

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

LARISSA DINIZ

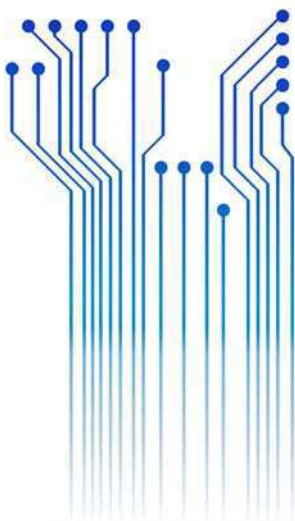


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANÁLISE DO EFEITO CORONA EM UMA CADEIA DE ISOLADORES DE
VIDRO DE 69 kV UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E
ENSAIOS EXPERIMENTAIS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

LARISSA DINIZ

ANÁLISE DO EFEITO CORONA EM UMA CADEIA DE ISOLADORES DE VIDRO DE 69 kV
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação 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: Processamento de Energia

Orientador:
Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande
2017

LARISSA DINIZ

ANÁLISE DO EFEITO CORONA EM UMA CADEIA DE ISOLADORES DE VIDRO DE 69 kV
UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação 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: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou na minha educação, e fez o necessário para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, que acima de todos e tudo tem um plano especial para mim e permite que eu seja sempre forte em meio às adversidades, e não me deixa desistir nunca.

Agradeço também à minha mãe, Clarice do Nascimento, e toda minha família, que me apoiou desde meus pequenos passos até os dias de hoje, fazendo o impossível para investir na minha educação e sempre me dando amor.

Agradeço também ao meu namorado Leonardo Albuquerque Campos Júnior e amigos, que me ajudaram em todos os momentos de desânimo e estresse, sempre com um sorriso no rosto e me dando forças.

Agradeço de modo geral ao Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande pela acolhida, bem como ao professor Edson Guedes da Costa e a todos os funcionários que me ajudaram desde o momento que decidi fazer parte dessa equipe, em especial os técnicos Higor da Costa Rocha e Jennefer Kelly Pequeno da Silva.

Meus sinceros agradecimentos a Filipe Lucena Medeiros de Andrade e ao professor Jalberth Fernandes de Araújo que me incentivaram e me direcionaram a todo instante para a concretização desse trabalho.

Enfim, agradeço a meu professor orientador Tarso Vilela Ferreira pela oportunidade de um novo aprendizado e por toda atenção dedicada a essa supervisão.

*“Será que é tempo que lhe falta pra perceber
Será que temos esse tempo pra perder
E quem quer saber
A vida é tão rara”*

Lenine.

RESUMO

Parte significativa dos desligamentos em sistemas elétricos são ocasionados por falhas em isoladores, que na maioria dos casos estão relacionadas às descargas parciais do tipo corona. A ocorrência do fenômeno corona em linhas de transmissão ocasiona perdas, interferência eletromagnética e desgaste dos materiais, além de outros danos. Há uma crescente preocupação, entre os pesquisadores, com relação ao comportamento de isoladores. Os ensaios de alta tensão que caracterizam os isoladores sob o efeito corona podem ser onerosos ou nem sempre factíveis em laboratório. Este trabalho apresenta uma análise da distribuição de campo elétrico ao longo de uma cadeia de isoladores de vidro de 69 kV, utilizando simulação, em comparação com a quantificação de fótons obtidos por meio de uma câmera capaz de mensurar a emissão ultravioleta, em ensaios experimentais. O objetivo principal é a representação do efeito corona em ambiente computacional. Para tanto, é proposta uma equação que relaciona o número de fótons e o campo elétrico.

Palavras-chave: Falha em isoladores, Efeito Corona, Simulação Computacional, Alta Tensão, Ensaios.

ABSTRACT

The majority electrical systems disconnections are caused by failures in isolators, which in most cases are related to partial discharges of the corona type. The occurrence of the corona phenomenon in transmission lines means charge losses, electromagnetic interference and material wear, besides other damages. There is a growing concern among researchers about the behavior of insulators. The high voltage tests that characterize the insulators under the corona effect can be costly or not always feasible. Therefore, this work presents an analysis of the electric field distribution along six of 69 kV insulators, using simulation, compared to a quantification of photons obtained by measures of a ultraviolet emission camera, at experimental tests. The main goal is representing corona effect in a computational environment. In addition, an equation is proposed that relates the number of photons and the electric field.

Keywords: Failures in isolators, Corona effect, Computational simulation, High Voltage, Tests.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Isolador tipo pino utilizado na linha Lauffen-Frankfurt.	17
Figura 2 – Cadeia com isoladores tipo disco e tipo bastão.....	18
Figura 3 – Isoladores poliméricos, de vidro e de porcelana (da esquerda para a direita).	19
Figura 4 – Relação entre corrente e tensão no processo de ionização.....	20
Figura 5 – Regiões de ionização.....	22
Figura 6 – <i>Layout da toolbox cftool</i>	29
Figura 7 – Arranjo experimental do braço de torre com cadeia de 69 kV	31
Figura 8 – Arranjo experimental do braço de torre com cadeia de 69 Kv.	31
Figura 9 – Mísula com cadeia isoladores de 69 kv.....	32
Figura 10– Cadeia de isoladores de vidro utilizada no experimento.....	32
Figura 11– Plataforma para suporte da câmara UV.	34
Figura 12– Fio de 10 mm na ferragem do isolador para intensificação de corona.....	34
Figura 13 – Representação gráfica do braço de torre com cadeia de 69 kV.	36
Figura 14 – Detalhe da modelagem do fio de cobre colocado para intensificar o corona no experimento em laboratório.....	36
Figura 15 – Distribuição de tensão sobre a cadeia de isoladores de 69 kV para tensão aplicada de 60 kV e corte transversal.	38
Figura 16 – Distribuição de tensão sobre a cadeia de isoladores de 69 kV para tensão aplicada de 60 kV e corte transversal.	39
Figura 17 – Distribuição de tensão ao longo do núcleo da cadeia de isoladores de 69 kV para um tensão de 60 kV de pico.....	40
Figura 18 – Distribuição de campo elétrico na cadeia de isoladore de 69 kV para um tensão aplicada de 60 kV de pico.	40
Figura 19 – Distribuição de campo elétrico na cadeia de isoladore de 69 kV para um tensão aplicada de 150 kV de pico.	41
Figura 20 – Caminho escolhido para análise da ocorrência de corona.	41
Figura 21 – Gráfico de decaimento do campo elétrico.....	42
Figura 22– Valores do campo elétrico médio entorno do ponto analisado e valor do campo elétrico para disrupção, segundo Townsend.	43
Figura 23– Número de ftons medidos pelo monitoramento com câmara UV por tensão aplicada.....	43
Figura 24– Resultados da simulação computacional e do ensaio experimental sobrepostos.	44
Figura 25– Curva para o modelo polinomial de grau 2.....	44
Figura 26 – Curva para o modelo polinomial de grau 3.....	45
Figura 27 – Resíduo para o modelo polinomial de grau 1.	46
Figura 28 Resíduo para o modelo exponencial de 1 termo.	47
Figura 29 – Resíduo para o modelo polinomial de grau 1.	47
Figura 30– Resíduo para o modelo exponencial de 1 termo.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetro de <i>goodness of fit</i> para as curvas traçadas.....	45
Tabela 2– Características dos modelos exponencial grau 4 e exponencial de 2 termos.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
FEMLAB	<i>Finite Element Method Laboratory</i>
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
MEF	Método dos Elementos Finitos
ONS	Operador Nacional de Sistemas Elétricos
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SSE	<i>Sum of Squares of the Error</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos.....	16
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	Fundamentação Teórica.....	16
2.1	Isoladores	17
2.2	Descargas Corona	20
2.2.1	Mecanismo de Formação de Corona	20
2.2.2	Predição	23
2.2.3	Consequências do Efeito Corona.....	24
2.4.1	COMSOL®	26
2.4.2	MATLAB®	27
2.5.1	Relacionando o Número de Fótons ao Campo Elétrico.....	30
3	Metodologia.....	31
3.1	O Arranjo Experimental.....	32
3.2	Simulação Computacional	36
4	Resultados	38
4.1	Simulação Computacional	39
4.2	Ensaio Experimental	44
4.3	Comparação entre Simulação e Ensaio	45
5	Conclusões.....	50
	Referências	51

1 INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de proporções continentais, fortemente acoplado e com grande intervenção estatal, como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, pode ter sua perfeita operacionalidade ameaçada por diversos fatores, sejam climatológicos, contingências técnicas, variações severas de consumo, além do cenário político e econômico.

Dessa forma, o Operador Nacional de Sistemas Elétricos (ONS) junto com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) buscam desenvolver projetos para aprimorar a operação de sistemas elétricos nos segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, tanto no SIN quanto em sistemas isolados. Os órgãos reguladores e as empresas concessionárias têm como um objetivo primordial minimizar as perdas e as interrupções não programadas no fornecimento da energia.

Um dos principais causadores de interrupção na transmissão de energia elétrica são as falhas nos isolamentos. De acordo com NIGRI (1999), pode-se associar o desempenho das instalações diretamente com o desempenho dos isolamentos. Para o caso dos sistemas de transmissão e distribuição, o isolamento elétrico é realizado principalmente pelos isoladores.

Embora, os isoladores polimérico estejam ganhando espaço na aplicação em linhas de transmissão, os isoladores cerâmicos (vidro e de porcelana) ainda são bastante empregados na rede elétrica (FERREIRA, 2011). Além do mais, os métodos de diagnóstico de falhas, associadas a cargas disruptivas, são mais difundidos para os isoladores de vidro e porcelana (MARTINS, 2015). Nesse contexto, diversos trabalhos buscam minimizar a ação de descargas do tipo corona aos isoladores de vidro.

O efeito corona são descargas elétricas parciais que ocorrem devido à ionização do ar, caracterizadas por ruído audível e efeito visual, e que em longo prazo podem trazer danos às instalações elétricas. Portanto, grupos de pesquisa relacionados à eletrotécnica têm demonstrado interesse em estudos que caracterizam o comportamento dos isoladores em operação, submetidos à intenso campo elétrico, com intuito de reduzir as interferências nocivas do efeito corona aos componentes e funcionamento de linhas de transmissão.

A sociedade atual, ao passo que se torna cada vez mais dependente de aparelhos eletroeletrônicos, torna-se também mais dependente de energia elétrica. A ANEEL regulamenta como requisitos básicos de operação de sistemas elétricos: eficiência energética, qualidade de energia, frequência e continuidade do sistema.

Dessa forma, as interrupções do fornecimento de energia são indesejáveis a todos segmentos da sociedade. As consequências atingem tanto as empresas concessionárias, que pagam multas por desligamentos não programados, como também acarretam em prejuízos financeiros e funcionais para as unidades consumidoras.

Falhas em isoladores são frequentemente causadoras de perda de continuidade no fornecimento. Assim, as concessionárias de energia têm procurado investir em manutenções preditivas com o objetivo de diminuir as interrupções não programadas. Segundo Martins (2015), o rompimento do material dielétrico provoca um curto-circuito na linha de transmissão, e se a falha não for logo identificada pelo sistema de proteção, o isolador o qual apresentou o defeito permanecerá na linha ocasionando perdas elétricas e até mesmo riscos de acidentes para humanos.

De forma geral, falhas elétricas em isoladores são antecipadas por atividade do efeito corona. Segundo Ferreira (2007) essa atividade se inicia quando a energia do campo elétrico, produzida por um eletrodo energizado, se torna superior a energia de ionização do meio gasoso isolante.

Nos isoladores, o efeito corona pode ser ocasionado devido à várias razões (bem como combinações entre elas): falha na geometria dos equipamentos, condições climáticas atmosféricas ou devido ao estado da superfície dos condutores. Contudo a ocorrência desse fenômeno é caracterizada por uma concentração intensa de campo elétrico.

Conforme o nível de tensão das linhas de transmissão aumenta, maior também será a probabilidade de grandes concentrações de campo elétrico e, portanto, da ocorrência de efeito corona e dos potenciais danos associados a ele. A análise do comportamento dos isoladores submetidos à elevadas concentrações de campo elétrico pode ser obtida por meio de ensaios de alta tensão. No entanto, a realização desses testes nos laboratórios de alta tensão costuma ser onerosa e demandar períodos relativamente longos na execução de montagens e pré-testes. Desta forma, as simulações computacionais apresentam-se ferramenta auxiliar atrativa na análise do comportamento de isoladores submetidos à condições adversas.

Esse trabalho tem como objetivo geral propor uma equação que relacione o campo elétrico e o número de fótons em uma cadeia de isoladores de vidro tipo disco.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- i. Simular e avaliar o comportamento de uma cadeia isoladores de vidro de 69 kV em ambiente computacional;
- ii. Realizar ensaios experimentais monitorados por meio de uma câmera UV;
- iii. Contribuir para a obtenção de uma forma mais acessível de diagnóstico de cadeias de isoladores, permitindo a predição do surgimento do efeito corona em linhas de transmissão por meio de avaliações computacionais.

Na Fundamentação Teórica do trabalho, Capítulo 2, é apresentada uma descrição acerca de isoladores de alta tensão, o conceito de efeito corona e suas consequências nas linhas de transmissão e a predição para formação desse fenômeno proposta por Townsend. Também é descrito o Método dos Elementos Finitos (MEF) e os softwares utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

No Capítulo 3 é introduzida a metodologia empregada para analisar o comportamento da cadeia de isoladores de vidro de 69 kV no ambiente computacional COMSOL, bem como o material utilizado e os métodos usados nos testes em laboratório. No final da seção é apresentado ainda uma *toolbox* do MATLAB utilizada no tratamento dos resultados.

Em seguida, o Capítulo 4 consiste nos resultados e análises das simulações com o isolador, comparando e relacionando com os dados obtidos por meio de ensaios de alta tensão. Por fim, as conclusões dessa pesquisa e possíveis trabalhos futuros são expostos no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados fundamentos sobre temas necessários ao entendimento do trabalho proposto, tais como isoladores elétricos; efeito corona; MEF, e os softwares utilizados no trabalho: COMSOL Multiphysics e MATLAB.

As formas pelas quais é possível prover isolamento são: os espaçamentos no ar, os isolamentos sólidos, por meio de imersão em líquido isolante, utilizando hexafluoreto de enxofre (SF_6) e através do vácuo (GUERRA, 2010). Os isolamentos podem, ainda, ser classificados de acordo com sua característica de regeneração.

Os isolamentos não regenerativos não possuem a capacidade de recuperação de sua rigidez dielétrica após a ocorrência de uma descarga causada pela aplicação de uma tensão de ensaio (FURNAS, 1985). Enquanto que os isolamentos classificados como autorregenerativos recuperam sua rigidez dielétrica, após sofrerem uma descarga. Segundo FURNAS (1985), numa subestação os isolamentos autorregenerativos podem fazer parte da constituição dos equipamentos ou podem se referir a instalação propriamente dita de um equipamento, que é o caso da cadeia de isoladores, por exemplo.

No que diz respeito às linhas de transmissão, a isolação ocorre por meio do ar atmosférico e por isoladores. De fato, a função do sistema de isolamento para a rede elétrica é segregar áreas com diferentes níveis de tensão, seja entre partes energizadas ou entre a parte energizada e a terra (GUEDES, 2015).

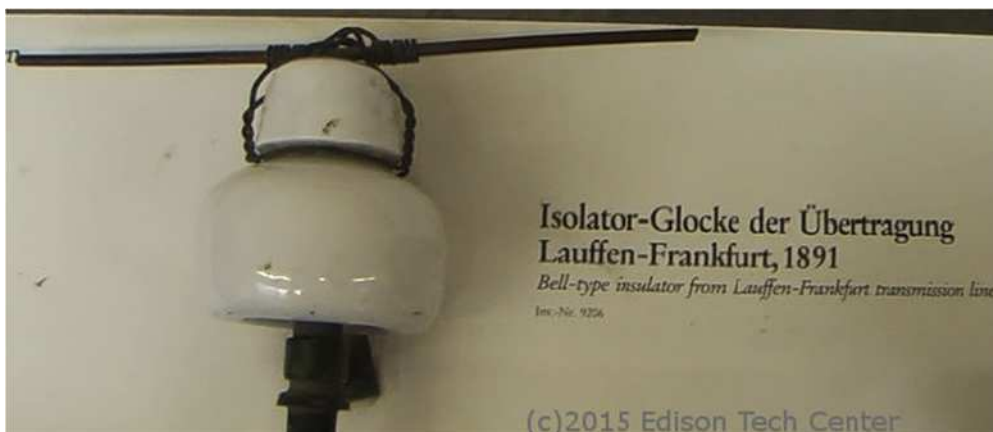
Os isoladores são dispositivos responsáveis pelo isolamento elétrico entre dois condutores, cujo os potenciais elétricos são distintos, evitando uma circulação indesejada de corrente (FERREIRA, 2007), bem como desempenham o papel de suporte mecânico dos condutores nas linhas de transmissão.

O material empregado nos sistemas de isolamento primordiais eram estacas de madeiras, que embora seja um material considerado isolante, não funcionavam de forma eficiente conforme as distâncias das linhas de transmissão aumentavam e conseqüentemente os níveis de tensão utilizados. Além disso, a madeira tende a absorver a umidade ambiente e se carboniza a temperaturas relativamente baixas.

Em meados de 1840, os primeiros isoladores foram fabricados no Reino Unido, por empresas especializadas em cerâmica, a exemplo da *Denby Retail Ltd* (FERREIRA, 2011). A empresa Oerlikon fabricou isoladores para a linha Lauffen-Frankfurt em 1891,

tornando-se um marco por ser efetivamente a primeira linha de longa distância trifásica AC (DELAIR, 2015). Na Figura 1, pode-se observar um isolador pertencente a linha Lauffen-Frankfurt.

Figura 1 – Isolador tipo pino utilizado na linha Lauffen-Frankfurt.



Fonte: (Edson Tech Center, 2015).

Segundo Protzek (2010):

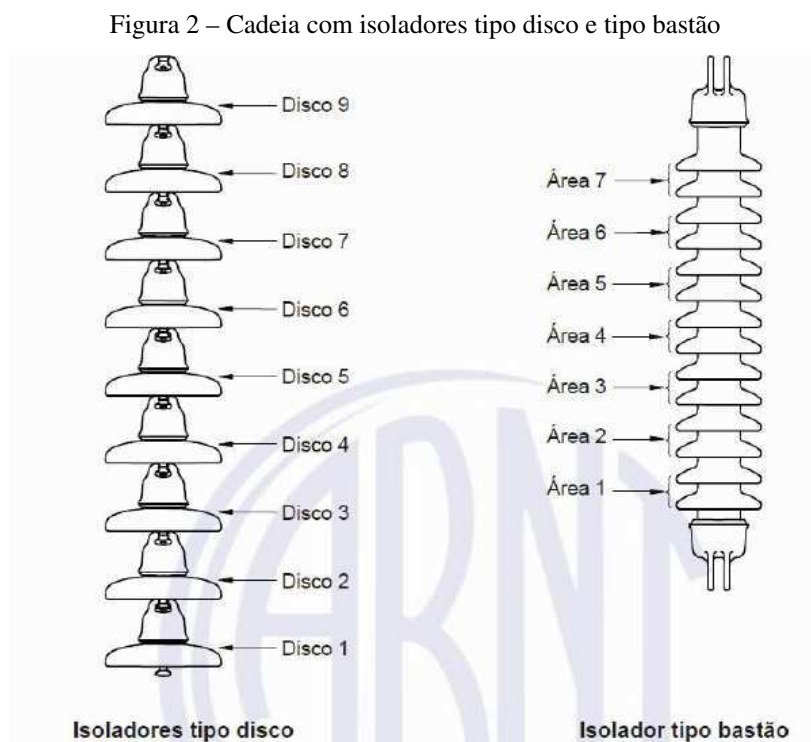
No Brasil, o grande precursor dos isoladores foi o Barão de Capanema [...], engenheiro-físico de origem austríaca, responsável pela instalação da primeira linha telegráfica do país e por “inventar um isolador mais apropriado e resistente ao clima e a umidade brasileira.

Capanema criou um isolador que utilizava vidro, ebonite e porcelana, mas que não continha partes metálicas, o qual foi patenteado em 1873. De modo geral, os telégrafos contribuíram de fato para o desenvolvimento dos isoladores.

Portanto, os isoladores devem ser capazes de atender solicitações de natureza elétrica, como o caso das tensões de operação; as sobretensões atmosféricas; e os surtos de sobretensão de manobra. Ademais, os isoladores devem apresentar resistência suficiente para suportar os esforços mecânicos ocasionados pela ação dos ventos e consequentemente eventuais vibrações, o peso dos cabos e de outros equipamentos, e outros efeitos provenientes de poluição, temperatura e ação de vândalos.

Comumente, os isoladores são classificados de acordo com o material empregado ou quanto ao tipo de construção. A classificação relacionada à forma do isolador ou construção deve ser levada em consideração, uma vez que a utilização de uma forma construtiva é adequada para um determinado função, a qual o equipamento será

empregado. Um exemplo é a classificação mecânica, pois determinadas aplicações tendem a impor maiores solicitações mecânicas que outras, como por exemplo ancoragem e suspensão, respectivamente. Na Figura 2 pode-se observar dois tipos construtivos de isoladores.



Fonte: (ABNT IEC/TS 60815-1, 2015)

No que diz respeito ao material, os isoladores podem ser de porcelana, vidro temperado ou material polimérico. A porcelana concede alta resistência mecânica aos isoladores fabricados com este material, além do mais apresenta baixa porosidade. Geralmente sua superfície externa é composta por uma camada de porcelana vitrificada.

Por outro lado, os isoladores de vidro temperado oferecem alta rigidez dielétrica e baixo fator de dissipação. Tais dispositivos são uma mistura de diversos óxidos fundidos, porém são bastante homogêneos e transparentes o que consiste numa vantagem para o controle de inspeção (COSTA, 2009).

Os isoladores poliméricos são em geral fabricados com borracha de silicone (SIR), resinas epóxi e a borracha de etileno propileno (EPDM), o polietileno de alta densidade (HDPE) também pode ser empregado. Esse tipo de isolador é mais resistente ao vandalismo, uma vez que constituídos por um material inquebrantável, apresentam maior durabilidade, e concedem considerável resistência à choques mecânicos. Porém, o diagnóstico de isoladores poliméricos costuma ser mais complexo que no caso de

isoladores cerâmicos, e mesmo sua resistência a atividade corona intensa ainda é alvo de estudos.

Na Figura 3 são apresentados três isoladores. O da esquerda, um isolador polimérico tipo line post. Na direita, dois isoladores de pino: um de vidro e outro de porcelana.

Figura 3 – Isoladores poliméricos, de vidro e de porcelana (da esquerda para a direita).



Fonte: autoria própria.

De acordo com a IEC 60270, as descargas elétricas localizadas que estabelecem parcialmente curto-circuitos do isolamento, podendo ou não ocorrer adjacente ao condutor, são caracterizadas como descargas parciais. As descargas corona são uma forma de descargas parciais que ocorrem apenas em meio gasoso.

Segundo Gianelli, o efeito corona apresenta atividade luminosa na faixa do comprimento de onda ultravioleta, especificamente, com picos entre 340 nm e 380 nm (GIANELLI, 2008).

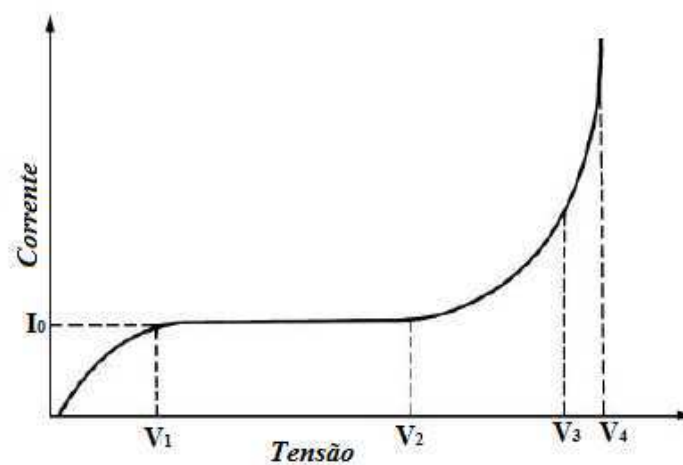
Por muitas vezes, as descargas parciais são uma consequência de estresse elétrico local na superfície dos isoladores provocando uma intensa concentração de campo elétrico ao redor dos condutores. Nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTTP) os gases são isolantes, porém a alta concentração de campo elétrico nos eletrodos, que também pode ser ocasionada pelo estresse mecânico devido às cargas espaciais, ioniza as partículas de ar. Diante dessa situação, se as solicitações elétricas forem superiores a rigidez dielétrica do ar, aproximadamente de 30 kV/cm, pontos luminosos e ruído audível se estabelecem, caracterizando o efeito corona. É importante ressaltar que as solicitações não são suficientes para formação de arco elétrico, pois de fato as descargas corona são um estágio anterior a ruptura.

2.2.1 MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CORONA

Segundo Goldman (1982), o processo de formação de Corona pode ser explicado com base na explicação de Townsend para o surgimento da avalanche de elétrons quando aplicado um campo elétrico.

Na Figura 4 pode ser observado o comportamento da corrente em relação às variações de tensão aplicada, durante o processo de ionização do gás confinado entre dois eletrodos energizados.

Figura 4 – Relação entre corrente e tensão no processo de ionização.



Fonte: (SOUZA, 2009).

Na região entre a origem e a tensão V_1 a corrente cresce praticamente de forma proporcional em relação à tensão aplicada aos eletrodos até atingir certa estabilidade de valor i_0 , essa corrente é decorrente dos elétrons livres no ar os quais foram resultados da ionização de moléculas neutras por fótons de radiação cósmica ou UV.

Em seguida o número de recombinações passa a ser mínimo, praticamente todos os elétrons que deixam o anodo chegam ao catodo, por isso observa-se que ainda que a tensão aplicada aumente de V_1 para V_2 , a corrente permanece constante com valor i_0 .

A região entre V_2 e V_3 é caracterizada pela Descarga de Townsend, em que várias colisões ocorrem entre as partículas do gás. Quando essas colisões passam a ser elásticas, ou seja, a energia cinética liberada nesse processo é suficiente para que na colisão com as partículas neutras ocorra ionização, a molécula neutra libera um elétron tornando-se um íon positivo. Em consequência, os elétrons são acelerados e prosseguem repetindo o processo em outras partículas (ionização por colisão). Observa-se que nessa região, há

um crescimento exponencial da corrente até a ruptura do meio dielétrico, caracterizando uma descarga elétrica.

A corrente de ionização pode ser descrita pela Equação 1, de acordo com Townsend:

$$I = I_0 e^{\alpha d}, \quad (1)$$

em que: I representa a corrente de ionização [A]; I_0 representa a corrente inicial que deixa o cátodo [A]; d representa a distância entre o cátodo e o ânodo [cm]; α representa o coeficiente de ionização de Townsend.

O coeficiente de ionização de Townsend corresponde ao número de colisões produzidas por um único elétron, por unidade de comprimento, que se move na direção do campo elétrico.

De fato, o coeficiente de ionização efetivo (α') considera o número de elétrons que são captados ao longo do caminho de um elétron na direção do campo por unidade de comprimento, o coeficiente de *attachement* (η), como evidencia a Equação 2,

$$\alpha' = \alpha - \eta. \quad (2)$$

No entanto, para tensões maiores que V_3 a equação de corrente de ionização que foi descrita anteriormente não pode ser aplicada, uma vez que é observado um crescimento ágil da corrente. Portanto, a região de V_3 a V_4 é descrita por um mecanismo secundário de ionização em decorrência do bombardeamento de íons positivos, pelos átomos neutro excitados ou fótons. Logo, a corrente nessa região é descrita conforme a Equação 3:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \cdot [A] \quad (3)$$

A inserção desse segundo Coeficiente de Townsend (γ) é resultado do processo de realimentação de elétron responsável pela sustentação da descarga na região de ionização.

Observa-se que quando denominador da Equação 3 tende a zero, há uma indeterminação da equação que é caracterizada pelo início da descarga corona autossustentada.

No entanto, quando os campos não são uniformes o mecanismo de ionização descrito por Townsend sofre influência das cargas espaciais, devido a assimetria dessas cargas as colisões são mais intensas na região mais próximas dos eletrodos (SOUZA, 2009).

Nesse contexto, o espaço entre os eletrodos pode ser dividido em três regiões de ionização, de acordo com o comportamento do campo elétrico, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Regiões de ionização.



Fonte: (SOUZA, 2009)

A Região de Brilho, como pode ser visto, encontra-se próximo ao eletrodo ativo onde o ar está mais ionizável. Enquanto que na Região Deriva não ocorre ionização, uma vez que o campo elétrico não é suficiente para acelerar os elétrons. O restante do espaço é chamado de Região de Carga Livre, no qual o campo elétrico possui baixa intensidade e pouco influencia a carga.

Portanto, Leman (2016) afirma que a formação de corona pode ser estimada de acordo com a Equação 4, para campos não uniformes:

$$\psi = 1 - \gamma \left(e^{\int_{d_0}^{d_i} (\alpha - \eta) dx} \right), \quad \begin{cases} \psi \leq 0 & \text{descarga se sustenta;} \\ \psi > 0 & \text{descarga não se autosustenta.} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 PREDIÇÃO

O campo elétrico para formação de corona pode ser previsto de acordo com Townsend, que estima que a Região de Brilho é limitada pela linha de campo elétrico que alcança valores de campo elétrico em torno de 30 kV/cm. Dessa forma o campo elétrico na superfície (E_c) de uma linha de raio a , pode ser expresso com relação a um campo (E) a um raio de distância (r):

$$\frac{E}{E_c} = \frac{a}{r} \quad (5)$$

Assim, para o limite da Região de Brilho considera-se que o campo E_c é 30 kV/cm e o raio da região de ionização (r_i) e o campo médio E_{med} no envelope do corona podem ser expressos como:

$$r_i = \frac{E_c a}{30}, \quad [cm] \quad (6)$$

$$E_{med} = \frac{E_c + 30}{2}. \quad \left[\frac{kV}{cm} \right] \quad (7)$$

Portanto, é possível obter uma formulação empírica de Townsend para o campo elétrico disruptivo, conforme a Equação 8:

$$E_s = 30 + \frac{1,35}{d}. \quad \left[\frac{kV}{cm} \right] \quad (8)$$

Observa-se que d corresponde ao comprimento do *gap* entre os eletrodos, se for considerado que a disrupção ocorre na região de ionização $d = r_i - a$ e o campo médio de envelope de corona será o mesmo disruptivo, $E_{med} = E_c$, então o campo elétrico crítico é expresso como:

$$E_c = 30 + \frac{9}{\sqrt{a}} \cdot \left[\frac{kV}{cm} \right] \quad (9)$$

2.2.3 CONSEQUÊNCIAS DO EFEITO CORONA

A nomenclatura do efeito está relacionada com o surgimento dos pontos luminosos que formam uma espécie de coroa (do inglês *corona*). Os ruídos audíveis também caracterizam atividade corona, que podem atingir até 65 dB a uma distância de 30 metros da fonte do efeito (SILVA, 2012).

Na verdade, há uma vasta série de consequências desse efeito. Durante o processo de formação, observa-se excitação das moléculas de nitrogênio, responsável pela emissão UV (GIANELLI, 2008). Além do mais, acompanhado à ionização das partículas de ar, ocorre também formação de novos gases corrosivos, como o ozônio. Esses gases podem ser prejudiciais à saúde humana e agredem a estrutura física dos equipamentos, não apenas as partes metálicas, mas principalmente os isolamentos poliméricos.

Não obstante, a formação de corona ocasiona interferências eletromagnéticas em sistemas de comunicação, controle e medição. Há também formação de erosão mecânica nos componentes e sobretudo considerável perda de energia para o sistema (BARROS, 2011).

Assim, é justificável a importância de pesquisas voltadas para área de diagnóstico e detecção dos isoladores sob condições de efeito corona, uma vez que a vida útil dos isoladores é reduzida, e logo o nível de isolamento dos sistemas elétricos também são efetivamente afetados.

A maioria das pesquisas que investigam o efeito coronas nos isoladores elétricos empregam ensaios de alta tensão. Uma nova vertente de pesquisadores busca introduzir o uso das ferramentas computacionais como auxílio nesses estudos. Em geral, os softwares que proporcionam análises de campo elétrico em isoladores se baseiam no Método dos Elementos Finitos.

O conceito de análise de elementos finitos surgiu por volta de 1930 e foi inicialmente desenvolvido para cálculos manuais de estruturas mecânicas. Essa tecnologia de análise para elementos finitos se desenvolveu rapidamente já desde de 1950, porém o termo “elemento finito” apenas foi empregado em 1960 por Clough. No entanto, foi só

em 1967 que o Método dos Elementos Finitos (MEF) passou a ser empregado para a área de eletromagnetismo, quando Wislow calculou um campo magnético a partir do método (ZHOU, 1993). No ano seguinte, Silvester e Ferranti publicaram o livro *Finite Elements for Electrical Engineers*, que aplicava o método para problemas de eletromagnetismo (SADIKU, 1989).

Até os anos 70, o método estava limitado aos caros computadores do tipo *mainframe*, que em geral pertenciam às indústrias aeronáuticas, nucleares e automotivas. Após os anos 70, o MEF teve um grande avanço, devido a popularização do conceito de computador pessoal. Zeinkiewicz e Cheung tiveram participação nesta ampliação da aplicação do método ao publicar um trabalho em que o aplicaram a problemas descritos pelas equações de Laplace e Poisson (BARGALLO, 2006).

Com o avanço das ferramentas computacionais, bem como a redução dos custos, o método tornou-se cada vez mais popular não apenas na esfera dos projetistas, responsáveis por programar e desenvolver *softwares* em que são baseados no MEF, mas também por todos aqueles que trabalham com programas como o FEMM, FEMLAB e o COMSOL Multiphysics, que possuem uma interface intuitiva. Dessa forma, houve uma intensa expansão no campo de aplicações, que atualmente englobam áreas como: estruturas mecânicas e de solo, escoamento de fluidos, transferência de calor, campos elétricos e magnéticos, ótica, fotônica, dentre outros. Além da versatilidade desse método, Ferreira ainda ressalta o fato do MEF diminuir os custos dos projetos, uma vez que aplicado a simulações de fenômenos físicos e seus efeitos poderá auxiliar na concepção de equipamentos (FERREIRA, 2007).

A ideia básica do FEM baseia-se na divisão do domínio da solução de um problema em números menores de regiões interconectadas, que são chamadas de “elementos” (ZHOU, 1993).

De acordo com Sadiku (1989) a solução de um problema utilizando MEF envolve quatro etapas, porém Ferreira (2007) acrescenta uma etapa relacionada ao uso prático do método. Os passos são descritos a seguir:

- i. Discretização: representação do domínio a ser solucionado em elementos finitos, essas sub-regiões são em geral geometrias simples que não se sobrepõe umas às outras, mas que os pontos comuns são chamados de nós os quais serão os valores a serem calculados.

- ii. Equacionamento: obtenção de um modelo que melhor descreva o fenômeno físico envolvido em equações, em geral são usadas as Leis de Hooke ou as Equações de Fourier e Poisson. Devem ser construídas uma matriz de coeficientes para cada elemento e em seguida equações matriciais, que representam as variações dos valores de cada nó.
- iii. Construção de uma matriz global: as matrizes de coeficientes de cada nó deverão originar uma matriz global que conecta todos os elementos em um domínio. Essa matriz global deve ser esparsa, simétrica e ter tamanho $N \times N$, o qual N é o número de nós envolvidos. A partir dessa matriz global, obtém-se um sistema de X equações, em que X corresponde a quantidade de graus de liberdade que os nós possuem.
- iv. Solução do sistema de equações: embora em problemas simples o sistema possui poucas equações, esses sistemas apresentam mais incógnitas do que equações impossibilitando a resolução. Portanto, devem ser empregadas as soluções de contorno que fornecem valores conhecidos e constantes para alguns nós, simplificando a solução para métodos convencionais. Os resultados obtidos indicam os valores numéricos de cada grau de liberdade para cada nó.
- v. Visualização: quando o MEF é aplicado nos softwares, é interessante que tais programas apresentem opções para que o usuário possa visualizar e consultar os valores numéricos dos resultados do caso analisado. Por exemplo, em problemas de campos magnéticos, provavelmente a intensidade de campo, força e outros parâmetro como indutância e capacitância serão de interesse do usuário.

Por fim, é importante destacar a importância de um refinamento da malha do objeto discretizado. Em geral, observa-se que uma representação com um nível ótimo de elementos implica em uma solução mais próxima da realidade, o que não pode ser confundido com um exagero da quantidade desses elementos, que outrora poderá acrescentar muitos erros por arredondamento e reduzir a precisão do resultado (FERREIRA, 2007).

2.4.1 COMSOL®

O software COMSOL *Multiphysics*®¹ (2017) é uma ferramenta computacional com multipropósito baseado no MEF para modelar, simular e solucionar problemas de diversas áreas envolvendo fenômenos físicos.

O COMSOL permite que o usuário construa ou importe os modelos de objetos em estudo, como a modelagem de uma cadeia de isoladores. Além do mais o software apresenta uma opção de física, *Eletrostatics Fields*, que possibilita a análise de distribuição de potencial e campo elétrico ao longo do objeto. Contudo o grande diferencial desse software consiste na facilidade em atribuir os valores às grandezas físicas sem a necessidade do emprego das equações dos MEF.

2.4.2 MATLAB®

O MATLAB®² é um software desenvolvido para cálculos matriciais (MATLAB é um acrônimo de *MATrix LABORatory*), bastante empregado no meio acadêmico e também industrial. Esse software realiza desde cálculos matemáticos simples a processamento de sinais, permite a criação de gráficos, análises de dados e otimização de funções que podem ser aplicados em diversas áreas da engenharia.

O ambiente desse programa oferece ainda uma biblioteca vasta de *toolboxes*, as quais podem já estar contidas ou que podem ser instaladas separadamente. Essas caixas de ferramentas consistem em rotinas pré-construídas, com uma interface, para a análise de específicos domínios. O *toolbox Curve Fitting Tool*™³ (*cftool*), por exemplo, possibilita o ajuste de curvas utilizando diferentes métodos de aproximação.

Por muitas vezes é desejável relacionar fisicamente um fenômeno a outro, de modo a analisar o comportamento de uma variável atrelada a outra. No entanto, há muitas situações em que obtém-se dados de forma experimental, a partir da aplicação de uma variável, e deseja-se buscar uma expressão analítica que melhor se adeque a esse conjunto de pontos.

Embora o ajuste da curva pode ser obtido por meio de uma forma polinomial interpoladora dos pontos fornecidos, existe a possibilidade de obter uma curva que melhor se ajusta a estes pontos levando em consideração a presença de erros (PEDROSA, 2011).

¹ O COMSOL *Multiphysics* é uma marca registrada de COMSOL, Inc.

² O MATLAB é uma marca registrada de MathWorks, Inc.

³ A Curve Fitting Toolbox é uma marca comercial da MathWorks, Inc.

Dessa forma, ao invés de buscar uma função que passe por todos os pontos, é possível estimar uma função aproximante, que seja mais próximo possível dos pontos.

O ajuste de curvas por meio do Método dos Mínimos Quadrados considera que as variáveis podem estar associadas à erros experimentais e à outras variáveis que se modificam ao longo do experimento. (BARROSO, 1987).

A partir do Método dos Mínimos Quadrados é possível avaliar a qualidade do ajuste por meio do coeficiente R^2 , que corresponde a uma medida de proporção da variação total dos dados em torno da média. De fato, esse coeficiente representa a soma dos quadrados dos desvios de cada ponto da curva com o ponto dos dados ()

O MATLAB®, em sua edição 2016, apresenta uma *toolbox* que fornece funções para ajustar curvas e superfícies aos dados. O *cftool* permite não apenas o ajuste das curvas, mas também permite que o usuário selecione ou crie novos modelos lineares ou não que melhor se adequem aos seus dados, e ainda apresenta parâmetros para análise do melhor candidato.

O processo de ajuste de curvas segue as seguintes etapas:

- i. Importação ou inserção dos dados ao MATLAB;
- ii. Escolha das variáveis aos respectivos eixos no *cftool*;
- iii. Escolha do ajuste da curva e respectivo degrau da equação;
- iv. Análise das curvas.

A análise das curvas vai além do critério visual, em que o usuário pode verificar se a curva se adequa aos dados, o *cftool* apresenta três métodos para análise dos candidatos ao melhor modelo.

Os parâmetros estatísticos de *goodness of fit* (desempenho do ajuste) corresponde a valores numéricos que identificam qual a relação entre o modelo e os dados. De acordo com Coster (2016) esses parâmetros são definidos como:

- R-Quadrado, que corresponde ao quadrado da correlação entre os valores de resposta e os valores de resposta, sendo 1 o valor ideal;
- R-Quadrado ajustado, cujo valor considera o grau de liberdade do erro;
- Soma dos quadrados dos erros (*Sum of Squares of the Error*, SSE) que mede o desvio total entre os valores de resposta do ajuste e a resposta dos dados. Quanto mais próximo de 0 melhor;

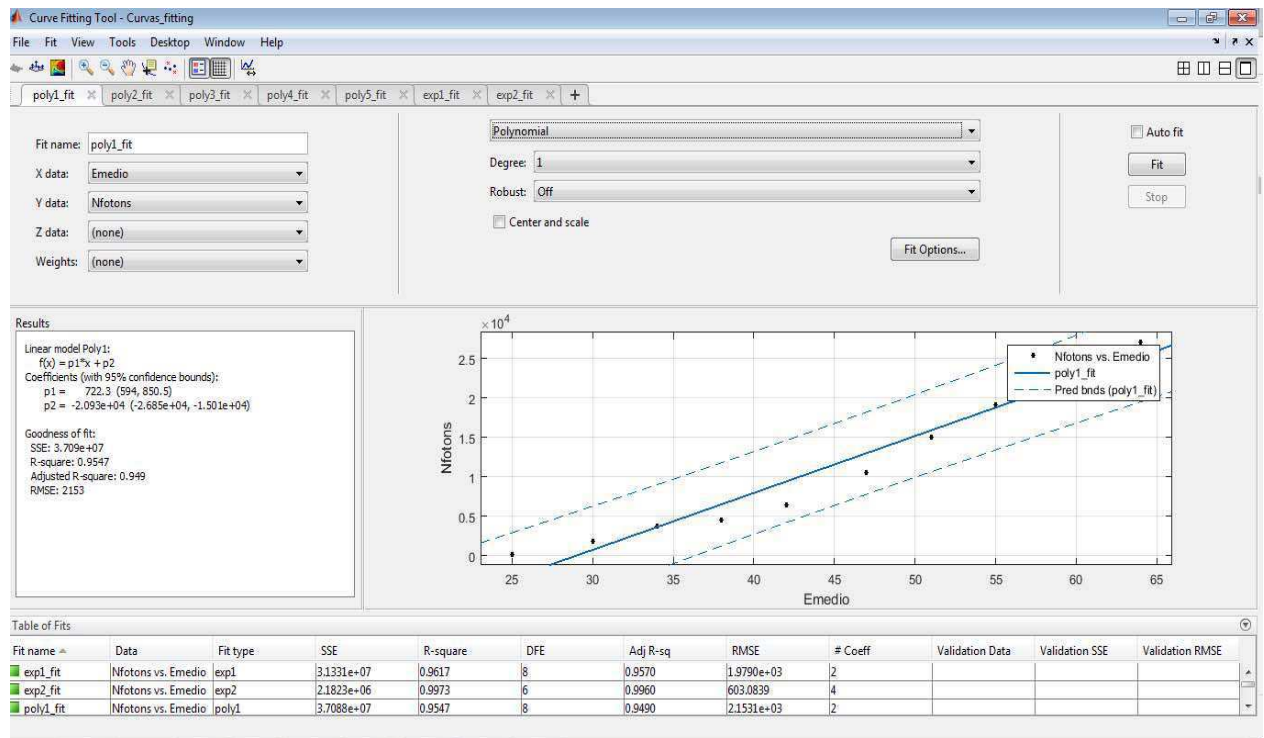
- Erro médio quadrático (*Root Mean Square Error*, RMSE) trata-se de uma estimativa do desvio padrão da componente aleatória nos dados, e que deve ser mais próximo de valor 0 possível.

A análise dos resíduos considera a diferença entre o dado e o ajuste. A ferramenta *cftool* apresenta uma opção que traça os resíduos junto a curva, permitindo que o usuário avalie a interferência dessa diferença. Quanto mais aleatório esse resíduo se apresentar ao gráfico melhor, indicando que não há nenhum tipo de padrão na diferença entre o dado e o ajuste.

A confiança e os limites de predição definem o maior e menor valor do intervalo associado ao ajuste, ou seja, a largura desse intervalo indica quão incerto a ferramenta está com relação aos valores de coeficientes apresentados. Esse intervalo de confiança também pode ser traçado junto a curva de ajuste. É necessário que se delimite um nível de certeza, convencionou-se 95 %, indicando que os ajustes apresentam uma probabilidade de 5% de estarem incorretos.

Na Figura 6 é possível observar o *layout* do *cftool*.

Figura 6 – *Layout* da *toolbox cftool*.



Fonte: autoria própria.

2.5.1 RELACIONANDO O NÚMERO DE FÓTONS AO CAMPO ELÉTRICO

Não há trabalhos divulgados que, efetivamente, relacionem analiticamente o número de fótons com valores de campo elétrico. Essa é uma área ainda pouco explorada.

No entanto, na literatura, já foram desenvolvidos alguns trabalhos que apresentam uma equação que relaciona a tensão aplicada ao número de fótons. Em um trabalho realizado por Shuwei (2013), que busca investigar o efeito da tensão aplicada no número de fótons emitido em uma descarga corona em linhas de transmissão, foi sugerido uma relação quadrática entre essas duas variáveis baseado em ensaios experimentais em que foram aplicadas tensões de 150 kV, 190 kV, 230 kV e 270 kV, valor eficaz.

Por outro lado, Cao (2016) em um trabalho baseado em modelos de simulações e testes de pesquisa em descargas corona em linhas de transmissão propôs uma relação exponencial entre o número de fótons e a tensão aplicada.

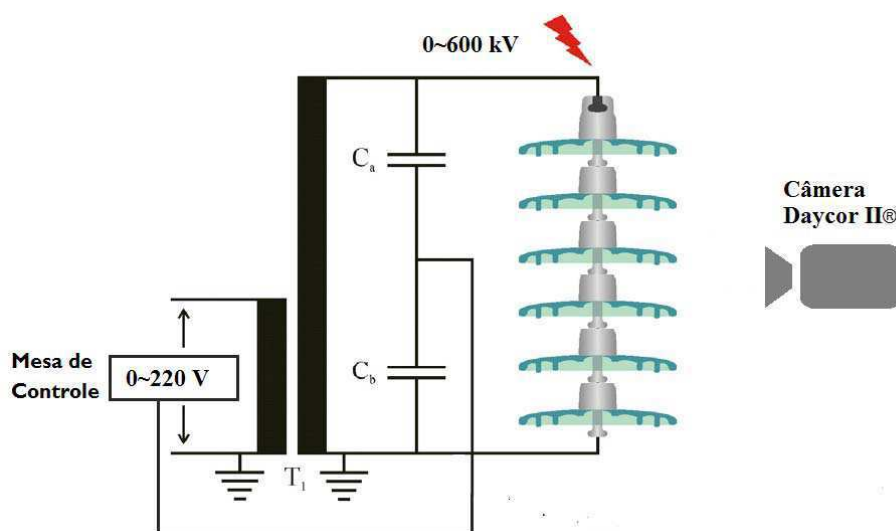
Esses trabalhos apresentam condições experimentais diferentes desse trabalho e não deixa evidente o método empregado para o ajuste de curvas obtido. Contudo, essas publicações fornecem um direcionamento para o tipo de função que pode ser empregado no ajuste de curvas desse caso.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os material e métodos empregados nos testes experimentais da cadeia de isoladores de vidro monitorados por câmera UV, bem como uma descrição das simulações computacionais para estimativas de descargas corona. A simulação foi modelada de forma mais similar possível com o arranjo experimental a fim de proporcionar uma comparação coerente entre as abordagens.

O arranjo experimental é composto por uma cadeia de seis isoladores de vidro, tipo disco, classe 69 kV, cujo o peso de cada isolador é aproximadamente 2,5 kg. Na Figura 7 é apresentado um diagrama esquemático do experimento.

Figura 7 – Arranjo experimental do braço de torre com cadeia de 69 kV



Fonte: (Adaptado de FERREIRA, 2011).

A cadeia foi conectada a uma estrutura em forma de mísula de torre de linha de transmissão, por sua vez aparafusada à estrutura de concreto do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. e pode ser visualizada na Figura 8 e na Figura 9, enquanto que a cadeia de isoladores pode ser melhor observada na Figura 10:

Figura 8 – Arranjo experimental do braço de torre com cadeia de 69 Kv.



Fonte: autoria própria.

Figura 9 – Mísula com cadeia isoladores de 69 kv.



Fonte: autoria própria.

Figura 10– Cadeia de isoladores de vidro utilizada no experimento.



Fonte: autoria própria.

.A cadeia de isoladores foi energizada variando a tensão entre 60 kV a 150 kV, com passo de 10 kV, a fim de verificar a evolução das descargas corona. Essa faixa de tensão foi escolhida considerando que a tensão da rede elétrica pode chegar até 2 pu durante momentos de estresse máximo.

Para tanto foi utilizado o gerador de alta tensão Haefely de 600 kV (dois transformadores de 1k V/ 300 kV – 1 A conectados em cascata). A medição da tensão foi possível empregando-se um divisor de tensão capacitivo Haefely com relação de 7816. No dia do experimento a temperatura estava em torno de 29 °C à pressão de 1013 hPa, enquanto que a umidade relativa do ar era 59%.

A medição do nível de descargas corona foi realizado com auxílio de uma câmera modelo DayCor II® da *Ofil Systems*, capaz de mensurar as emissões de UV das descargas corona. As câmeras UV são capazes de captar a radiação numa faixa estratégica de 240 a 280 nm de comprimento de onda, sendo inferiores ao comprimento de onda de radiação solar que apresenta valores acima de 280 nm, porém dentro da faixa de radiação ultravioleta emitida pelo efeito corona.

Nesse experimento a câmera foi instalada em uma plataforma com 2,60 m de altura e posicionada a 7,5 m do arranjo, a plataforma pode ser visualizada na Figura 11:

Foi acrescentado um condutor de 10 mm na ferragem fase do último isolador, com propósito de intensificar as descargas no experimento realizado, conforme ilustrado na Figura 12. Para cada nível de tensão aplicado, após aguardarem-se 10 minutos para a estabilização elétrica do arranjo, foram realizadas medições do número de fótons capturados pela câmera UV.

Figura 11– Plataforma para suporte da câmara UV.



Fonte: autoria própria.

Figura 12– Fio de 10 mm na ferragem do isolador para intensificação de corona.



Fonte: autoria própria.

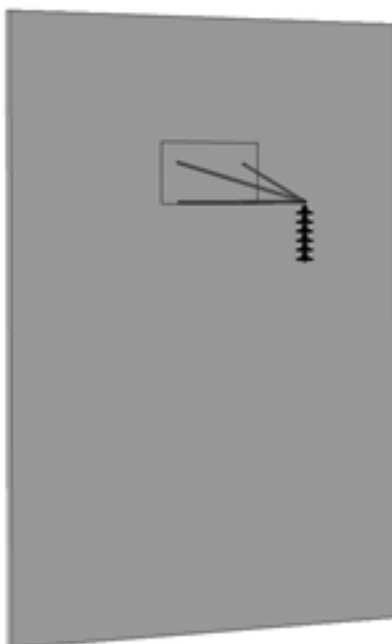
Segundo Barros (2015) a modelagem no ambiente computacional COMSOL consiste nas seguintes etapas:

- i. Construção ou importação da geometria em estudo;
- ii. Criação do ambiente que envolve o modelo;
- iii. Caracterização dos materiais que compõem o modelo, ou seja, atribuição dos materiais e as respectivas constantes físicas aos domínios correspondentes;
- iv. Definição das condições de contorno que modelam o problema.
- v. Geração da malha de elementos;
- vi. Solução do problema;
- vii. Análise dos resultados.

A definição das condições de contorno é um dos estágios mais importantes. No caso de problemas eletromagnéticos, essa etapa consiste na definição das equações do eletromagnetismo e da mecânica que regem o fenômeno.

Dessa forma, o arranjo da linha de transmissão foi modelado conforme o ensaio realizado em laboratório, com auxílio de uma ferramenta de desenho auxiliado por computadores (*Computer Aided Design, CAD*). A modelagem apresentada contém algumas simplificações, com relação ao desenho da mísula, que reduzem o esforço computacional para a realização da simulação, mas que não comprometem o modelo simulado. Na Figura 13 é possível observar o resultado gráfico da modelagem:

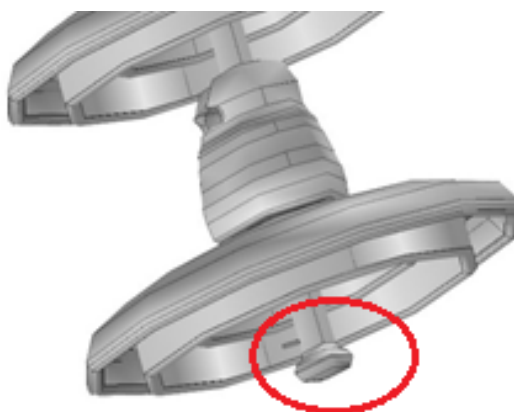
Figura 13 – Representação gráfica do braço de torre com cadeia de 69 kV.



Fonte: autoria própria.

Conforme o que foi realizado no experimento, a modelagem do fio de cobre, colocado na ferragem fase para intensificar as descargas corona no experimento realizado no LAT, é apresentada na Figura 14:

Figura 14 – Detalhe da modelagem do fio de cobre colocado para intensificar o corona no experimento em laboratório.



Fonte: (Próprio autor, 2017).

Após realizada a modelagem computacional geométrica de forma bastante fiel ao esquema experimental, é necessário simular, no COMSOL *Multiphysics*®, a distribuição da tensão e de campo elétrico ao longo da cadeia.

Tal qual na execução dos ensaios, foram aplicadas tensões de 60 kV a 150 kV com passo de 10 kV na cadeia de isoladores. Cada nível de tensão estabelecido originou uma simulação. Para determinação da tensão e do campo elétrico, é necessário utilizar a opção de física de campo eletrostático, que para o COMSOL *Multiphysics*® corresponde à opção *Eletrostatics Field*.

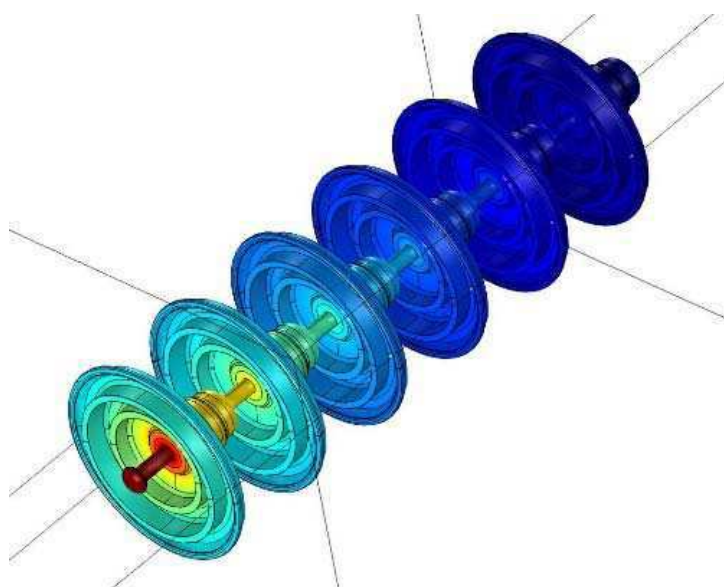
Os dados de entrada correspondem aos níveis de tensão aplicados, enquanto que os dados de saída da física *Eletrostatics Field*, são a distribuição de campo elétrico e tensão. Esses dados de saída devem ser empregados na Equação 8, apresentada na Fundamentação Teórica, para determinação do campo elétrico crítico, apresentando um indicativo da possibilidade de ocorrência de descargas corona.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises do ensaio experimental e da simulação computacional. Também é verificada a correlação entre a tensão de início de corona, estimada nas simulações, e o número de fótons registrados pela câmera UV em ensaios laboratoriais.

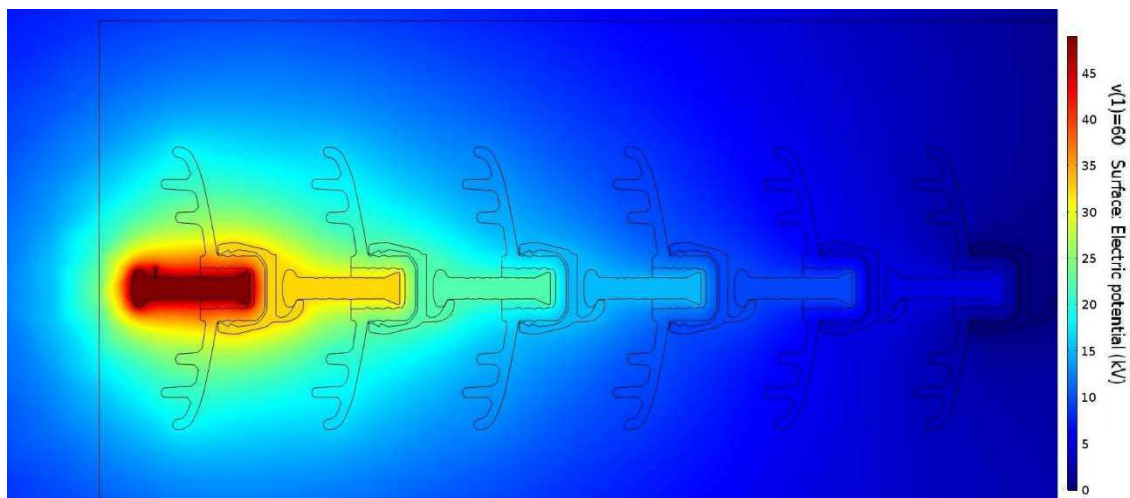
A partir da seção *Eletrostatics Fields* do COMSOL é possível obter a distribuição de tensão e campo elétrico ao longo da cadeia de isoladores. Na Figura 15 pode-se observar a distribuição de tensão na cadeia de isoladores de 69 kV quando aplicado 60 kV, bem como um corte transversal na Figura 16, evidenciando a distribuição de potencial ao longo da cadeia.

Figura 15 – Distribuição de tensão sobre a cadeia de isoladores de 69 kV para tensão aplicada de 60 kV e corte transversal.



Fonte: autoria própria.

Figura 16 – Distribuição de tensão sobre a cadeia de isoladores de 69 kV para tensão aplicada de 60 kV e corte transversal.

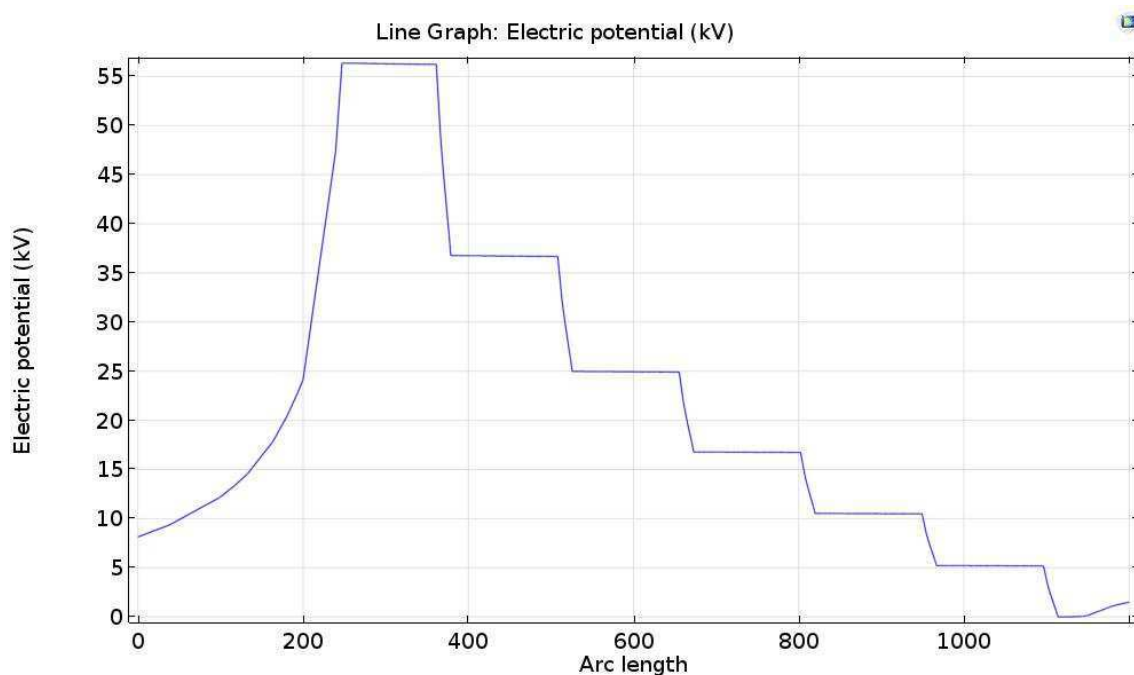


Fonte: autoria própria.

A partir da disposição de cores observa-se a distribuição de tensão ao longo da cadeia não é uniforme, conforme pode-se ver nas Figuras 15 e 16 a. Por meio do corte transversal e com auxílio da escala de cores, representado na Figura 16, nota-se que há uma queda de tensão maior nos dois primeiros isoladores, indicadas pelo tom mais escuro de azul, enquanto que o último isolador apresenta um acréscimo de tensão em relação ao isolador anterior, em vermelho, em decorrência das capacitâncias parasitas presentes no experimento.

Esse resultado pode ser melhor constatado na Figura 17 que retrata a distribuição de tensão sobre uma linha posicionada ao longo do núcleo da cadeia de isoladores.

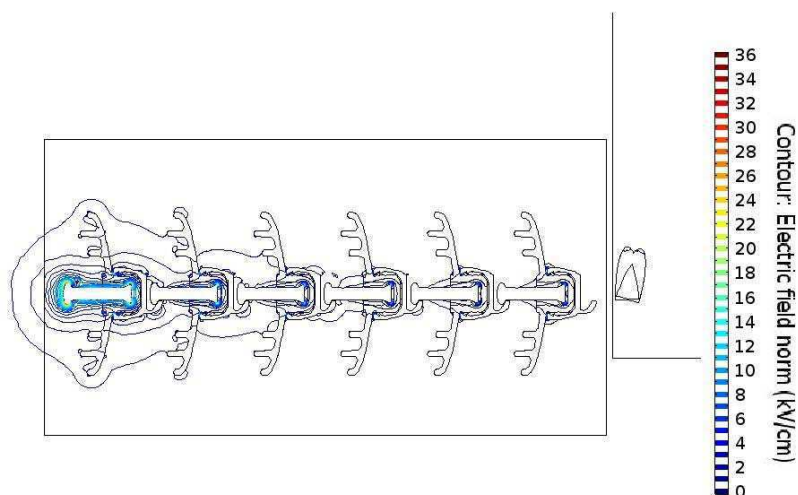
Figura 17 – Distribuição de tensão ao longo do núcleo da cadeia de isoladores de 69 kV para um tensão de 60 kV de pico



Fonte: autoria própria.

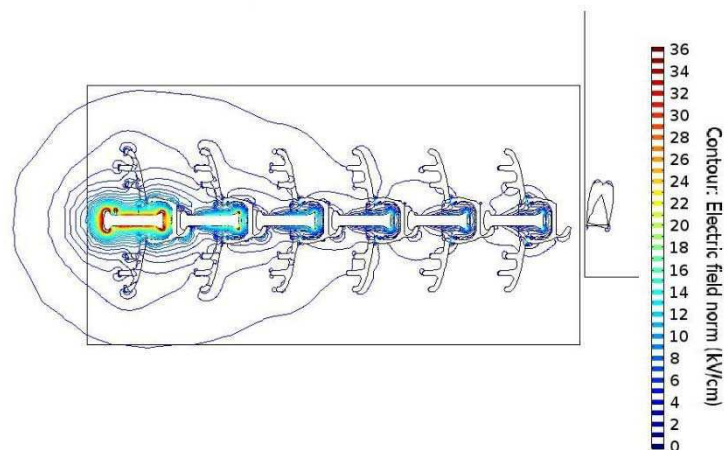
A distribuição de linhas de campo elétrico em torno da cadeia para uma tensão aplicada de 60 kV de pico pode ser observada na Figura 18, e para uma tensão de 150 kV de pico na Figura 19:

Figura 18 – Distribuição de campo elétrico na cadeia de isoladore de 69 kV para um tensão aplicada de 60 kV de pico.



Fonte: autoria própria.

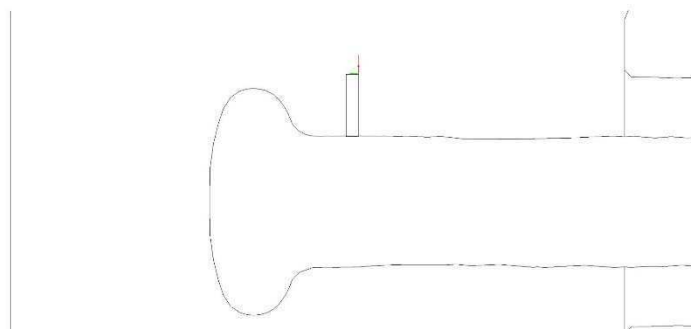
Figura 19 – Distribuição de campo elétrico na cadeia de isoladore de 69 kV para um tensão aplicada de 150 kV de pico.



Fonte: autoria própria.

Quando aplicado 150 kV de pico, uma tensão bem acima da tensão nominal da cadeia de isoladores, observa-se que as linhas de campo são bem intensas no primeiro isolador da cadeia formando um caminho fechado representado pela linha vermelha na Figura 19. Nota-se que o fio de cobre, colocado para intensificar a formação do efeito corona, está em torno justamente dessa linha vermelha e, portanto, esse percurso é escolhido para o cálculo do campo elétrico crítico. Esse caminho que foi escolhido é evidenciado na Figura 20.

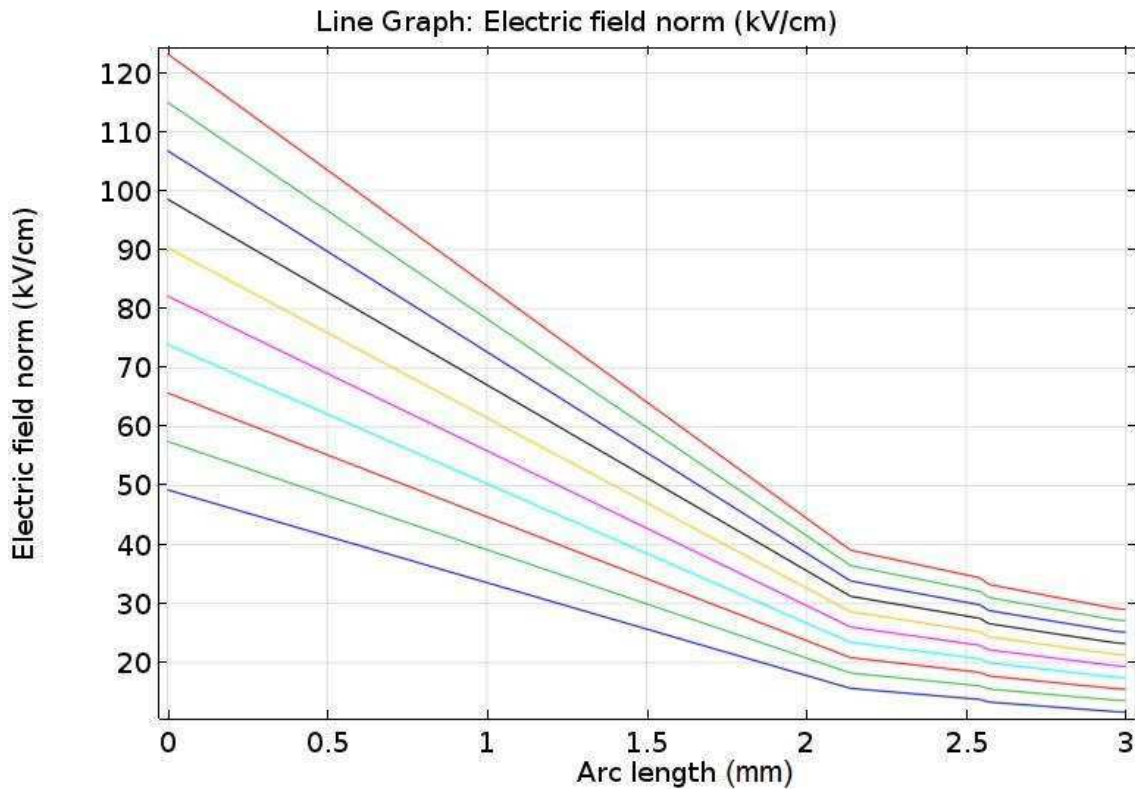
Figura 20 – Caminho escolhido para análise da ocorrência de corona.



Fonte: autoria própria.

Por meio dos resultados do cálculo de campo elétrico, constatou-se que para o experimento realizado o valor de d , distância entre o eletrodo e o fim da Região de Alto Brilho, é de 2,16 mm, considerando que na região de ionização é onde ocorre a ruptura. O gráfico apresentado na Figura 21 mostra que a taxa de decaimento das linhas de campo elétrico mudam justamente no comprimento aproximado de 2,16 mm, indicando a passagem o fim da região de Brilho e início da região de Deriva.

Figura 21 – Gráfico de decaimento do campo elétrico.



Fonte: autoria própria.

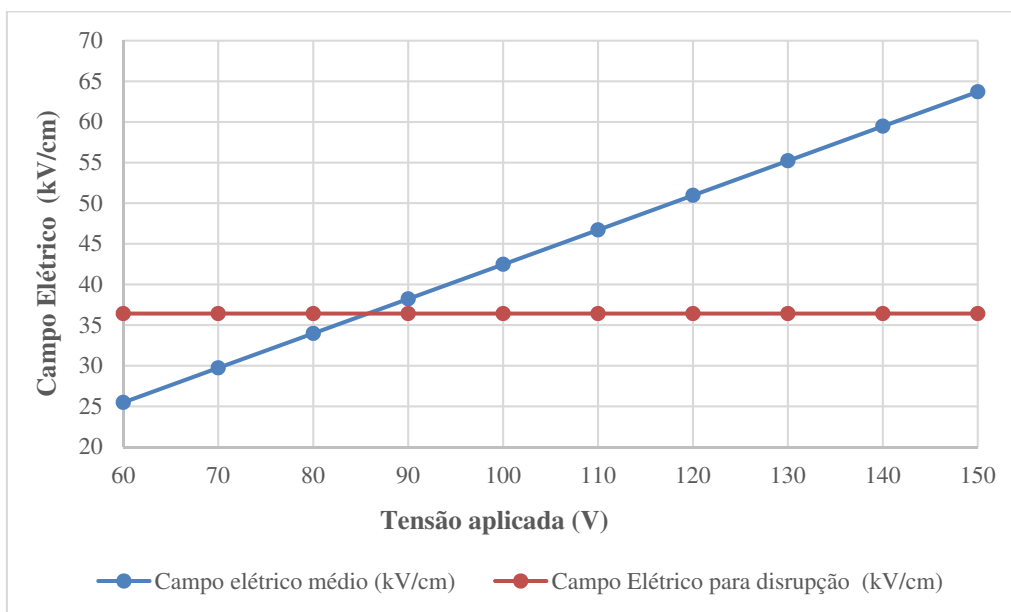
Desta forma, aplicando esse valor na Equação 8 é possível obter o campo elétrico crítico proposto por Townsend para ocorrência de descargas coronas.

$$E_s = 30 + \frac{1,35}{d} \cdot \left[\frac{kV}{cm} \right] \quad (8)$$

Efetuando os cálculos obtém-se um campo elétrico crítico de 36,42 kV/cm. Com esta informação, calculou-se o campo médio sobre o caminho ilustrado na Figura 20. Podem ser observados na Figura 22 os valores do campo elétrico médio entorno do eletrodo e o valor do estresse crítico de Townsend, por meio de um gráfico.

De acordo com os resultados expostos na Figura 22, baseado nas simulações, é possível notar as descargas corona têm início por volta de uma tensão aplicada de 90 kV.

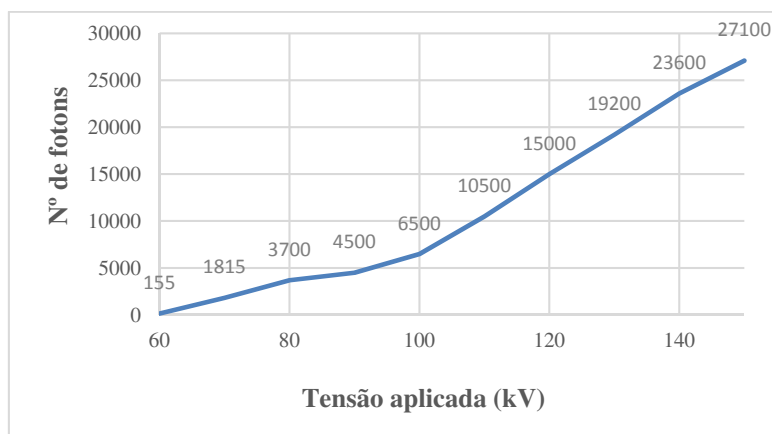
Figura 22– Valores do campo elétrico médio entorno do ponto analisado e valor do campo elétrico para ruptura, segundo Townsend.



Fonte: autoria própria.

No ensaio laboratorial realizado foram aplicadas 10 tensões pré-fixadas e obtidas as devidas medições do número de fótons com auxílio da câmara UV. A partir desses dados, traçou-se a curva do número fótons versus a tensão aplicada, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23– Número de fótons medidos pelo monitoramento com câmera UV por tensão aplicada.



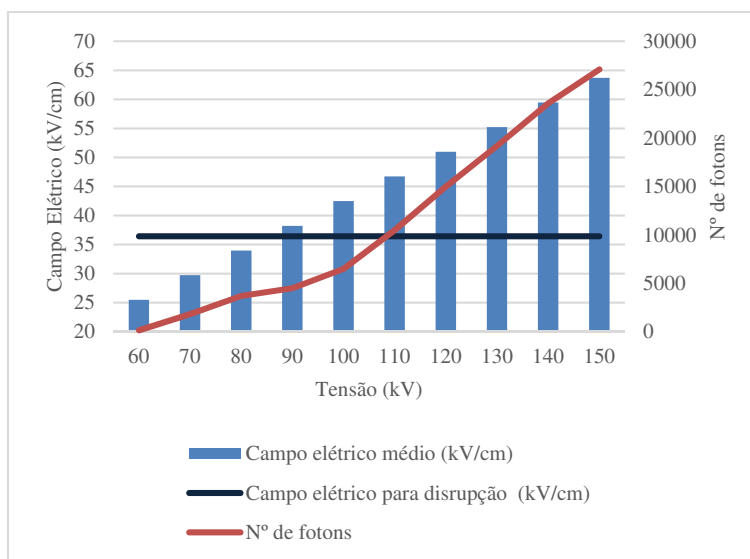
Fonte: autoria própria.

Observando a curva da Figura 23, nota-se que a partir de valores de tensão aplicada de 90 kV o número de fótons medidos é crescente e linear, o que condiz com as observações feitas durante o experimento, uma vez que foi a partir 90 kV que foi possível observar o início das descargas autossustentável nas medições realizadas com a câmera

UV. É importante ressaltar que um valor de tensão semelhante também foi encontrado na simulação.

Para realizar a comparação entre os dois resultados, simulação computacional e experimento, são apresentados tanto o número de fótons quanto o campo elétrico médio e de disrupção, com relação à tensão aplicada, em um mesmo gráfico ilustrado na Figura 24.

Figura 24– Resultados da simulação computacional e do ensaio experimental sobrepostos.



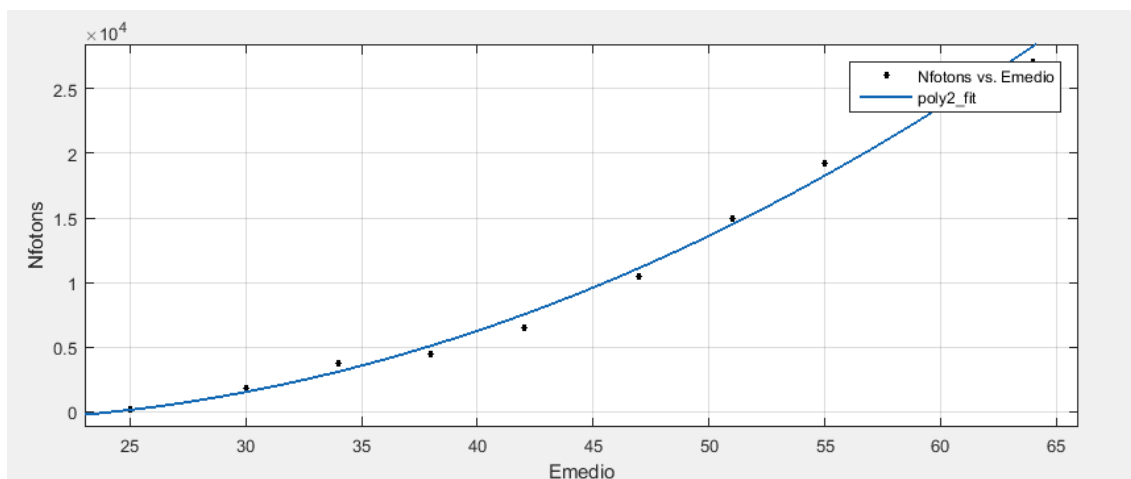
Fonte: autoria própria.

Com base no gráfico apresentado na Figura 24, é possível notar que tanto a simulação computacional, quanto os ensaios experimentais indicaram a tensão de 90 kV como a tensão de início de corona.

Para melhor fundamentar tais observações é importante obter uma relação entre essas variáveis, estabelecendo parâmetros que indiquem a correlação entre experimentos e simulações. Por isso, com a ajuda da *toolbox cftool* do MATLAB foi possível obter uma equação que relacionasse adequadamente o número de fótons com o campo elétrico médio.

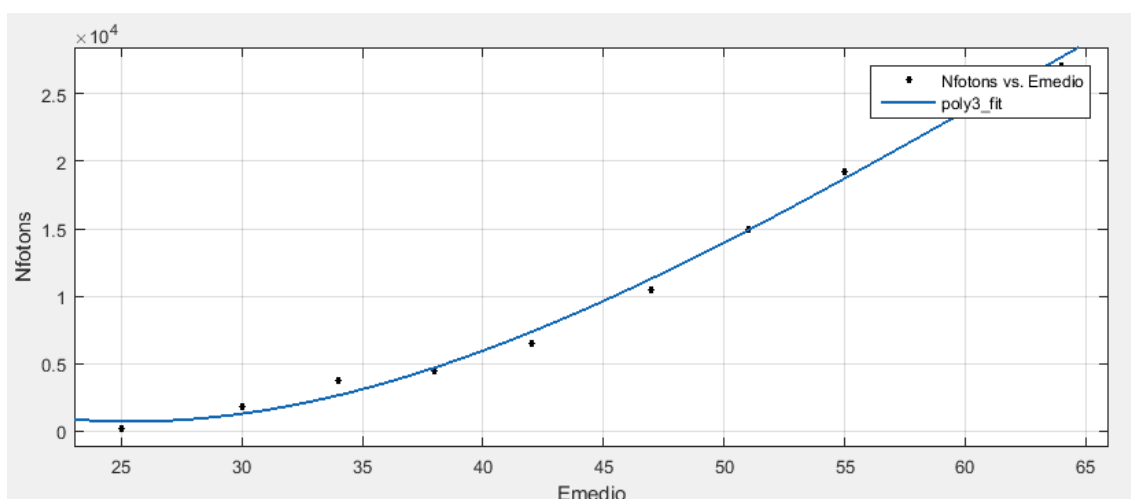
Após a inserção dos dados, correspondentes ao número de fótons e campo elétrico médio, no MATLAB foram traçadas setes curvas, cada uma para modelo diferente. Foram utilizadas equações polinomiais de grau 1, 2, 3, 4 e 5 e exponenciais de 1 e 2 termos. As curvas para os modelos polinomiais de grau 2 e 3 são ilustradas nas Figuras 25 e 26 respectivamente.

Figura 25– Curva para o modelo polinomial de grau 2.



Fonte: autoria própria.

Figura 26 – Curva para o modelo polinomial de grau 3.



Fonte: autoria própria.

A Tabela 1 agrupa as curvas ajustadas do número de fótons versus campo elétrico médio aos respectivos parâmetros de *goodness of fit*:

Tabela 1 – Parâmetro de *goodness of fit* para as curvas traçadas.

Nome da curva	Dado	SSE	R-Square	Grau de liberdade do erro	R-Square ajustado	RMSE	Nº de coeficientes
Exp1_fit	NfxEmed	3e+07	0,9617	8	0,9570	2e+03	2
Exp2_fit	NfxEmed	2e+06	0,9973	6	0,9960	603	4
Poly1_fit	NfxEmed	3e+07	0,9547	8	0,9490	2e+03	2
Poly2_fit	NfxEmed	6e+06	0,9926	7	0,9904	933	3

Poly3_fit	NfxEmed	4e+06	0,9945	6	0,9917	869	4
Poly4_fit	NfxEmed	4e+05	0,9994	5	0,9990	307	5
Poly5_fit	NfxEmed	4e+05	0,9994	4	0,9987	340	6

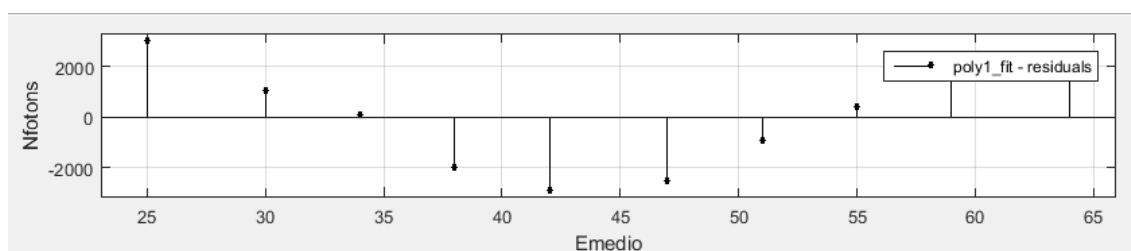
Fonte: autoria própria..

Embora a curva ajustada ao polinômio de grau 5 apresente um R-Square bem próximo a 1, o software mostrou um aviso que indica que aquela equação está mal condicionada para os dados, portanto esse modelo foi desconsiderado.

Os modelos de polinômio de grau 4 e exponencial com dois termos apresentaram os menores valores correspondentes aos parâmetros SSE e RMSE.

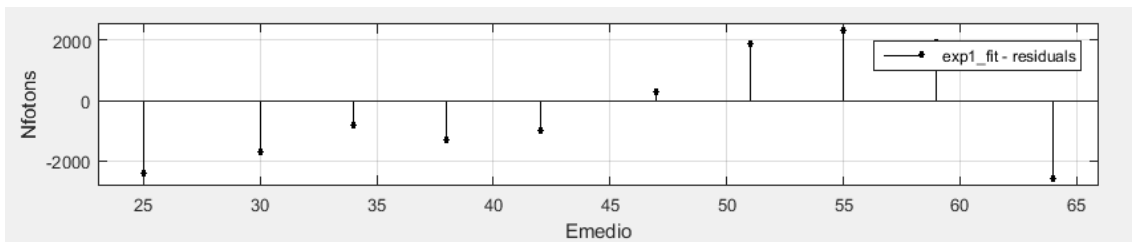
O resíduo em todas as curvas comporta-se de forma aleatória, logo todas os modelos são coerentes segundo essa análise. O resíduo para as curvas de modelo polinomial grau 1 e exponencial de 1 termo são apresentados nas Figuras 27 e 28:

Figura 27 – Resíduo para o modelo polinomial de grau 1.



Fonte: autoria própria.

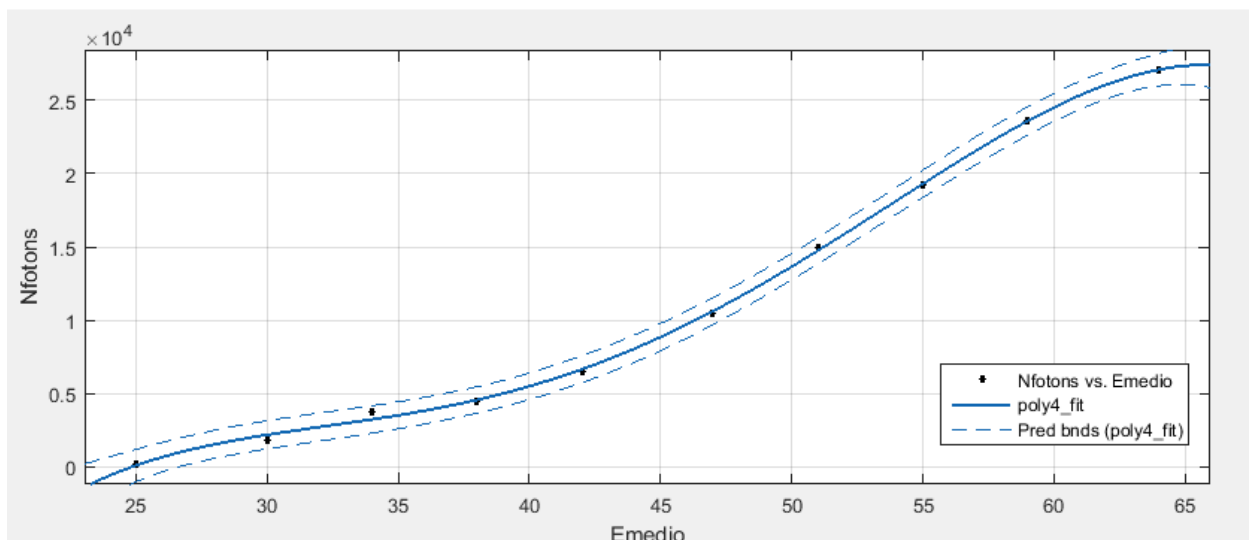
Figura 28 Resíduo para o modelo exponencial de 1 termo.



Fonte: autoria própria.

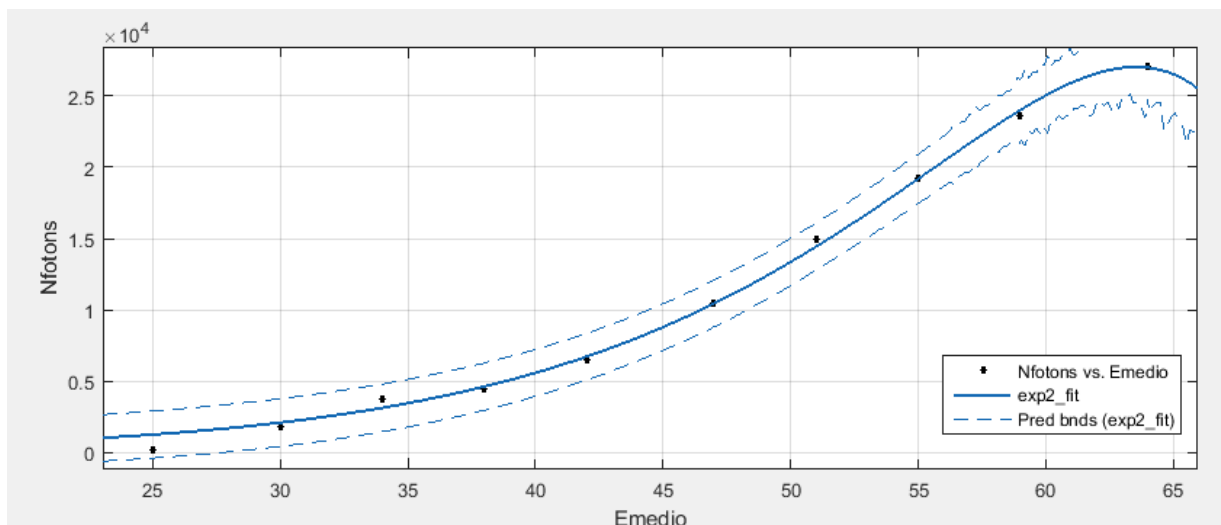
Foi estabelecido uma margem de 5% de erro para o ajuste das curvas, caracterizando o limite de predição. O limite de confiança com menor largura foi obtido para as curvas de modelo polinomial de grau 4 e exponencial de 2 termos. Portanto, os modelos que apresentaram melhor desempenho nas três análises foi o polinômio de grau 4 e a exponencial com dois termos. Tais curvas e os limites dos intervalos de confiança são evidenciadas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Resíduo para o modelo polinomial de grau 1.



Fonte: autoria própria.

Figura 30– Resíduo para o modelo exponencial de 1 termo.



Fonte: autoria própria.

Baseado nos resultados desses trabalhos a relação entre o número de fótons e o campo elétrico pode ser de caráter polinomial ou exponencial. De fato um estudo mais aprofundado seria necessário determinar se o modelo que relaciona a tensão aplicada ao número fótons é o mesmo que relaciona o campo elétrico ao número fótons.

No escopo desse trabalho, observou-se que tanto o modelo polinomial de grau 4 quanto o exponencial de dois termos apresentaram resultados satisfatórios, as características de ambas curvas de ajuste são ressaltadas na Tabela 2.

Tabela 2– Características dos modelos exponencial grau 4 e exponencial de 2 termos.

Modelo	R-Square ajustado	RMSE	SSE	Resíduo	Limite de predição	Coefficientes
Polinomial de grau 4	0,9990	307	4e+05	Aleatório	Intervalo estreito	p1 = -0.04472 p2 = 7.692 p3 = -465 p4= 1.224e+04 p5=1.182e+05
Exponencial com 2 termos	0,9960	603	2e+06	Aleatório	Intervalo estreito	a = -4.377e+05 b = 0.1253 c = 4.378e+05 d = 0.1253

Fonte: autoria própria.

Nota-se que o polinômio possui o R-quadrado mais próximo de 1 e portanto é o mais indicado para relacionar o número de fótons com campo elétrico para as condições desse trabalho, conforme a Equação 10.

$$NF = -0.04472E_{med}^4 + 7.692E_{med}^3 - 465E_{med}^2 + 1.224 * 10^4 E_{med} - 1.182 * 10^5, \quad (10)$$

em que: NF representa o número de fótons e E_{med} representa o campo médio [kV/cm].

De modo geral, os resultados apresentados nesse trabalho enfatizam o poder das simulações computacionais na determinação do efeito corona em geometrias complexas, que podem auxiliar no refino do dimensionamento e do projeto de linhas de transmissão.

5 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um equacionamento que correlaciona a distribuição de campo elétrico em um modelo representativo de uma cadeia de isoladores de vidro de 69 kV, utilizando simulações computacionais, com dados obtidos por experimentos em laboratório.

Os resultados dos ensaios experimentais foram obtidos por meio de monitoramento com câmeras UV, enquanto que as simulações realizadas se basearam na solução por meio do Método dos Elementos Finitos e nas teorias de Townsend.

O modelo computacional, utilizado na simulação do campo elétrico foi cuidadosamente elaborado, buscando uma representação fidedigna da realidade, de forma que os resultados obtidos por ambas as abordagens apresentam notável concordância. Dessa forma, foi apresentada uma representação do efeito corona em ambiente computacional, com intuito de indicar a tensão de início de corona para o arranjo de 69 kV.

De modo geral, os resultados apresentados nesse trabalho enfatizam o poder das simulações computacionais na determinação do efeito corona em geometrias complexas, que podem auxiliar no refino do dimensionamento e do projeto de linhas de transmissão. O trabalho obteve êxito no que foi proposto.

Como continuidade desse trabalho é sugerido a aplicação da mesma metodologia para uma cadeia de isoladores poliméricos a fim de verificar a extensão dos resultados para outros materiais. Outra sugestão seria observar a influência de fatores como umidade e poluição na equação que relaciona número de fótons e campo elétrico médio, por meio de simulação e ensaios da cadeia submetida à incidência de névoa limpa e salina.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT IEC/TS 60815-1: Seleção e dimensionamento de isoladores para alta-tensão para uso sob condições de poluição Parte 1: Definições, informações e princípios gerais. Janeiro de 2015.
- BARROS, W. P. P. Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos. Dissertação de Mestrado, UFCG: Campina Grande, 2011.
- BARROS, R. M. R. Determinação dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores de Potência Causados por Correntes de Inrush Utilizando Simulações Multifísicas, UFCG: Campina Grande, 2015.
- BARROSO, L.C. *et al.* Cálculo numérico (com aplicações). 2. ed. São Paulo, 1987.
- CAO, Q. ZHANG, Y. J. YANG, W. J. ZHOU, L. XIE, and L. L. GU. “Corona discharge characteristic for fittings of high altitude AC transmission line”, 2016.
- COSTA, E. G. Da. Guia de experimentos de Chaves e Isoladores. UFCG: Campina Grande, 2009.
- COSTER, A. C. F. Goodness of Fit Statistics. UNSW Austrália, 2016. Disponível em: <http://web.maths.unsw.edu.au/~adelle/Garvan/Assays/GoodnessOfFit.html>. Acessado em 10/02/2017.
- Curve Fitting Toolbox™ User's Guide. The MathWorks, 2016.
- DELAIR, R. Edison Tech Center, Electrical Insulators, 2015. Disponível em: <<http://www.edisontechcenter.org/Insulation.html>>. Acesso em: 7 de Janeiro de 2017.
- FOLEY, A. LEMAN, J. Enhancing Transmission Line Performance: Using Simulation to Optimize Design. IEEE Spectrum Multiphysics Simulation, p. 3-5 , Maio 2014.
- FERREIRA, T. V. Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos. Dissertação de Mestrado, UFCG: Campina Grande, 2007.
- FERREIRA, T. V. Estimção Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrassônico. Tese de Doutorado, UFCG: Campina Grande, 2011.
- GIANELLI, B. F. Caracterização do Efeito Corona em Isoladores Poliméricos do Tipo Bastão Submetidos à Poluição Salínica. UNESP: Bauru, 2008.
- GUEDES, C. P.G. Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy. Dissertação de Mestrado, UFCG: Campina Grande, 2015.
- GUERRA, F. das C. F. Proteção de Sistemas Elétricos – Notas de Aula. UFCG: Campina Grande, 2010.
- GOLDMAN, M.; SIGMOND, R.S. Corona and Insulation. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 17, N_2. April 1982.

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

LEMAN, J. SEGUI, J. Enhancing High-Voltage Transmission Line Performance with Numerical Simulation. COMSOL, 2016.

MARTINS, R. Desenvolvimento de Isolador Polimérico Inteligente. Tese de Doutorado, UFPR: Curitiba, 2015.

NIGRI, A. I. . Desempenho de Isoladores-Ponto de Vista da Manutenção. SNTPEE - 1999. 1999. (Apresentação de Trabalho/Seminário).

PEDROSA, D. P. F. Ajuste de Curvas. UFRN: 2011. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~diogo/FTP/dca0304/ajustedecurvas.pdf>. Acessado em 09/02/2017.

SADIKU, M. N. O. A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems. IEEE Transactions on Education, Vol. 32, No. 2, May 1989.

SHUWEI, W; ZHAO, X; GUO, X. et al. The Effect of Applied-voltage on Photon-Number of Corona Discharge on Transmission Lines Defect. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013.

SILVA, H. A. B. ; MOTA, A. A. ; MOTA, L. T. M. . Interferência da variação do anel anti-corona na distribuição do campo elétrico em isoladores da classe de tensão de 500 kV. In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2012, Goiânia. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.

SOUZA, A. L.; LOPES, I. J. S. Estudo da Distribuição de Campo Elétrico em Isoladores Poliméricos: uma abordagem computacional e experimental. SBSE: Belo Horizonte, 2008.

SOUZA, A. L. Estudo de Modelos para Definição de um Critério de Início de Corona Através da Análise de Experimentos e Simulações Computacionais. Dissertação de Mestrado, UFMG, 2009.

ZHOU, P. Numerical Analysis of Electromagnetic Fields. Springer, 1993.