 para o para-raios de 69 kV). Em cada gráfico é ilustrada a temperatura da coluna de varistores (em azul) e do invólucro (em vermelho). A comparação foi realizada tanto para o para-raios de 69kV quanto para o para-raios de 230kV.

Figura 24 – Resultado da simulação utilizando o domínio de ar (para-raios de 230kV)

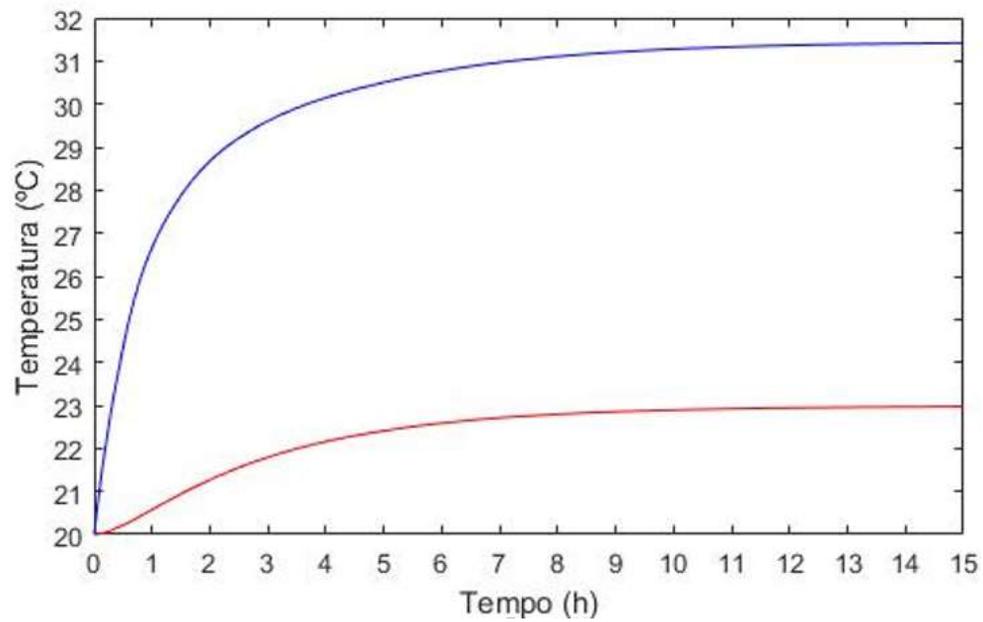


Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Resultado da simulação utilizando o coeficiente  $h$  (para-raios de 230kV)

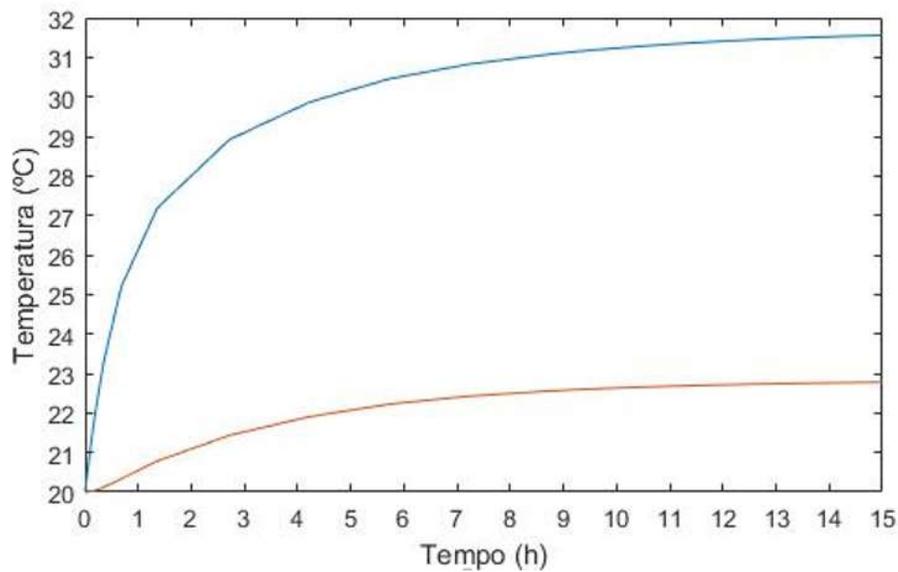
Fonte: Autoria própria

Figura 26 – Resultado da simulação utilizando o domínio de ar (para-raios de 69kV)



Fonte: Autoria própria

Figura 27 - Resultado da simulação utilizando o coeficiente  $h$  (para-raios de 69kV)



Fonte: Autoria própria

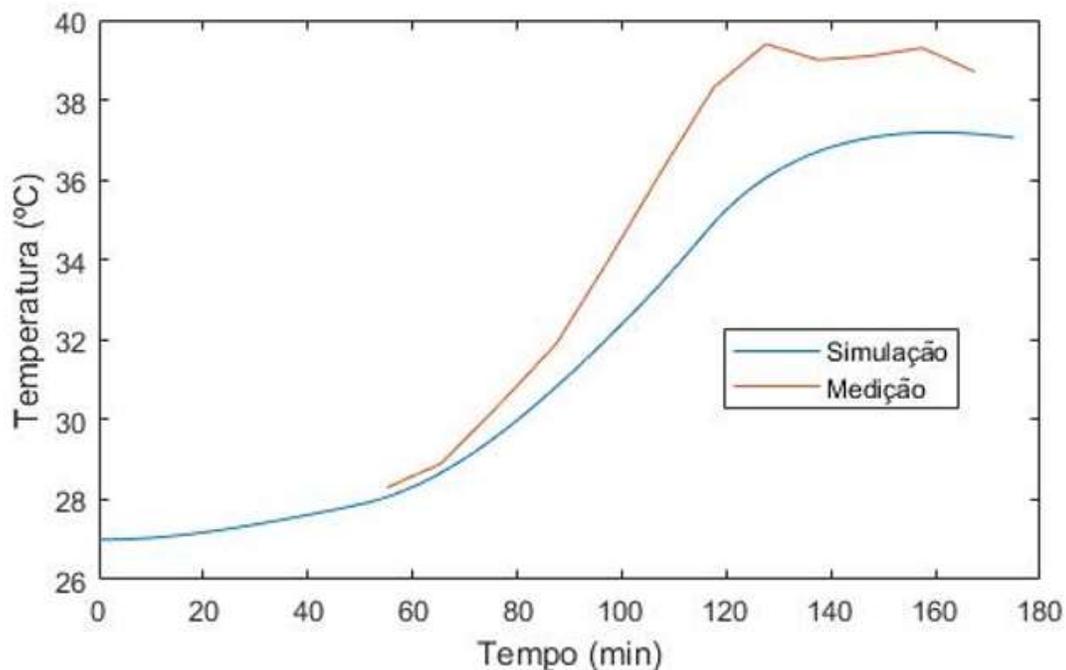
Para as simulações do para-raios de 230 kV, o caso em que foi utilizada a aproximação do coeficiente  $h$  (para o valor de 0,74), a simulação foi processada em 28 minutos e 11 segundos, enquanto a simulação que utiliza o domínio de ar necessitou de 18 minutos e 45 segundos.

Nas simulações referentes ao para-raios de 69kV, o maior esforço computacional foi necessário no caso em que foi utilizado o domínio de ar para simular a convecção externa, sendo necessário um tempo de 50 minutos e 49 segundos para seu processamento. Já o caso onde foi utilizado o coeficiente de transferência de calor  $h$  (também de valor 0,74), o tempo de processamento necessário foi de 5 minutos e 43 segundos.

#### 4.2.3 COMPARAÇÃO COM AS MEDIÇÕES

A seguir é ilustrada a comparação entre o comportamento térmico do para-raios real de 69 kV, utilizado no experimento, e a simulação do seu respectivo modelo, que emprega os 3 mecanismos de transferência de calor e modela a convecção externa a partir de um domínio de ar. Esta comparação pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Gráficos das temperaturas dos varistores no para-raios real e no modelo simulado



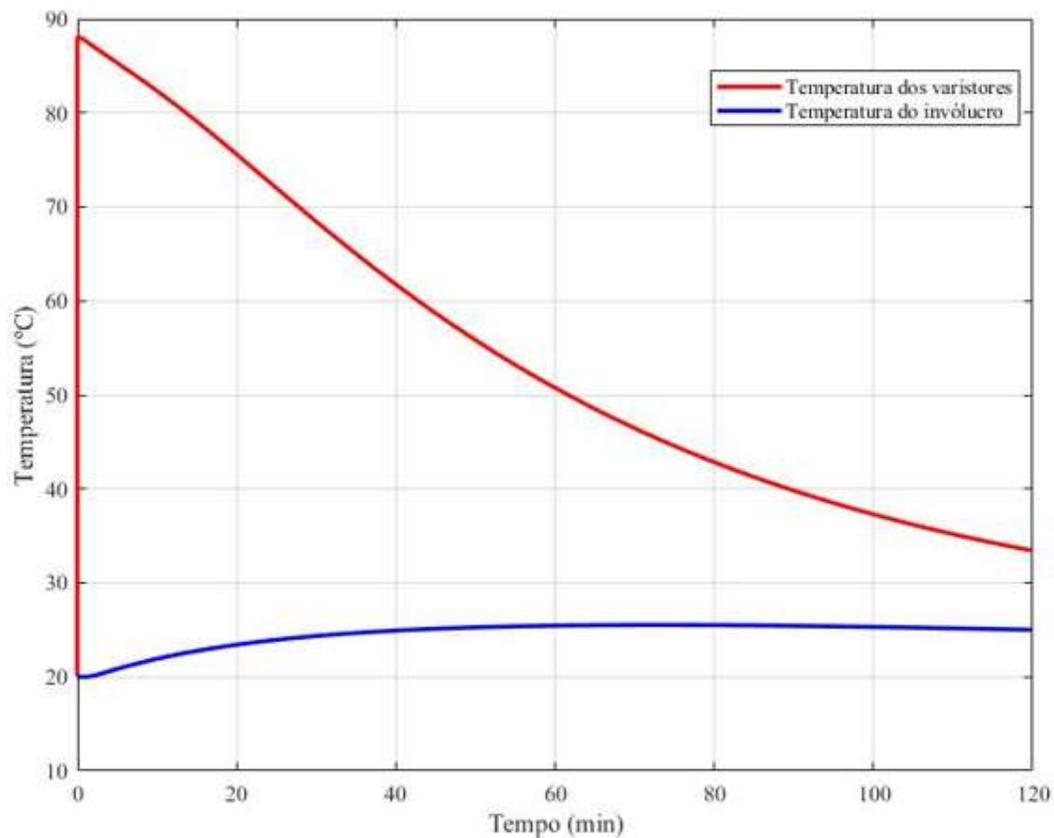
Fonte: Autoria própria

#### 4.2.4 SIMULAÇÃO DE ENTRADA DE ENERGIA IMPULSIVA

Para a simulação do impulso, a temperatura nos dois pontos analisados, no interior da coluna de varistores e no invólucro (como mostrado na Figura 19), é mostrada a seguir, sendo possível verificar um pico de aproximadamente 88°C na coluna de varistores, seguido de um resfriamento de 2 horas ao fim do qual a temperatura chega a aproximadamente 34°C. Já a temperatura do invólucro evolui até aproximadamente 25°C

e se mantém praticamente constante ao longo do processo. A resposta térmica do para-raios para a entrada de energia impulsiva pode ser observada na Figura 29.

Figura 29: Evolução da temperatura no tempo (nos pontos da Figura 19) para o impulso



Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que a radiação exerce papel preponderante na transferência de calor ao longo do *gap*. A convecção do ar interno ao para-raios tem reduzida influência, ao contrário da convecção externa, que exerce influência direta sobre a temperatura do invólucro. A determinação de um coeficiente de fluxo convectivo equivalente permite representar com maior acurácia o comportamento da convecção natural do ar externo, de modo a se obter um modelo correspondente que requeira menos esforço computacional. O modelo mais adequado, tanto do ponto de vista da representação do para-raios quanto do esforço computacional, foi o que utiliza radiação e condução no *gap* de ar e o valor calculado de fluxo de calor convectivo para a superfície externa do invólucro. Com o modelo obtido, a resposta térmica simulada a partir de um dado tipo de entrada de energia pode ser comparada com medições termográficas, de modo a se estimar a temperatura dos varistores e se realizar uma tomada de decisão acerca da retirada de operação do para-raios com invólucro cerâmico.

No que diz respeito ao esforço computacional das simulações, para o caso do para-raios de 69 kV, o modelo exige maior tempo de simulação, devido ao fato de que a física utilizada tem como entradas parâmetros elétricos (tensão, potência ou corrente) e os traduz, a partir das propriedades elétricas dos materiais e dos mecanismos de transferência de calor, em potência térmica dissipada. Isso acrescenta mais um passo no processo de modelagem, fazendo com que, ao lançar mão do domínio de ar, o tempo de convergência da simulação aumente drasticamente. Com relação ao para-raios de 230kV, a simulação foi processada com um menor esforço computacional, principalmente quando foi utilizado o domínio de ar externo, pois a física utilizada tem como dado de entrada a potência térmica diretamente na coluna de varistores, criando assim uma simplificação. Também é possível notar que, devido às diferenças geométricas, cada para-raios converge para uma temperatura diferente (mas próxima), tanto no invólucro quanto na coluna de varistores, para uma mesma potência dissipada. Não é possível realizar uma comparação direta do desempenho de cada para-raios a partir dos resultados obtidos nas simulações, pois, os dois modelos possuem especificações elétricas diferentes. Entretanto, a realização do estudo em dois tipos distintos de para-raios mostra que é possível construir um padrão de referência, principalmente no que se diz respeito a estimação do valor do

coeficiente de transferência de calor  $h$ . Dessa forma, um banco de dados que conste a resposta térmica de vários tipos de para-raios para várias condições de operação possibilita um monitoramento mais abrangente e abre a possibilidade da utilização de inteligência artificial para detecção de falhas em para-raios de óxido de zinco, a partir de casos simulados previamente.

Também foi possível verificar o comportamento térmico do para-raios submetido a um impulso, que é o mais aproximado de uma condição real de um sistema elétrico, em que o para-raios é submetido a um surto, como uma descarga atmosférica. Realizando uma comparação entre as temperaturas nos dois pontos escolhidos, é possível relacionar a temperatura externa do para-raios (invólucro), de fácil medição, com o comportamento da temperatura interna (varistores) de medição menos acessível, fazendo com que o dado obtido a partir de estudo termográfico possa ser confrontado com o simulado, para verificar se o para-raios foi capaz de se recuperar após o surto ou se deve ser substituído.

A comparação entre a medição de temperatura e a simulação do para-raios de 69 kV foi realizada graficamente. É possível constatar a semelhança entre o comportamento das curvas, porém, uma diferença nos valores de temperatura. No presente estudo, a distância entre as curvas de temperatura, da medição e da simulação, pode ser considerada como o resultado de certas aproximações que foram feitas ao se levantar o modelo, como por exemplo: a potência absorvida pelo para-raios, que foi calculada utilizando-se a equação (5); as constantes dos materiais utilizados na construção do modelo e até mesmo o calor irradiado pela parede que estava próxima ao para-raios durante a medição, que não foi levada em consideração, etc. O comportamento obtido por meio da simulação foi condizente com o de um para-raios real, dito como termicamente estável. São sugeridos estudos futuros desta linha de pesquisa sobre o modelo utilizado, a fim de se aprimorar as aproximações e obter-se uma diferença menor entre as curvas das medições e das simulações.

## REFERÊNCIAS

- [1] GUERRA, Francisco. *Distúrbios de tensão em redes elétricas*. Apostila – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- [2] COLEON, Richard – *Descargas atmosféricas em linhas de transmissão* – 2011 - <https://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-6.pdf> - acesso em: 23/10/2018.
- [3] MARCARINI, Fabiano. *Proteção contra descargas atmosféricas utilizando para-raios de óxido de zinco*. 2012. 46f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- [4] SANTOS, Sergio – *Introdução aos centelhadores* – 2017 - <http://universolambda.com.br/introducao-aos-centelhadores/> - Acesso em: 23/10/2018.
- [5] COLEON, Richard – *Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões* – 2011 - <https://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-2.pdf> - acesso em: 23/10/2018.
- [6] DA COSTA, Edson Guedes, *Análise do desempenho de para-raios de óxido de zinco*. 1999. 177f. Tese de doutorado – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.
- [7] ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A. J. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [8] GIACCHINI, B. L. *Uma Breve Introdução ao Método dos Elementos Finitos* – 2012 – [http://www.mat.ufmg.br/~rodney/notas\\_de\\_aula/elementos\\_finitos.pdf](http://www.mat.ufmg.br/~rodney/notas_de_aula/elementos_finitos.pdf) - acesso em: 07/11/2018.
- [9] ÁLVARES, Ricardo Costa, *Diagnóstico de Falhas em Para-raios Utilizando Termografia*. 2008. 119f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [10] Frei, W. *Modeling Natural and Forced Convection in COMSOL Multiphysics*, Abril 2017. Disponível em: <https://br.comsol.com/blogs/modeling-natural-and-forced-convection-in-comsol-multiphysics/>.
- [11] MENDONÇA, Luiz Viegas, *Termografia por Infravermelhos: Inspeção de Betão - 2005* - <http://www.spybuilding.com/private/admin/ficheiros/uploads/0b94a72a7148922d47af9326f7f729d5.pdf> - acesso em: 28/11/2018.