



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTOR ANDRADE LIMA FERREIRA

**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL PARA MONITORAÇÃO
EM CADEIA DE ISOLADORES DE VIDRO COM BASE NAS VARIAÇÕES DE
SUA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO**

Recife

2019

VICTOR ANDRADE LIMA FERREIRA

**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL PARA MONITORAÇÃO EM
CADEIA DE ISOLADORES DE VIDRO COM BASE NAS VARIAÇÕES DE SUA
DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Prof^o. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (UFPE/BCTG)

F383f Ferreira, Victor Andrade Lima.
 Fundamentação teórica e experimental para monitoração em cadeia de
 isoladores de vidro com base nas variações de sua distribuição de tensão /
 Victor Andrade Lima Ferreira. – Recife, 2019.
 76 folhas, il., fig., tabs., abrev., sigl. e símb.

 Orientador: Prof^o. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.
 Inclui Referências.

 1. Engenharia Elétrica. 2. Monitoração de isoladores. 3. Modelo elétrico de
cadeia de isoladores. 4. Distribuição de tensão. I. Bezerra, José Maurício de Barros
(Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. Ed.)

UFPE/BCTG/2019 - 341

VICTOR ANDRADE LIMA FERREIRA

**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL PARA MONITORAÇÃO
EM CADEIA DE ISOLADORES DE VIDRO
COM BASE NAS VARIAÇÕES DE SUA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 26 de julho de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. José Maurício de Barros Bezerra
(Orientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Tarso Vilela Ferreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Sergipe

Prof^o. Dr. Zanoni Dueire Lins (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a minha família
e amigos, obrigado pelo carinho,
apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais. Mesmo com todas as dificuldades enfrentadas me apoiaram nessa longa jornada. Eu devo tudo que sou a eles. A minha irmã pelas brigas, pelo carinho e por me aturar. Agradeço aos meus familiares por sempre acreditarem em mim, dando apoio e incentivo.

Produzir a dissertação exigiu mais do que apoio acadêmico. Tenho muitas pessoas a agradecer por me ouvir e, às vezes, ter que me aturar nos últimos dois anos. Não posso mensurar minha gratidão e apreço pela amizade aos colegas Alexandro Aleixo, Bruno, Dayse, Ebenezaide, Jonatan, José Alexandro, Juliana, Marcio, Marcos, Rayssa, Samuel e Zaroni do Grupo de pesquisa de Transmissão e Distribuição. E esses foram fundamentais em seu apoio pessoal e profissional durante o tempo que passei na universidade. Agradecimento em especial aos amigos Ayrlw e Diego pela colaboração mais direta em simulações e ensaios laboratoriais.

Agradeço ao professor José Maurício pela orientação no trabalho e pela transmissão de seu conhecimento. Sem sua assistência e envolvimento nas etapas do processo, este documento nunca teria sido elaborado. O seu apoio e compreensão foram de fundamental importância durante esses anos.

Agradeço aos colegas pelos anos de convivência em que, sem percebermos, passamos a fazer parte das vidas uns dos outros, compartilhando não só conhecimentos, mas também, dividindo medos, incertezas e inseguranças.

Agradeço também a todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia Elétrica pelo convívio e aprendizado.

Agradeço ao Renan Gonzaga e à CHESF pela doação dos isoladores utilizados nesta dissertação.

Agradeço à CAPES pelo auxílio financeiro durante o período 01/08/2017 até 31/10/2018 e ao CNPq durante o período de 01/11/2018 até 31/07/2019, viabilizando a bolsa de mestrado relacionado a este trabalho e a todos aqueles que não foram mencionados, mas que ainda assim de alguma forma colaboraram para esta pesquisa, segue meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O cálculo da distribuição de potencial é de extrema importância para determinação dos níveis de estresse elétrico ao longo da cadeia de isoladores. Este trabalho, então, analisa o comportamento da distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores de vidro quando submetida a unidades em curto-circuito, através da adequação do modelo elétrico da cadeia de isoladores cerâmicos, já consolidado. Essas influências e perturbações são estudadas através de simulações, em que se aplica o modelo utilizando o software MATLAB/Simulink[®]. Para a obtenção do parâmetro fundamental do modelo, a capacitância própria de cada isolador da cadeia, realizam-se ensaios em campo e utiliza-se também o software COMSOL Multiphysics[®], o qual permite criar e resolver modelos usando avançados métodos de análise numérica, embasado no método de elementos finitos. Devido à complexidade da geometria do isolador simulado, necessitando de uma representação gráfica, implementa-se o desenho no AutoCAD[®]. Os resultados obtidos por meio de simulações mostram graficamente o comportamento da distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores para descargas em unidades próximas ao lado fase. Os dados obtidos nessas simulações são utilizados para ajustar espinterômetro, o qual é utilizado como possível dispositivo de monitoração da cadeia. Por fim, conclui-se que os resultados obtidos a partir do modelo elétrico na cadeia de isoladores estão consonantes com a literatura. De posse desta validação foi possível, inclusive, ajustar em laboratório de alta tensão espinterômetro para ensaiar possível protótipo de monitoração da cadeia de isoladores.

Palavras-chave: Monitoração de isoladores. Modelo elétrico de cadeia de isoladores. Distribuição de tensão.

ABSTRACT

The calculation of the potential distribution is extremely important for determining the levels of electrical stress along the chain of insulators. This work analyzes the behavior of the potential distribution along the chain of glass insulators when submitted to short circuited units, through the adaptation of the electric model of the chain of ceramic insulators, already consolidated. These influences and perturbations are studied through simulations, in which the model is applied using the MATLAB/Simulink[®] platform. In order to obtain the fundamental parameter of the model, the own capacitance of each isolator of the chain, field tests are carried out and the software COMSOL Multiphysics[®], which allows to create and solve models using advanced methods of numerical analysis, based on the finite element method. Due to the complexity of the simulated insulator geometry, requiring a graphical representation, the design is implemented in AutoCAD[®]. The results obtained by simulations show graphically the behavior of the potential distribution along the chain of isolators for discharges in units near the phase side. The data obtained in these simulations are used to adjust the spark gap, which will be used as a prototype chain monitoring device. Finally, it is concluded that the results obtained from the electric model in the chain of insulators are consonant with the literature. With this validation, it was possible, even, to adjust in a high voltage laboratory a spark gap to test possible prototype monitoring of the chain of insulators.

Keywords: Isolation monitoring. Electrical model of chain of insulators. Voltage distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equivalente do dielétrico	20
Figura 2 – Exemplos de distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento em cadeia de isolador cerâmico	22
Figura 3 – Conjunto de eletrodos	22
Figura 4 – Cadeia de capacitores em série	24
Figura 5 – Cadeia de capacitores com simples concatenação	24
Figura 6 – Cadeia de capacitores com dupla concatenação	25
Figura 7 – Distribuição de potencial ao longo de uma cadeia de isoladores	27
Figura 8 – Seção transversal isolador padrão de esfera e soquete	29
Figura 9 – Diagrama da montagem laboratorial	30
Figura 10 – Gap esférico horizontal	32
Figura 11 – Metodologia baseada em equações diferenciais parciais.	34
Figura 12 – Malha simples de elementos finitos.	34
Figura 13 – Dispositivo patenteado por (SPANGLER, 1933)	39
Figura 14 – Exemplo do teste tipo garfo	40
Figura 15 – Aplicação do teste tipo garfo em uma linha de transmissão de 154 kV	41
Figura 16 – Isolômetro instrumento de teste e medição	42
Figura 17 – Relatório gráfico instantâneo	43
Figura 18 – Interface AutoCAD®	45
Figura 19 – Interface do COMSOL Multiphysics®	46
Figura 20 – Interface do Matlab/Simulink®	47
Figura 21 – Isolador de vidro simulado.	48
Figura 22 – Esquema elétrico ensaios de tensão aplicada.	49
Figura 23 – Fluxograma da metodologia empregada.	53
Figura 24 – Circuito simulado através do MATLAB/Simulink.	54
Figura 25 – Foto da área de ensaio	55
Figura 26 – Foto da sala de controle	56
Figura 27 – Geometria desenvolvida para a simulação, isolador de vidro de alta tensão.	57
Figura 28 – Definição dos materiais próximo ao terminal fase.	58
Figura 29 – Definição das condições de contorno.	59
Figura 30 – Malhas geradas no COMSOL	60
Figura 31 – Distribuição de potencial COMSOL®	61
Figura 32 – Circuito simulado através do MATLAB/Simulink.	62
Figura 33 – Representação via Simulink® da distribuição de potencial	63
Figura 34 – Distribuição de potencial MATLAB/Simulink®	64
Figura 35 – Distribuição de potencial laboratório de alta tensão	65

Figura 36 – Análise comparativa da distribuição de potencial	66
Figura 37 – Variação da tensão quando de curto circuito	67
Figura 38 – Variação da resistência de pé de torre.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i> - Corrente Alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Auxiliado por Computador
DC	<i>Direct Current</i> - Corrente Contínua
EDP	Equação Diferencial Parcial
GpTD	Grupo de Pesquisa em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica
LTs	Linhas de Transmissão
MEF	Método dos Elementos Finitos
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UV	Ultravioleta
VANTS	Veículos Aéreos Não Tripuláveis

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_r	Permissividade elétrica relativa do material
C_0	Capacitância de um capacitor sem matéria entre os eletrodos
C_d	Capacitância com dielétrico entre os eletrodos
ϵ_0	Permissividade elétrica absoluta do vácuo
ϵ	Permissividade elétrica absoluta do material
ρ_v	Densidade volumétrica de carga
P	Potência ativa
U	Tensão aplicada
C	Capacitância
I_a	Corrente resistiva
I_c	Corrente capacitiva
δ	Ângulo de perdas do dielétrico
A	Área
d	Distância entre as placas de um capacitor de placas paralelas
U_λ	Tensão aplicada
U_g	Tensão aplicada a uma unidade capacitiva
n	Unidade da cadeia de isoladores
C	Capacitância entre unidades da cadeia de isoladores
c	Capacitância entre unidade da cadeia do isoladores e a terra
k	Capacitância entre unidade da cadeia de isoladores ao condutor
\vec{E}	Vetor campo elétrico
$V_{50\%}$	Valor de tensão esperada com a probabilidade de 50% de produzir uma descarga disruptiva
K	fator de correção
K_d	fator de correção da densidade do ar
K_d	fator de correção da umidade do ar

p	pressão atmosférica
t	temperatura
N	Número de isoladores
V_N	Tensão aplicada a cadeia
x_N	Tensão percentual nos isoladores
V_{gap}	Tensão de ruptura do espaçamento do espinterômetro
$V_{s\grave{a}pico}$	Tensão de pico de um isolador da cadeia sã
$V_{variaçãopico}$	Varição da tensão de pico de um isolador após o curto
z	Número de isoladores da cadeia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	MATERIAIS DIELÉTRICOS	19
2.1.1	Dielétrico ideal versus dielétrico real	20
2.1.2	Distribuição de potencial e campo elétrico em dielétricos	20
2.2	MODELO ELÉTRICO DE UMA CADEIA DE ISOLADORES	21
2.3	ESTUDOS DE DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL PARA A CADEIA DE CAPACITORES COM DUPLA CONCATENAÇÃO	24
2.4	ISOLADORES CERÂMICOS	28
2.5	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ALTA TENSÃO	29
2.5.1	Fontes de alta tensão	30
2.5.2	Medição em alta tensão	30
2.5.3	Medição utilizando <i>Gaps</i> esféricos	31
2.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	33
2.7	TIPOS DE INSPEÇÃO EM CADEIA DE ISOLADORES	35
2.7.1	Inspeção terrestre	35
2.7.2	Inspeção aérea	36
2.8	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO	37
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3.1	MEDIÇÃO OU DETECÇÃO DE POTENCIAL ELÉTRICO	38
4	MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1	AUTOCAD®	45
4.2	COMSOL MULTIPHYSICS®	46
4.3	MATLAB/SIMULINK®	47
4.4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	47
4.5	ENSAIO LABORATORIAL	48
4.5.1	Comparação de resultados	52
4.6	APLICAÇÃO DO DEFEITO	53
5	RESULTADOS	57
5.1	RESULTADOS OBTIDOS NO COMSOL®	57
5.1.1	Definição dos materiais	58
5.1.2	Definição das condições de contorno	59
5.1.3	Definição da malha	59
5.2	DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL PELO COMSOL®	60
5.3	SIMULAÇÃO MATLAB/SIMULINK®	61

5.4	RESULTADOS OBTIDOS NO MATLAB/SIMULINK®	63
5.5	RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO	64
5.6	ANÁLISE COMPARATIVA SIMULAÇÕES E ENSAIO LABORATORIAL	65
5.7	APLICAÇÃO DO CURTO EM DOIS ISOLADORES	67
5.8	INDICAÇÃO DE FALSO POSITIVO	68
5.9	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PÉ DE TORRE	69
6	CONCLUSÕES, TRABALHOS FUTUROS E PUBLICAÇÕES	71
6.1	TRABALHOS FUTUROS	71
6.2	PUBLICAÇÕES	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são expandidos diariamente em todo o mundo e uma atenção especial é dada à confiabilidade da operação desses. Situações de interrupções no fornecimento de energia não programadas, e até programadas, devem ser minimizadas, pois podem causar desde simples inconvenientes até danos e perdas significativas para a sociedade.

Um dos fatores mais importantes que contribuem para a redução da confiabilidade dos sistemas de energia são as falhas causadas nos isoladores, que são utilizados para isolação elétrica e suporte mecânico de linhas de transmissão de energia. Esses exigem inspeção regular, pois se deterioram após a instalação devido a diversos fatores como solicitações elétricas, mecânicas, térmicas e ambientais. Como o SEP desempenha papel crucial para o país, caso um problema venha a ocorrer em sua operação, pode-se suceder um efeito drástico sobre as indústrias, a economia e até mesmo a segurança nacional (LEE et al., 2012a).

Os problemas de contaminação nos isolantes elétricos ocorrem quando o ambiente que os envolve contém substâncias diversas que são depositadas nos isoladores, formando uma película condutiva em sua superfície. Em condições secas esta camada não causa grandes problemas, mas sob a presença de chuva leve, umidade, orvalho ou névoa, as características dielétricas da superfície do isolador são reduzidas, permitindo o fluxo de corrente de fuga entre os eletrodos podendo levar a falha do sistema elétrico de alta tensão (VITA; EKONOMOU; CHATZARAKIS, 2010).

Esses fatores externos comprometem consideravelmente suportabilidade elétrica dos isoladores. A união da poluição depositada sobre os isoladores com a umidade produz caminhos condutivos. Esses caminhos facilitam a ocorrência da falha da isolação. É bastante difícil evitar que o fenômeno ocorra. Uma possível solução para reduzir os efeitos da poluição em cadeias de isoladores, é a utilização das técnicas de manutenção preditiva e preventiva. Diante disso, quanto mais precisa for a análise do estado em que se encontra a cadeia de isoladores, menores serão os riscos de falhas no sistema elétrico devido à perda de isolação.

Vários métodos para detecção de defeitos em isoladores têm sido usados ao longo dos anos. Uns são métodos ativos, enquanto outros são passivos. O método é considerado ativo quando alguma fonte externa de alta tensão é aplicada através do isolador para realmente testar seus limites. Os métodos ativos tem sido usados basicamente em laboratórios. Por outro lado, os métodos passivos são amplamente utilizados em campo e podem ser separados em três categorias, de acordo com o tipo de medição utilizada: medição ou detecção de potencial elétrico, medição de resistência, medição de campo elétrico e medição de corrente de fuga (VAILLANCOURT et al., 1994).

1.1 MOTIVAÇÃO

Como parte fundamental do sistema elétrico, os isolantes desempenham um papel importante nas linhas de transmissão. Diversos fatores afetam o desempenho dos isoladores, sendo a poluição provavelmente a mais significativa. A contaminação dos isoladores pode causar descargas nos mesmos, bem como interrupções no sistema elétrico (VITA; EKONOMOU; CHATZARAKIS, 2010), (ZHAO; XU; QI, 2016), (PYLARINOS; SIDERAKIS; THALASSINAKIS, 2015), (HUANG et al., 2018).

As transmissoras de energia elétrica costumam realizar inspeções regulares e oportunas nas linhas de transmissão. As inspeções voltadas para a detecção de descargas superficiais advindas do depósito de poluição sobre os isoladores costumam ser realizadas durante o período da noite em situações de elevada umidade relativa do ar. A partir das constatações feitas, pode ser necessário agendar ações de lavagem ou substituição das unidades isolantes. As inspeções são exaustivas, insalubres e os resultados são intimamente dependentes da experiência do inspetor.

De forma geral, as inspeções das Linhas de Transmissão (LTs), seus componentes e entornos representam, o estágio inicial do ciclo de manutenção, e a sua eficácia é crucial na determinação da confiabilidade do sistema e nos custos da manutenção do Sistema Elétrico (WAVRIK et al., 2011).

Transmissoras e concessionárias de energia do Brasil e do mundo estão preocupados com a confiabilidade de suas linhas de transmissão. Casos recorrentes estão acontecendo, problemas são relatados relativos a falhas de isolamento e rompimento de isoladores, em algumas situações os condutores das linhas estão indo ao chão. Diante disso, algumas transmissoras estão pagando valores expressivos de parcela variável por indisponibilidade, podendo chegar a milhões de reais.

O sistema de monitoração e inspeção de cadeia de isoladores necessita de uma técnica confiável e segura de teste que: não exija curto-circuito de um isolante (método Buzz); detecte grandes defeitos, bem como pequenos defeitos nos isoladores, principalmente poliméricos; alerte instantaneamente o inspetor de qualquer defeito condutivo que seja perigoso com uma indicação visual (seguro ou não para trabalhar na linha); dispositivo leve, rápido e fácil de realizar inspeção; inclua a contagem automática dos isoladores, registre as medidas e defeitos e suas localizações automaticamente; não dependa do julgamento humano para detecção de defeitos, melhore a eficiência e a produtividade dos inspetores e que seja uma ferramenta de manutenção útil; segura para operar em uma linha energizada; possa ser usado para obter estatísticas sobre o desempenho e a degradação de isoladores de porcelana e poliméricos instalados (ENG, 2017).

Diante deste cenário, a busca por técnicas que sejam eficazes de realizar um diagnóstico exato, rápido e com baixo custo é o maior desafio na análise dos fenômenos elétricos que envolvem os isoladores. Portanto, pesquisas e dispositivos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de identificar unidades da cadeia de isoladores que estão com defeitos ou falhas.

Vários sistemas de monitoração sobre isoladores vêm sendo objeto de estudo. Diferentes

parâmetros são estudados com o intuito de classificar os graus de risco de rompimento da isolação. Em complemento aos sistemas de monitoração, costuma-se realizar ensaios e simulações computacionais, os quais tendem a introduzir refinamentos dos sistemas.

Diante do exposto, esta pesquisa visa contribuir como um trabalho incipiente com um propósito maior, que é viabilizar a criação de um dispositivo de monitoração de defeitos em cadeia de isoladores, em que através da variação da distribuição de potencial sinalize uma anormalidade.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação é indicar um caminho através de um dispositivo incipiente que auxilie os inspetores de linhas de transmissão, em suas inspeções expeditas, a identificar de forma mais eficaz e celere defeitos ou falhas em cadeias de isoladores. Uma vez que, os dispositivos atuais ou não são aplicáveis para monitoração em tempo real. Ou seja, tem a sua aplicabilidade restrita avaliações *in loco*, com o auxílio de operadores. Algo que indique de forma barata e auxilie o inspetor, carece no mercado. Não precisa necessariamente dizer qual isolador da cadeia está defeituoso, visto que diversas técnicas estão consolidadas, mas somente alertar se a cadeia está com ou sem defeito/falha será de grande valia.

A pesquisa tem como objetivo geral viabilizar uma forma de identificação de defeitos em cadeia de isoladores de vidro em linhas aéreas de alta tensão a partir da variação de distribuição de potencial das próprias cadeias. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- obter o parâmetro capacitância a ser utilizado no modelo de cadeia de isoladores a partir de simulação computacional;
- aplicar do modelo elétrico do isolador cerâmico para avaliar possibilidade de indicação de defeitos;
- comparar a distribuição de potencial do modelo elétrico simulado entre *softwares* e ensaio laboratorial;
- analisar o comportamento dinâmico da cadeia de isoladores quando submetido a unidades em curto-circuito.

1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em etapas. Inicialmente, identificou-se um problema a ser estudado. A segunda etapa consiste no processo concomitante entre estudo detalhado dos assuntos necessários ao entendimento da pesquisa, revisão bibliográfica, leitura de trabalhos publicados e identificação do estado da arte na literatura.

Serão apresentados os isoladores de vidro utilizados nesta pesquisa, a metodologia empregada e ensaios laboratoriais realizados. Na sequência são apresentadas simulações computacionais de isoladores com o objetivo de vincular o ensaio de laboratório com o ambiente computacional. E por fim, será indicado um dispositivo que valida a possibilidade de utilizar a variação de potencial elétrico como parâmetro de identificação de defeito em cadeia de isoladores.

Este trabalho está estruturado da forma apresentada a seguir.

- **Capítulo 2 - Fundamentação teórica:** apresentar conceitos importantes para a compreensão do trabalho, tais como, dielétrico, estudo da distribuição de potencial em corpos isolantes, modelo elétrico de uma cadeia de isoladores, descargas parciais, apresentação do método dos elementos finitos e tipos de inspeção;
- **Capítulo 3 - Revisão bibliográfica:** descrever os trabalhos mais importantes relacionados ao tema em estudo, fazendo uma análise crítica em relação aos resultados perseguidos nesta pesquisa.;
- **Capítulo 4 - Material e métodos:** apresentação dos materiais empregados nos ensaios e nas simulações, bem como os métodos utilizados nos ensaios e simulações.
- **Capítulo 5 - Resultados e análises:** apresentação e discussão dos resultados obtidos a partir das simulações quando são realizadas feitas diversas considerações e interpretações pertinentes aos resultados obtidos.
- **Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros:** são feitas as considerações finais referentes as simulações computacionais e a experiência vivenciada ao longo dos estudos realizados e uma síntese dos resultados obtidos, como também são registradas sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos os principais tópicos que fundamentam o entendimento da pesquisa. Inicialmente são apresentados aspectos gerais acerca dos tipos de isoladores em linhas de transmissão, suas características construtivas e as principais vantagens e desvantagens. Também são introduzidos conceitos sobre os tipos de *gaps* em técnicas para medição de tensão. Por fim, são descritos alguns conceitos básicos sobre o método dos elementos finitos e também os tipos de inspeção tradicionalmente realizadas em linhas de transmissão.

2.1 MATERIAIS DIELÉTRICOS

Dielétrico ou materiais isolantes se caracterizam por apresentarem alta resistência à passagem de corrente elétrica, comparativamente ao valor intrínseco correspondente dos materiais condutores. Classificam-se de acordo com a facilidade com a qual as cargas elétricas se movem em seu interior, por exemplo, plásticos (usados para isolar condutores elétricos), a borracha, o vidro e a cerâmica. Tal comportamento resulta de determinadas propriedades dessa família de materiais, dentre elas os fenômenos de polarização e de perdas. Os dielétricos ideais podem ser estimados como materiais os quais todos elétrons estão fortemente ligados aos seus átomos e assim não podem participar do processo de condução elétrica. O fato das cargas elétricas presentes num dielétrico não serem livres não significa, na prática, que as mesmas estejam ligadas de forma absolutamente rígida umas às outras. Por outro lado os condutores são materiais em que as cargas elétricas se movem facilmente, como os metais (cobre dos cabos elétricos) (SCHMIDT, 1979) (WALKER; HALLIDAY; RESNICK, 2008).

A polarização das partículas elementares do dielétrico é uma de suas propriedades fundamentais. Pode-se antever o comportamento de um material quanto a sua polarização baseando-se na grandeza da constante dielétrica. Os dipolos dos materiais isolantes decorrem de um arranjo assimétrico das cargas positivas e negativas dos átomos ou moléculas. Geralmente essas cargas têm uma simetria elétrica, ou seja, os centros de cargas negativas e positivas coincidem. Sob a ação de um campo elétrico essas cargas experimentam uma distorção dessa simetria criando pequenos dipolos elétricos denominados "induzidos". Pode ocorrer que determinados tipos de materiais, em virtude de uma natural assimetria elétrica exibem a presença de dipolos "permanentes", cuja existência independe da ação do campo elétrico externo (LUNA, 2006).

Os dielétricos utilizados em eletrotécnica podem ser de origem natural ou sintética; de natureza animal, vegetal ou mineral e podem também classificar-se como orgânicos e inorgânicos.

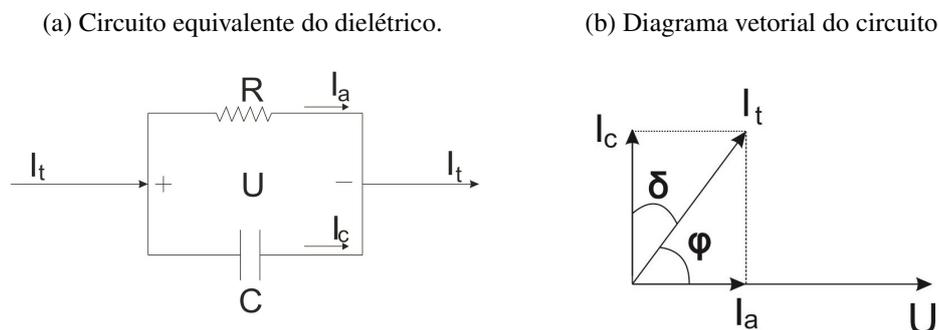
Vale salientar que determinados materiais isolantes desenvolvidos e utilizados desde o século XIX e que apresentam notáveis propriedades são ainda empregados atualmente, tais como, o papel impregnado com óleo mineral, a mica, a porcelana e o vidro, dentre outros.

2.1.1 Dielétrico ideal versus dielétrico real

Um dielétrico ideal teria uma condutividade nula. Entretanto na realidade, todos os materiais isolantes são um pouco condutores, ou seja, apresentam sempre uma certa condutividade, suficientemente fraca, de modo a permitir a sua utilização como elemento de separação entre peças condutoras submetidos a potenciais diferentes. A condutividade dos dielétricos depende fortemente da pureza e da estrutura dos materiais, bem como das condições de limpeza da superfície. As perdas nos materiais dielétricos podem ser causadas pela absorção de energia elétrica pelos efeitos friccionais entre os dipolos, resultantes da polarização, e pelas correntes de fuga que passam pelo material. Um dielétrico ideal não absorve energia elétrica, e a carga do capacitor é completamente recuperada quando da remoção do campo. Todavia, um dielétrico real sempre apresenta perdas de energia, muito embora, na maioria dos casos, sejam muito pequenas.

O circuito apresentado na Figura 1, representa o dielétrico real, em que a Figura 1(a), apresenta o modelo elétrico do dielétrico, e a Figura 1(b) ilustra o diagrama vetorial das correntes e tensões envolvidas deste circuito (LUNA, 2006). C representa a capacitância, elemento que caracteriza um dielétrico ideal e R a resistência associada as perdas contidas no dielétrico.

Figura 1 – Equivalente do dielétrico



Fonte: (LUNA, 2006)

2.1.2 Distribuição de potencial e campo elétrico em dielétricos

O cálculo da distribuição de potencial e do campo elétrico em dielétricos possui diversas aplicações, dentre estas: análise e diagnóstico de isoladores de linhas de transmissão (LEE et al., 2012b), (PARK et al., 2010); determinação dos níveis de estresse ao longo do isolador (PROJECT-EHV, 1968); projeto de isoladores, cerâmicos e não-cerâmicos, em linhas de transmissão (BASAVARAJA; SIVAKUMAR, 2012); determinação geométrica preferível de anéis equalizadores em cadeias de isoladores de alta tensão (BARROS; FERREIRA; COSTA, 2013); estudo da influência da poluição, ou neve, em cadeias de isoladores (BEZERRA et al., 2003), (VOLAT, 2013), (ASENJO; MORALES; VALDENEGRO, 1997); determinação da tensão de

ensaios (VILAR et al., 2012), entre outros. A determinação da distribuição de potencial e campo eletrostático na superfície dos isoladores são problemas de "valor de contorno", sendo dessa forma definidos os valores de potencial sobre a fronteira de algumas regiões do objeto estudado que permite à determinação do potencial em pontos que não possuem condições de contorno estabelecidos (LOPES, 2016).

Os problemas de eletrostática são modelados por *softwares* através das equações de Poisson (2.1) e Laplace (2.2), que são utilizadas para a determinação do potencial ao longo de todo o problema (superfície, interior e meio envolvente).

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.1)$$

em que: ρ_v - densidade volumétrica de carga [C/m^3]; ϵ - permissividade do material [F/m]; V - potencial elétrico [V].

Se a região não contém cargas livres, isso é, $\rho_v = 0$, então a equação de Poisson torna-se a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.2)$$

Uma estratégia eficaz de estudo é calcular o potencial elétrico e depois extrair o campo elétrico através do gradiente do potencial, visto que essas grandezas estão diretamente relacionadas, como mostrado na Equação (2.3) (LOPES, 2016).

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (2.3)$$

Em que: E - intensidade de campo elétrico em [V/m] e V - potencial elétrico [V].

O estudo do potencial elétrico torna-se fundamental, pois o nível de tensão elétrica sofre variações ao decorrer da sua distância de escoamento (distância entre o ponto de maior potencial ao de menor), desse foma, o estudo facilita a visualização da região de maior estresse elétrico do dielétrico.

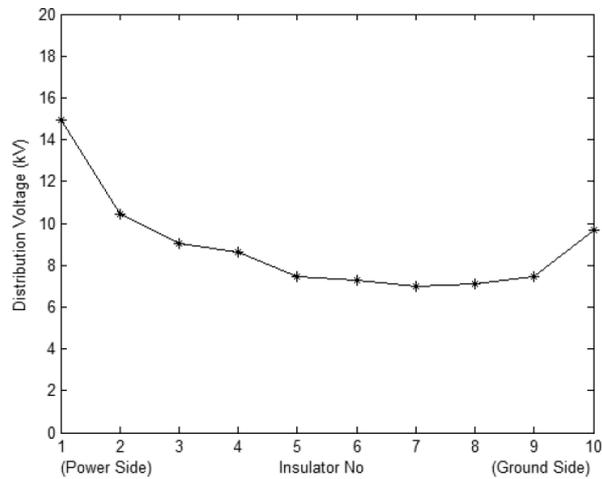
Na Figura 2 é apresentado um exemplo de distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento em uma cadeia de isolador cerâmico.

2.2 MODELO ELÉTRICO DE UMA CADEIA DE ISOLADORES

Apresenta-se neste tópico o modelo elétrico da cadeia de isoladores, como também, a demonstração através de formulações analíticas a distribuição de tensão ao longo da cadeia conforme (SCHWAIGER, 1925).

Considere o seguinte caso: imagine vários corpos metálicos, por exemplo esferas de metal, dispostos no espaço. A posição dessas esferas uma em relação à outra é arbitrária, a única condição a ser considerada é que elas estejam isoladas eletricamente umas das outras, como mostra a Figura 3. Mergulhando este sistema em uma grande cuba preenchida com um eletrólito

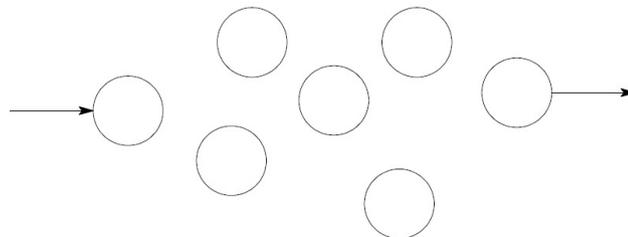
Figura 2 – Exemplos de distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento em cadeia de isolador cerâmico



Fonte: (LEE et al., 2012a).

e aplicando tensão entre duas dessas esferas, assim a corrente entra no sistema por uma esfera, se ramifica para todas as outras, e sai por outra esfera. O objetivo é determinar a tensão entre duas esferas individuais. Para resolver este problema, a resistência entre duas esferas deve ser conhecida, assim, calcula-se a corrente entre elas e conseqüentemente a tensão entre os eletrodos individuais será conhecida. Não se considera apenas uma resistência entre duas esferas, porque os caminhos de corrente não estão concentrados em apenas uma linha de conexão entre duas esferas. Entretanto, assumindo que a corrente desse sistema seja uma que flua somente na linha de conexão mais curta, e atribuindo uma resistência tal, que a distribuição de tensão seja a mesma que a do fluxo de corrente real.

Figura 3 – Conjunto de eletrodos



Fonte: Adaptado de (SCHWAIGER, 1925).

Trazendo as considerações para o problema presente, ou seja, o corpo do sistema não é

preenchido por um eletrólito, mas sim por um dielétrico. A distribuição de tensão, que ocorre quando dois eletrodos são conectados a uma fonte de energia, é agora determinado na Figura 3 não mais por resistores, mas sim por capacitâncias entre os eletrodos individuais. Anteriormente conhecia-se o valor das resistências para determinar a distribuição de tensão no eletrólito, a situação atual deve-se conhecer as capacitâncias entre os eletrodos. Sendo essas capacitâncias possíveis de serem calculadas entre dois eletrodos, podendo estas serem placas, cilindros ou esferas. No entanto, presume-se que apenas dois eletrodos estão presentes e que o campo é determinado apenas por eles. Se houver mais de dois eletrodos, como na Figura 3, o campo entre duas esferas é diferente do que se houvesse apenas duas esferas.

As condições na prática, no entanto, são tais que as posições dos eletrodos não são tão irregulares como mostrado na Figura 3. Há sempre certas simetrias e regularidades. Além disso, os eletrodos estão sempre tão próximos um do outro permitindo o cálculo dos valores das capacitâncias encontradas para dois eletrodos sem grandes erros. No que diz respeito às simetrias que estão sempre presentes em arranjos técnicos, podem-se distinguir entre os casos descritos a seguir:

1. Cadeia de capacitores em série

Os eletrodos estão dispostos de tal modo que cada eletrodo tem apenas capacitância com o seu eletrodo vizinho. A disposição é mostrada na Figura 4, onde é assumido novamente por uma questão de simplicidade que os K eletrodos individuais são esferas. O primeiro eletrodo, a esquerda, está ligado a fase (L) e o último eletrodo está ligado a terra (T). Se as capacitâncias entre duas esferas sucessivas são representadas por um capacitor (C), o circuito equivalente mostrado na figura 4 é obtido. Observa-se que todos os capacitores estão conectados em série, então chama-se o arranjo elétrico de "Cadeia de capacitores em série".

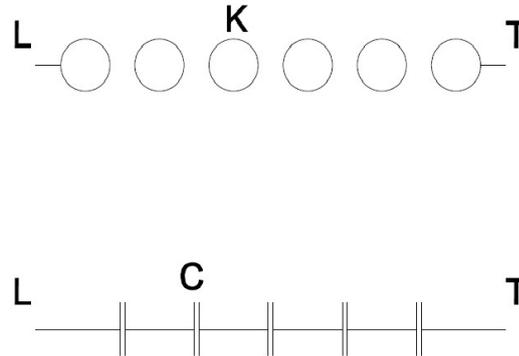
2. Cadeia de capacitores com simples concatenação

A Figura 5 mostra o arranjo no qual cada eletrodo tem capacitância entre o seu eletrodo vizinho, como também entre um terceiro eletrodo comum T . Por meio deste eletrodo, todos os outros são assim "concatenados" uns aos outros. Normalmente, este terceiro eletrodo é a própria Terra, ou uma parte estrutural próxima conectada à Terra.

3. Cadeia de capacitores com dupla concatenação

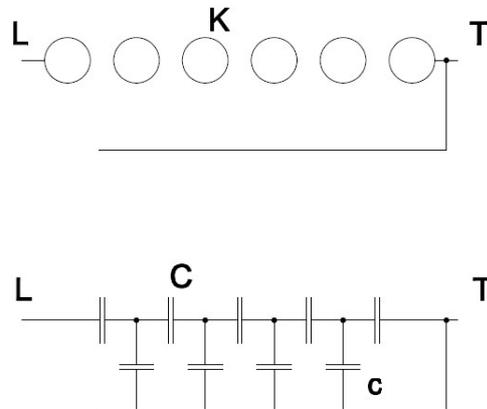
A figura 6 mostra o arranjo, vê-se que todos os eletrodos estão conectados capacitivamente a outros dois eletrodos, sendo estes L e T , e também estão conectados ao eletrodo vizinho pertencente a cadeia.

Figura 4 – Cadeia de capacitores em série



Fonte: Adaptado de (SCHWAIGER, 1925).

Figura 5 – Cadeia de capacitores com simples concatenação



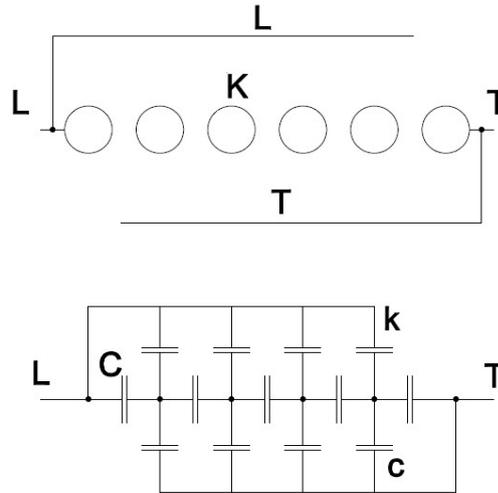
Fonte: Adaptado de (SCHWAIGER, 1925).

2.3 ESTUDOS DE DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL PARA A CADEIA DE CAPACITORES COM DUPLA CONCATENAÇÃO

O cálculo da distribuição de potencial em estruturas isolantes é de extrema importância e bastante utilizado, dessa forma torna-se relevante apresentar o desenvolvimento da equação de distribuição de potencial para o modelo da cadeia de capacitores com dupla concatenação.

Este tipo de arranjo é representado por um conjunto de esferas de tamanhos uniformes

Figura 6 – Cadeia de capacitores com dupla concatenação



Fonte: Adaptado de (SCHWAIGER, 1925).

dispostas em série. Obviamente tem-se entre as esferas a representação de um capacitor uma vez que, as esferas são assumidas inicialmente do mesmo tamanho, estas capacitâncias C ligadas em série, possuem a mesma medida. Ao lado da fileira de capacitores em série está disposto o eletrodo T , o qual está conectado da primeira esfera até a última, através da capacitância c . Portanto, cada esfera está conectada ao eletrodo T , este representando a terra, a capacitância entre as esferas e a terra é representada por c . Pode-se assumir também que estas capacitâncias possuem a mesma medida. Por fim, existe outro eletrodo (o condutor), surgindo um novo grupo de capacitâncias das esferas ao condutor, representadas igualmente pela letra k , na Figura 6.

Agora o problema é determinar a tensão entre as esferas em série, entre as esferas e o eletrodo aterrado, e as esferas e o condutor. Para então, calcular o estresse no material isolante. É de se esperar que a tensão entre cada unidade esférica ao longo da cadeia seja diferente, pois a corrente que passa entre as unidades será diferente.

Como explicitado anteriormente, neste tipo de arranjo além da capacitância C entre as unidades, tem-se a capacitância c entre a unidade e a terra, e também a capacitância k de uma unidade para o condutor, como ilustrado na Figura 6. Com o intuito de desenvolver a formulação analítica da distribuição de tensão ao longo da cadeia de isoladores, assume-se inicialmente que as capacitâncias C , c e k são da mesma ordem de grandeza. A distribuição de potencial ao longo da cadeia capacitiva será resolvida através do auxílio das equações diferenciais resolvidas por (RUEDENBERG, 1915) mostradas a seguir:

$$C \frac{d^2 U_n}{dn^2} = c U_n + k (U_n - U_g), \quad (2.4)$$

em que U_n representa a tensão [V]; U_g define a tensão nominal aplicada a cadeia capacitiva [V]; C corresponde a capacitância entre as unidades [F]; c corresponde a capacitância entre as unidades e a terra [F]; k corresponde a capacitância entre as unidades e condutor [F]; n representa o identificador do capacitor na cadeia capacitiva. Essa é a equação diferencial do circuito, a qual só é válida, se a quantidade de capacitores da cadeia capacitiva for grande e as diferenças das tensões sucessivas forem pequenas (SCHWAIGER, 1925).

Assim sendo a equação 2.4, pode ser re-escrita:

$$C \frac{d^2 U_n}{dn^2} = (c + k) \left(U_n - \frac{k}{c + k} U_g \right), \quad (2.5)$$

substituindo

$$v = U_n - \frac{k}{c + k} U_g, \quad (2.6)$$

obtém-se então

$$\frac{d^2 v}{dn^2} = \frac{c + k}{C} v. \quad (2.7)$$

A resolução da Equação (2.7) leva ao resultado apresentado na Equação (2.8).

$$v = A e^{+\beta n} + B e^{-\beta n} \quad (2.8)$$

na qual

$$\beta = \sqrt{\frac{c + k}{C}} \quad (2.9)$$

Usando as condições de contorno descritas nas Equações (2.10) e (2.11) para a determinação das constantes de integração, se obtém o resultado final apresentado na Equação (2.12)

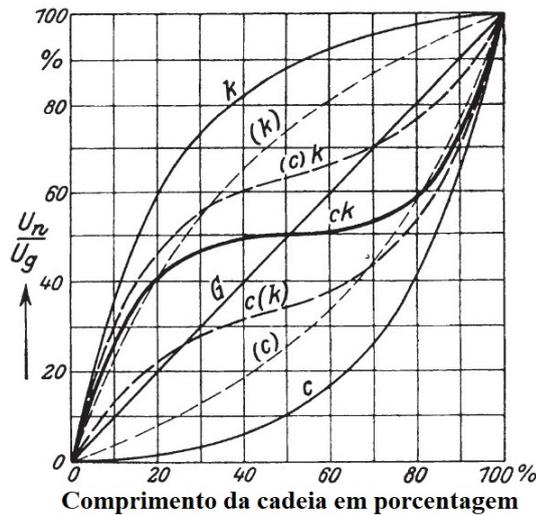
$$n = 0; \quad U_n = 0 \quad (2.10)$$

$$n = z; \quad U_n = U_g \quad (2.11)$$

$$U_n = \frac{U_g}{\beta^2 \sinh \beta z} \left(\frac{c}{C} \sinh \beta n + \frac{k}{C} \sinh \beta (n - z) + \frac{k}{C} \sinh \beta z \right). \quad (2.12)$$

Na Figura 7 são mostradas algumas curvas da família derivada da equação (2.12). O eixo das abscissas representa a unidade da cadeia de isolador e o eixo das ordenadas é a relação entre $\frac{U_n}{U_g}$.

Figura 7 – Distribuição de potencial ao longo de uma cadeia de isoladores



Fonte: adaptado de (SCHWAIGER, 1925).

Para o caso quando $c=k$ tem-se que a distribuição de potencial possui uma curva simétrica, representada por ck . Pode ser visto que a primeira e a última unidade capacitiva são igualmente estressadas, e também são as duas unidades mais estressadas.

Para o caso quando $k=0$, temos a curva c , no qual satisfaz a seguinte equação:

$$U = U_g \frac{\sin(\sqrt{\frac{c}{C}} n)}{\sin(\sqrt{\frac{c}{C}} z)}. \quad (2.13)$$

Para o caso quando $c=0$, temos a curva k , no qual satisfaz a seguinte equação:

$$U = U_g \frac{\sin(\sqrt{\frac{k}{c}}(n-z)) + \sin(\sqrt{\frac{k}{c}}z)}{\sin(\sqrt{\frac{k}{c}}z)}. \quad (2.14)$$

Entre as curva c e k estão as curvas da família da equação (2.12). A reta central G representa a distribuição de tensão quando os parâmetros (c) e (k) são desprezados.

As curvas c e k foram traçadas por superposição. Embora a aplicação do teorema da superposição não seja, em princípio, válida, o erro que surge é tão pequeno que a superposição pode ser aplicada sem hesitação na prática.

2.4 ISOLADORES CERÂMICOS

Os isoladores têm as funções de suportar mecanicamente e isolar eletricamente regiões com potenciais elétricos distintos. Eles estão expostos a tensões elétricas, mecânicas e diferentes condições ambientais. O peso do condutor, o vento e o gelo geram tensões mecânicas. O clima e os arredores (indústria, poeira rural, regiões costeiras, etc.) produzem estresses adicionais. Os isoladores devem suportar essas tensões por longos períodos de tempo. Prevê-se que uma linha ou subestação funcionará por mais de 20 a 30 anos sem alterar os isoladores. No entanto, a manutenção regular é necessária para minimizar o número de falhas por ano. Um número típico de falhas causadas por falhas de isolamento é de 0,5 a 10 por ano, a cada 100 milhas de linha de transmissão (SINGH, 2008).

Os isoladores de linhas de transmissão estão ligados à torre e suportam os condutores. Em torres de suspensão, os isoladores estão em uma posição vertical ou em arranjo tipo "V". Em torres de fim de linha, os isoladores estão na posição horizontal. Linhas de transmissão típicas são dividida em seções por duas torres "fins de linha" onde começam/terminam cada seção. Entre 6 e 15 torres de suspensão estão instaladas duas torres "fins de linha". Esta seccionalização evita a propagação de uma falha mecânica catastrófica além da seção. Por exemplo, um tornado derruba uma ou duas torres ocasionando um efeito dominó, resultaria no colapso de muitos quilômetros de torres (SINGH, 2008).

Os isoladores individualmente ou na forma de cadeias apresentam, além de isolamento elétrica, resistência mecânica suficiente para suportar os esforços provenientes do levantamento do cabo, peso do cabo, peso dos outros isoladores da cadeia, temperatura e ação do vento. O uso de cadeias de isoladores nas linhas de transmissão também reduz a vibração mecânica transmitida à torre. A determinação do número de isoladores de uma cadeia é baseada nos valores das sobretensões previstas a classe de tensão e a configuração do sistema elétrico.

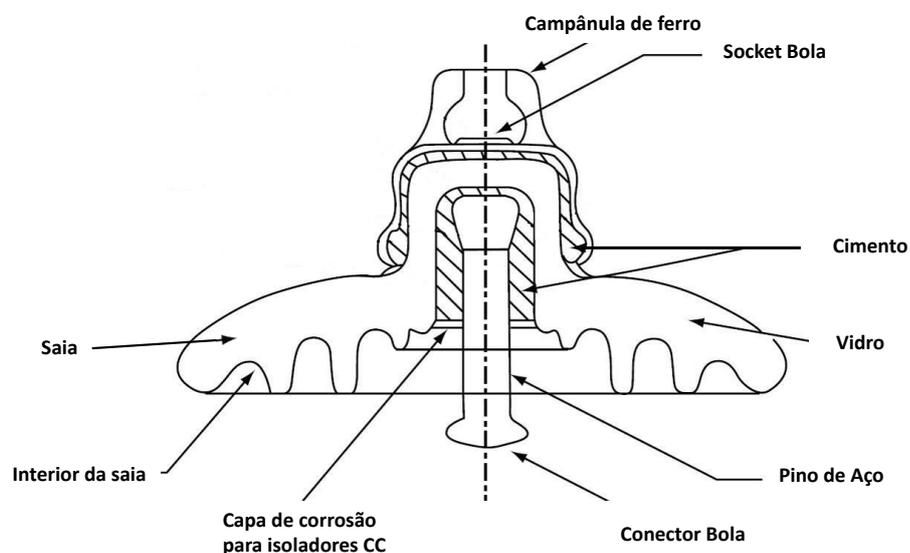
Os isoladores devem resistir tanto às solicitações elétricas quanto mecânicas. As solicitações de natureza elétrica são: tensão nominal de operação; sobretensões temporárias;

sobretensões de origem atmosférica, cujas intensidades podem ser muito elevadas e variadas e; surtos de sobretensão de manobra (LINGS, 2005).

A falha em um isolador pode ocorrer tanto no interior do material (perfuração) como pelo ar que o envolve (descarga externa). Dessa forma, o isolador deve ter formato apropriado para garantir o isolamento a ele imposto, nas condições mais adversas.

No aspecto construtivo, o isolador de vidro é constituído por uma campânula, disco de vidro temperado, pino de aço e cimento, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Seção transversal isolador padrão de esfera e soquete



Fonte: Adaptado de (DORF, 1995).

Dentre as vantagens do isolador de vidro constata-se: resistência a deterioração por radiação ultravioleta; alta resistência mecânica, uma vez que utilizam cimento de alumina, o que reduz a penetração de água e o problema de *head cracking* (quebra da cabeça), um grande impacto, como uma bala, pode quebrar a saia de vidro, mas não reduz a resistência mecânica da unidade; fácil identificação de unidades defeituosas; elevada rigidez dielétrica. Como desvantagens, isoladores de vidro apresentam peso elevado e são atrativos ao vandalismo, já que estilhaçam quando alvejados (SINGH, 2008).

2.5 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ALTA TENSÃO

Para realizar um ensaio de Alta Tensão (AT) é essencial haver a integração de vários recursos técnicos que requerem estudos específicos. Esses recursos envolvem geração, controle e medição de AT. Os engenheiros e técnicos que trabalham em laboratórios de AT devem ter conhecimento sobre cada um desses recursos e devem ter uma noção de como integrá-los para poder realizar os ensaios.

2.5.1 Fontes de alta tensão

As fontes de alta tensão podem ser divididas em duas categorias: fontes de alta tensão em corrente alternada e fontes de impulso de tensão.

Os transformadores elevadores são umas das maneiras de se obter altas tensões. Considerando que, o principal propósito dos ensaios de alta tensão é analisar o desempenho dielétrico dos equipamentos, o transformador elevador utilizado como fonte não necessita ter potência elevada, isto é, normalmente alguns miliampères de corrente são suficientes. Nesta perspectiva, o transformador utilizado como fonte de alta tensão nos ensaios difere dos transformadores de potência, tornando-o mais compacto, versátil e economicamente viável para os laboratórios.

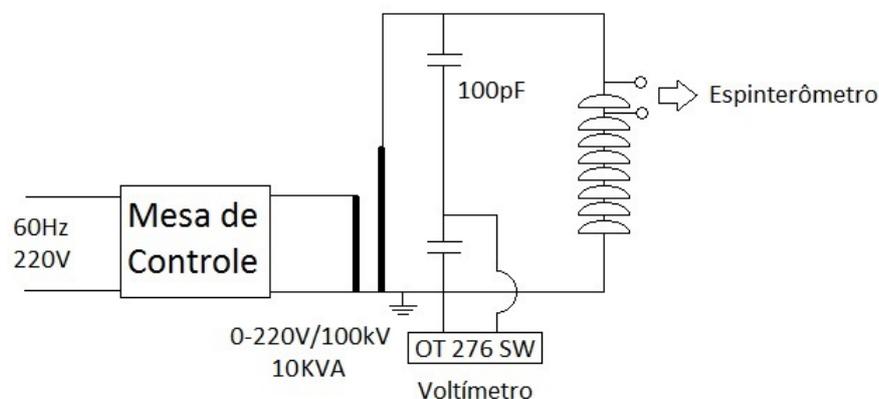
2.5.2 Medição em alta tensão

Pode-se dizer que a medição é uma das partes mais importantes de um ensaio, uma vez que é baseado nela que todos os resultados são obtidos, e uma medição com baixa confiabilidade compromete a precisão e exatidão do ensaio.

Um fato importante a se considerar é que para toda medida, que é o resultado de uma medição, existe uma incerteza associada. A incerteza é uma estimativa caracterizando a faixa de valores em torno do resultado de uma medida, dentro da qual o valor verdadeiro da medida pode-se encontrar.

Um sistema de medição inclui um dispositivo de conversão, um sistema de transmissão e os instrumentos indicadores ou de registro. Um exemplo de um sistema de medição é ilustrado na Figura 22, composto por regulador transformador, transformador de alta tensão, resistor, divisor de tensão capacitivo.

Figura 9 – Diagrama da montagem laboratorial



Fonte: O Autor.

Um dos componentes de um sistema de medição citado anteriormente é o divisor de tensão, que é constituído pela associação série de dois capacitores (C_1 e C_2). As impedâncias dos capacitores caracterizam a unidade primária ou de alta tensão e a unidade secundária ou de baixa tensão do divisor. É o divisor de tensão que conecta o sistema de medição à alta tensão. O divisor não deve interferir no ensaio então a impedância da unidade de alta tensão deve ter um limite mínimo. Sua classificação é feita pelo tipo de impedância de alta tensão e dependendo da natureza da tensão a ser medida é utilizado um tipo específico. No momento da medição é preciso saber qual é o fator de escala associado ao sistema em uso. O fator de escala é o fator pelo qual a tensão registrada na instrumentação deve ser multiplicada para saber qual o valor da alta tensão aplicada ao objeto sob ensaio.

2.5.3 Medição utilizando *Gaps* esféricos

Medição de alta tensão envolve problemas incomuns que podem não ser familiares aos especialistas nas técnicas comuns de medição elétrica. Esses problemas aumentam com a magnitude da tensão, mas ainda são fáceis de resolver para tensões de aproximadamente 10 kV, e tornam-se difíceis em caso de centenas de quilovolts ou megavolts tiverem que ser medidos. As dificuldades estão principalmente relacionadas às grandes estruturas necessárias para controlar os campos elétricos, evitar o flashover e, às vezes, controlar a dissipação de calor dentro dos circuitos (KUFFEL; KUFFEL, 2000).

Gaps esféricos isolados pelo ar atmosférico podem ser usados para medir a amplitude de tensões da ordem de quilovolts. O complexo fenômeno desse efeito físico é empregado também na proteção de equipamentos contra sobretensões. Os *gaps* esféricos usados para fins de medição devem ser aplicados seguindo determinadas regras e recomendações, dessa forma o mau uso pode ser evitado através de estudos adequados dos fenômenos físicos.

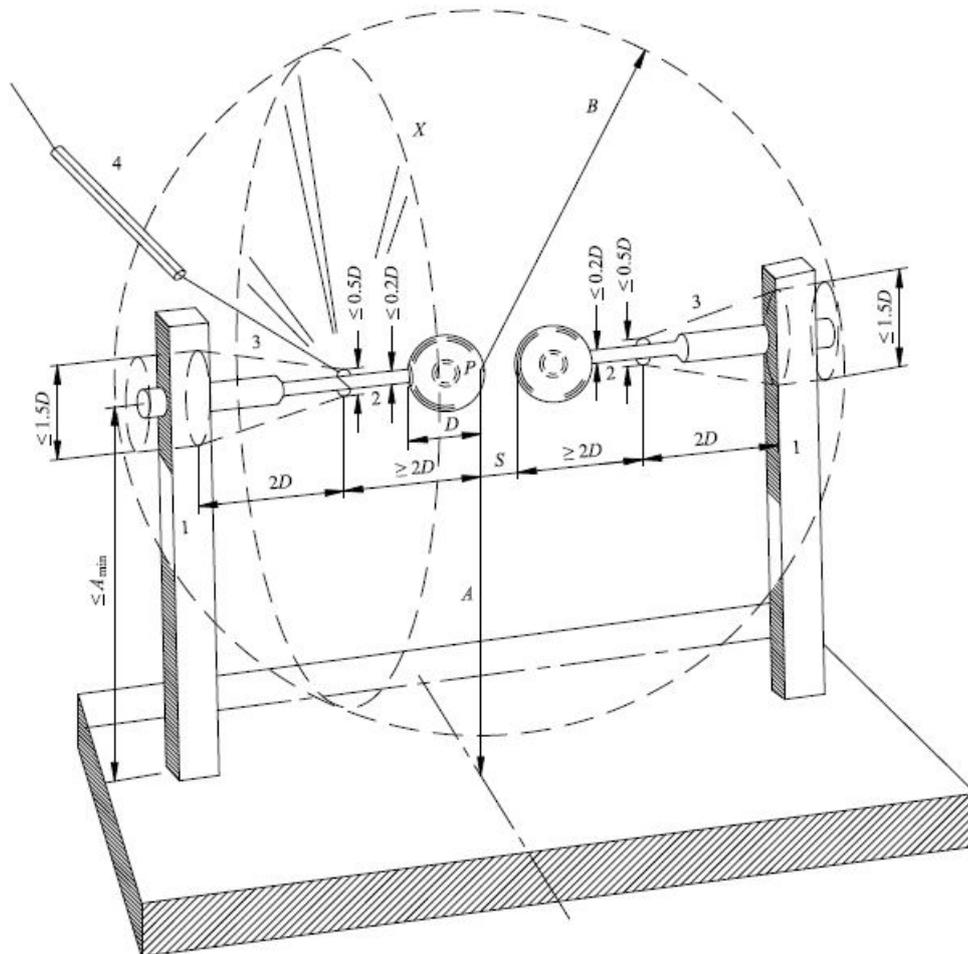
A rápida transição de um estado completamente isolante, ou altamente isolante, de um *gap* para o estado de arco de alta condução é usada para determinar um nível de tensão, a descarga disruptiva não oferece uma leitura direta da tensão através do *gap*. Um curto-circuito completo é o resultado de uma faísca e, portanto, a fonte de tensão deve ser capaz de permitir tal curto-circuito, embora as correntes possam e às vezes devem ser limitadas por resistores em série com o *gap*. Dispositivos mais precisos e fáceis de usar incorporando circuitos eletrônicos são geralmente aplicados para medições de rotina. Mas esses circuitos são geralmente sensíveis a efeitos eletromagnéticos e podem, às vezes, deixar de funcionar (KUFFEL; KUFFEL, 2000).

A medição de tensão por meio de um *gap* centelhador consiste em estabelecer a relação entre a tensão no circuito de teste e a indicação de um voltímetro no circuito de controle. Em essência, o valor de pico da tensão é obtido a partir do dispositivo de medição conectado ao lado de baixa tensão quando ocorre centelha no *gap*. A menos que o contrário possa ser mostrado, a relação estabelecida deixa de ser válida se o circuito for alterado em qualquer aspecto que não seja devido a mudança no espaçamento dos eletrodos. Como a tensão na qual o centelhador

se acende é calculada a partir do espaçamento entre os eletrodos e alguns outros parâmetros físicos do equipamento, o gap deve ser medido por um método compatível com a incerteza geral da medição de tensão. Os gaps esféricos não são recomendados para a medição de tensões diretas devido ao comportamento imprevisível dos *gaps* devido as partículas do ar. Essas causam descargas disruptivas em tensões inferiores às calculadas a partir das dimensões (IEEE... , 2013).

O *gap* esférico padrão é um dispositivo de medição de tensão de pico construído e concebido de acordo com padrão a ser apresentado. As localizações das duas esferas que estão mais próximas umas das outras são chamadas de pontos de centelamento. A Figura 10 mostra o arranjo típico, com eixo horizontal em que:

Figura 10 – Gap esférico horizontal



Fonte: (IEEE... , 2013).

1. suporte isolante;
2. haste da esfera;
3. mecanismo de variação do gap, mostrando as dimensões máximas;

4. conexão de alta tensão com resistor em série.

P - Ponto de ignição da esfera de alta tensão;

A - Altura do P acima do plano do solo;

B - Raio de espaço livre de estruturas externas;

X - Item 4 não passa pelo plano X dentro de uma distância B de P ;

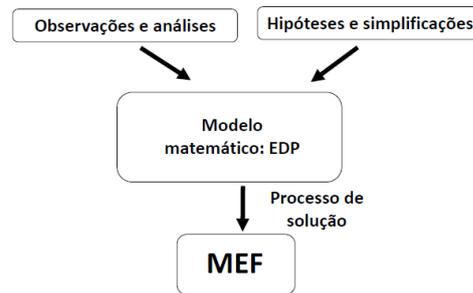
2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Estruturas de engenharia complexas foram construídas com sucesso nos últimos séculos, mesmo sem o uso de qualquer ferramenta computacional de projeto ou simulação. No entanto, transformações vêm ocorrendo nas últimas décadas na área de projetos e análises baseados em computação. Essa tem se tornado cada vez mais importantes em todas as áreas de alta tecnologia. Esse foco computacional permite que as empresas de engenharia realizem reduções de custo significativas no processo de projeto e desenvolvimento, devido à menor necessidade de modelos físicos e experimentos reais.

Além disso, a imagem do profissional de engenharia está mudando dinamicamente e novos requisitos da revolução digital estão sendo exigidos, ou seja, para trabalhar na área de projeto e simulação integrados, exige-se foco mais forte em ferramentas de análise computacional. Em abordagens tradicionais de engenharia, as áreas de design e simulação seriam representadas por diferentes departamentos de uma empresa. No entanto, o desenvolvimento de pacotes avançados de software de projeto e simulação e um poderoso *hardware* de computador mescla essas áreas em um novo ambiente virtual. Os funcionários com essas habilidades são necessários no atual contexto de engenharia em todo o mundo, onde tecnologias como "computação em nuvem" fazem parte da rotina diária. A interação entre projeto e simulação é representada principalmente por *softwares* como o *computer-aided design* (CAD), programa que permitem a modelagem da geometria de uma estrutura de engenharia, e pacotes de simulação, por exemplo, com base no método dos elementos finitos (MEF). Isso pode ser feito por diferentes programas ou por uma incorporação de ambos os pacotes em uma interface comum.

Engenheiros descrevem fenômenos físicos e processos tipicamente por equações, particularmente por equações diferenciais parciais. Nesse contexto, a derivação e a solução dessas equações diferenciais é tarefa dos engenheiros, obviamente exigindo conhecimentos fundamentais da física e da matemática (ÖCHSNER, 2016).

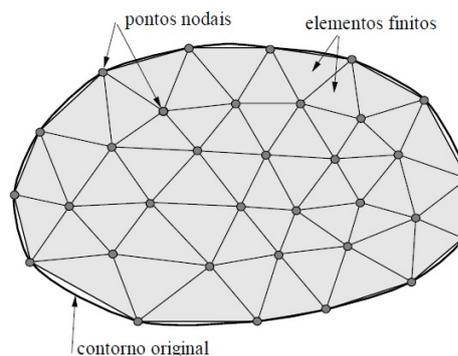
Figura 11 – Metodologia baseada em equações diferenciais parciais.



Fonte: adaptado de (ÖCHSNER, 2016).

No entanto, com exceção de alguns casos particulares, não é possível obter uma solução analítica exata dessas equações. Quando as complexidades das equações teóricas tornam as soluções intratáveis analiticamente, recorre-se a métodos não analíticos, o que inclui: métodos gráficos, métodos experimentais, métodos analógicos e métodos numéricos. Esse último tem ganhado destaque e tem se tornado mais atrativo com o advento dos computadores digitais cada vez mais rápidos (SADIKU, 2004). Dentre os métodos numéricos destaca-se o (MEF), usado para resolver problemas regidos por equações diferenciais e um conjunto de condições de contorno. A principal ideia por trás do método consiste na representação do domínio através de subdomínios menores chamados de elementos finitos. Pode-se observar tais domínios através da Figura 12.

Figura 12 – Malha simples de elementos finitos.



Fonte: (SOUZA, 2003).

A aplicação do MEF pode ser dividido em etapas que são: o pré-processamento, que envolve a elaboração do problema a ser estudado (geometria, materiais, condições de contorno, variáveis de interesse, etc.) e a divisão do domínio em elementos finitos podendo ter uma, duas

ou três dimensões; o processamento, que consiste na construção do sistema a ser resolvido na forma matricial através de algum método numérico; e finalmente o pós-processamento, que busca a solução do sistema, procurando exibi-la na forma de tabelas ou gráficos.

Segundo (SADIKU, 2004), a análise de problemas através do MEF envolve basicamente quatro passos. O uso prático do MEF, entretanto, impõe a adição de um quinto passo, os quais são: discretização, equacionamento dos elementos, junção dos elementos, solução do sistema e visualização (FERREIRA, 2007).

2.7 TIPOS DE INSPEÇÃO EM CADEIA DE ISOLADORES

As inspeções em isoladores de linhas de transmissão se dividem basicamente em dois grupos: terrestre e aérea. Periodicamente as inspeções em isoladores são efetuadas juntamente com a inspeção nos demais componentes da linha.

O objetivo das inspeções é detectar defeitos. Como defeito entende-se qualquer alteração física ou química no estado de um componente ou instalação, não causando o término de sua habilidade em desempenhar sua função requerida, porém podendo a curto ou longo prazo, acarretar sua indisponibilidade.

Os inspetores devem estar especialmente atentos para os seguintes aspectos dos isoladores cerâmicos e de vidro: sinais de fissuras ou trincas (nos cerâmicos); deterioração da cimentação; peças quebradas ou com pedaços arrancados; marcas de queima; sinais de poluição e pontos de corrosão em suas ferragens integrantes.

2.7.1 Inspeção terrestre

As inspeções terrestres são executadas por equipes formadas em média por cinco ou seis componentes, podendo variar, utilizando carro com tração nas quatro rodas, de preferência. As inspeções terrestres são de dois tipos básicos: visual e por instrumento.

As inspeções visuais variam conforme o detalhamento necessitado e das características da instalação, podendo ser divididas em três tipos: inspeção minuciosa, inspeção expedita e inspeção específica.

A inspeção minuciosa é realizada em toda extensão da linha e sua característica principal é que as estruturas devem ser escaladas e todo tipo de defeito anotado, quer sejam de evolução rápida ou lenta. O estado das cadeias é examinado de perto. Normalmente se lança mão do auxílio de binóculo para uma observação mais criteriosa. As empresas adotam critérios variados para determinar a periodicidade deste tipo de inspeção, no entanto, os mais comuns são a importância da instalação, o histórico de defeitos encontrados e a idade da instalação. As periodicidades mais comuns no Brasil são bienal e trienal, com tendência a aumentar este prazo, com base no conhecimento da evolução dos defeitos e mapeamento dos pontos críticos em cada instalação (já existem casos de quinenal ou mais) (GARCIA; SANTOS; FRANCO, 2008).

Na inspeção do tipo expedita existe a obrigatoriedade de passar em todas as estruturas, porém sem necessidade de escalá-las. A inspeção é dirigida para defeitos que podem ameaçar a integridade da LT em espaço de tempo curto, isto é, defeitos de evolução rápida. O uso de binóculos ou lunetas é indispensável. A periodicidade deste tipo é, na maioria das empresas, anual acontecendo alguns poucos casos de semestral (GARCIA; SANTOS; FRANCO, 2008).

A inspeção específica é realizada apenas para trechos da linha em que um determinado defeito ou situação tem sido detectado com frequência, constituindo assim um ponto crítico. Neste tipo também se encaixam inspeções para investigação de ocorrências repetidas, sem identificação da causa e suspeitas de isoladores com defeito (GARCIA; SANTOS; FRANCO, 2008).

Não existe uma periodicidade estabelecida como regra geral, pois o que determina a existência de ponto crítico pode ser de natureza diversa e de evolução diferenciada entre os vários pontos identificados em uma linha. Como por exemplo: trecho com vandalismo é tratado de forma diferente de trecho com poluição severa (esta severidade varia de local para local e determina a periodicidade da inspeção).

2.7.2 Inspeção aérea

As empresas têm lançado mão desta ferramenta, que se vislumbra ser cada vez mais necessária para fiscalizar o estado de suas instalações. O que pode ser detectado pela inspeção visual aérea é equivalente ao que se percebe na inspeção terrestre expedita, com a vantagem do tempo de execução. As inspeções realizadas com aeronaves tripuladas, através de helicópteros, além do custo elevado, estão sujeitas a acidentes com riscos à vida humana. A velocidade normal da inspeção visual é de 60 km/h. Na média a velocidade fica um pouco menor variando com a quantidade de defeitos encontrados (é normal solicitar uma redução na velocidade ou um retorno para observar melhor um provável defeito) (GARCIA; SANTOS; FRANCO, 2008).

O uso de binóculo e máquina fotográfica digital são auxílios suplementares que devem ser levados em conta. A periodicidade da inspeção aérea visual é idêntica à da terrestre expedita, isto é anual, com poucos casos de semestral considerando em média para o sistema de transmissão. Em algumas concessionárias, a realização da inspeção aérea visual substitui a inspeção terrestre expedita. O helicóptero também tem sido usado para inspeções específicas, com periodicidade nos moldes da terrestre específica, isto é, depende do objeto que está sendo investigado. Estes casos são mais usuais quando a aeronave pertence à empresa concessionária (GARCIA; SANTOS; FRANCO, 2008).

Os instrumentos usados nas inspeções aéreas são: termovisor, detector de ultravioleta (UV), os mesmos utilizados nas inspeções terrestres, e câmera de filmagem.

Existem duas formas de usar o termovisor: manualmente - operado de dentro do helicóptero por inspetor - e com o instrumento preso na fuselagem da aeronave operado através

de comando instalado na cabine dos passageiros. Atualmente algumas empresas usam uma associação de câmara de filmagem de alta resolução e termovisor, ambos instalados na fuselagem do helicóptero em um equipamento chamado “Gimbal” que garante a estabilidade das imagens e permite diferentes graus de liberdade de movimentação dos equipamentos. Um software que acompanha os equipamentos grava e estoca as imagens, com os dados georeferenciados.

A periodicidade da inspeção termográfica é trienal. Algumas empresas associam a Inspeção Aérea Termográfica com a Aérea Visual, que no caso substitui a inspeção Terrestre Exedita. As empresas que usam a associação com câmara de filmagem adotam a inspeção com periodicidade anual, substituindo a inspeção terrestre expedita, pois a filmagem em alta resolução permite a análise do estado da linha em escritório.

O detector de UV é operado por inspetor de dentro do helicóptero. Atualmente é usado apenas para inspeções específicas, portanto com periodicidade que varia com o tipo de defeito em investigação.

Outra alternativa de inspeção aérea é o uso dos Veículos Aéreos Não Tripuláveis (VANTS), conhecido também como *drones*. Essa tecnologia possui grande flexibilidade para inspeções não planejadas e emergências noturnas, contrastando com as limitações operacionais de velocidade de resposta características das aeronaves tripuladas. Esse aumento de flexibilidade tende a intensificar as ações de manutenção preventiva com ganhos em termos da confiabilidade do sistema. Entretanto a autonomia de vôo desses dispositivos tem limitado a disseminação do uso generalizado desse tipo de ferramenta (WAVRIK et al., 2011).

2.8 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

O coeficiente de determinação (R_2) é um indicador utilizado em estudos de engenharia, seu valor varia entre 0 e 1, indicando, o quanto, o modelo consegue reproduzir os valores de observações em estudo. A forma de calcular esse parâmetro está mostrada na equação:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.15)$$

em que SSE : somatório da diferença dos quadrados entre o sinal em estudo e o sinal modelo e SST é o somatório da diferença dos quadrados entre o sinal em estudo e a média deste sinal (DAVID et al., 1972 apud DIAS et al., 2017).

O coeficiente R_2 foi aplicado no estudo, com o objetivo de quantificar a aderência entre as curvas obtidas por meio dos ensaios de tensão aplicada e as curvas obtidas por meio de simulações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados uma série de trabalhos sobre análise de isoladores elétricos, envolvendo principalmente técnicas de inspeção tipo contato.

O método de inspeção passivo usado para inspeção de isoladores é dividido em duas categorias: a técnica de inspeção do tipo contato, no qual bastões isolantes de linha viva entram em contato com os terminais do isolador para medir diretamente as características do isolante; e a categoria de inspeção sem contato em que variações nas características elétricas do isolador em uma cadeia é medida indiretamente. Os métodos *buzz*, neon, lâmpada, de distribuição de tensão e resistência de isolamento pertencem à primeira categoria (LEE et al., 2012b). Em contraste, o método baseado em medição de campo elétrico, termovisão, radio-frequência em torno da linha isolante pertence técnica de inspeção sem contato.

Com base em suas características, o método de medição de distribuição de tensão é uma técnica de inspeção do tipo de contato e é o foco do presente trabalho.

A distribuição de tensão é uma grandeza bastante utilizada para diversos propósitos, tais como: determinação da mudança do regime de funcionamento do isolador de capacitivo para resistivo, comportamento da distribuição de potencial em função de elementos construtivos como geometria da torre, catenária formada pelo condutor, material utilizado no isolador, melhoria da geometria em anéis equalizadores, entre outras aplicações.

3.1 MEDIÇÃO OU DETECÇÃO DE POTENCIAL ELÉTRICO

A maneira mais simples de detectar potencial no isolador pertencente a uma cadeia de isoladores é aplicando curto-circuito numa determinada unidade e ouvir específico som parecido com um zumbido quando o contato é feito, indicando assim bom estado desse isolador. Esse é o método conhecido por *buzz*, que não é considerado um método muito refinado, mas que provou ser útil, especialmente para longas cadeias de isoladores de porcelana (VAILLANCOURT et al., 1994). Métodos mais sofisticados também foram criados e alguns deles permitem a medição real do potencial através de isoladores em uma cadeia.

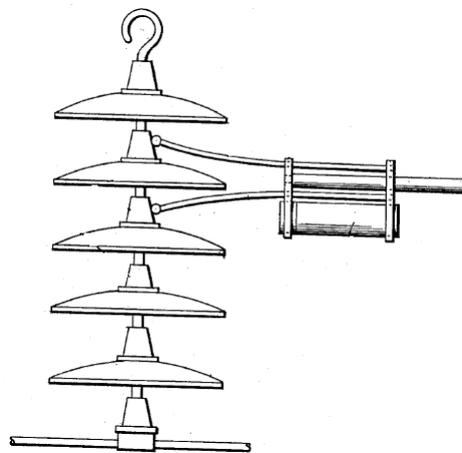
Uma das técnicas de medição em campo úteis envolve a determinação da distribuição do potencial sobre cadeia de isoladores. A maioria dessas cadeias de alta tensão toma a forma com um número de unidades conectadas em série, e quando o isolador está em operação e em boas condições, cada unidade suporta uma determinada fração da tensão da linha de transmissão. Se houver alguma unidade defeituosa, a queda de potencial entre essas unidades será consideravelmente mais baixa, enquanto a queda potencial entre as unidades sãs será maior que o normal. Consequentemente, a fim de detectar unidades isolantes defeituosas sob condições de serviço, é necessário apenas medir a queda de potencial através de cada unidade por meio de

um instrumento montado em um bastão isolante que irá suportar a tensão de linha completa. A seguir serão apresentados uma série de instrumentos desenvolvidos a fim de detectar unidades defeituosas em cadeias de isoladores utilizando o princípio da variação de potencial.

Em 1925, (BENNETT, 1925) recebeu patente norte-americana para um tipo de voltímetro eletrostático montado na extremidade de um bastão isolante através do qual o potencial nos isoladores individuais poderia ser detectado. A operação do instrumento baseia-se no seguinte princípio: quando uma série de dois ou mais isoladores é submetida a alta diferença de potencial, a tensão total é distribuída sobre as unidades de acordo com a resistência de isolamento dos elementos e suas capacidades eletrostáticas, deixando a unidade defeituosa sem tensão ou com menor tensão que o valor correspondente a sua posição na série. Nestas condições, se os terminais do instrumento forem colocados em contato com as conexões de um isolador (pino e campânula) pertencente a cadeia, a diferença de potencial através desse isolador faz com que o indicador do instrumento ocupe a posição correspondente a unidade da cadeia. A calibração do instrumento é tal que o indicador não se mova se a diferença de potencial for menor que a correspondente tensão de um bom elemento na mesma posição da série.

Em 1933, (SPANGLER, 1933) recebeu patente para um dispositivo que usava uma lâmpada em um invólucro blindado para detectar o potencial através dos isoladores. Neste dispositivo ao conectar as garras nos terminais do disco de porcelana a lâmpada irá brilhar conforme ilustrado na Figura 13. A intensidade do brilho diminuirá progressivamente à medida que os discos forem se afastando do condutor de alta tensão, indicando assim que tudo funciona bem. Caso um disco isolante esteja perfurado ou tenha alguma outra falha, a corrente passará através do disco para a próxima unidade da cadeia, e nenhum brilho aparecerá, ou o brilho será consideravelmente reduzido, indicando assim defeito.

Figura 13 – Dispositivo patenteado por (SPANGLER, 1933)



Fonte: Adaptado de (SPANGLER, 1933).

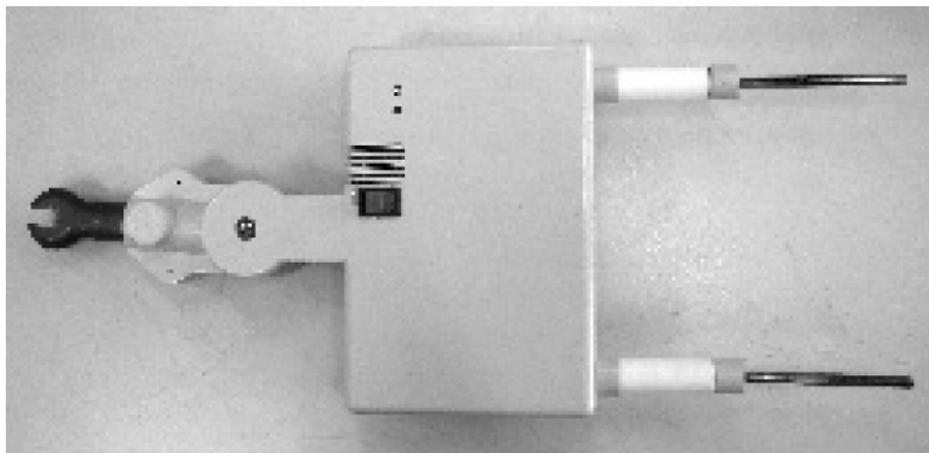
Em 1942, Forrest na Inglaterra apresentou um artigo (FORREST, 1942) no qual expôs

resultados a partir de um dispositivo semelhante ao de Bennett. Particularidades de seu dispositivo foram uso de um capacitor de capacitância variável que serve para ajustar a sensibilidade de medição e boa blindagem eletrostática para reduzir o erro de leitura devido à indução produzida pelo campos elétricos. Os resultados apresentados neste trabalho indicaram que o método era geralmente prático e confiável em cadeias de isoladores de porcelana usados na tensão do sistema até 132 kV, desde que o nível de umidade relativa do ar fosse inferior a 70%.

Em 1954, Castelli patenteou na Itália um outro dispositivo similar que media o potencial nos isoladores por meio de um medidor de d'Arsoval em série com resistores de alta tensão (VAILLANCOURT et al., 1994).

A ferramenta de inspeção que foi amplamente utilizada em países da Ásia para as técnicas de inspeção do tipo contato é um testador do tipo garfo que possui duas sondas metálicas fixas, como mostrado na Figura 14. Para medir as características de um isolante usando esta ferramenta tipo garfo, um operador deve colocar as duas sondas em contato com os terminais superior e inferior do isolador, ou seja, pino e campânula. No entanto, como dito acima, o operador deve usar um bastão isolante muito longo a uma certa distância da cadeia de isoladores, como representado na Figura 15, para manter a distância de segurança necessária da linha viva. Essa posição dificulta a manipulação precisa da ferramenta de inspeção, muitas vezes resultando na falha em estabelecer o contato das sondas com os terminais do isolador, que dificultam a execução e precisão da operação. A Figura 15 ilustra um caso real de medição da tensão de distribuição de uma cadeia de isoladores usando um testador tipo garfo na Linha de Transmissão de Energia Gongdeok de 154 kV (LEE et al., 2012b). Essa ferramenta de inspeção foi patenteada em 1989 no Japão.

Figura 14 – Exemplo do teste tipo garfo



Fonte: (LEE et al., 2012b).

Figura 15 – Aplicação do teste tipo garfo em uma linha de transmissão de 154 kV



Fonte: (LEE et al., 2012b).

1 Como mencionado as ferramentas de inspeção do tipo garfo apresentam problemas de confiabilidade, apresentando dificuldades no diagnóstico preciso de isoladores defeituosos e comprometendo a eficiência da operação, pois as sondas da ferramenta de inspeção devem estar em contato com os terminais do isolador. Devido a esses problemas várias ferramentas de inspeção foram desenvolvidas no Japão para resolver os problemas mencionados anteriormente com o testador tipo garfo (LEE et al., 2012a).

Atualmente um dispositivo de mercado que tem funcionalidade semelhante aos dispositivos supracitados é o isolômetro apresentado na Figura 16. Aparelho portátil, que permite localizar um isolador defeituoso na cadeia de isoladores em circuitos energizados de distribuição e transmissão. Seu princípio de funcionamento é baseado na medição da diferença de potencial no disco do isolador sob teste. Um galvanômetro de alta impedância indica esta diferença de potencial, permitindo comparações com outros discos de isoladores no mesmo sistema. Assim, no isolador defeituoso teremos uma leitura consideravelmente abaixo das demais. Pode ser usado para avaliar isoladores de pino, isoladores peça simples, isoladores de pino tipo multi-parte e isoladores de disco (TEREX, 2013).

Figura 16 – Isolômetro instrumento de teste e medição

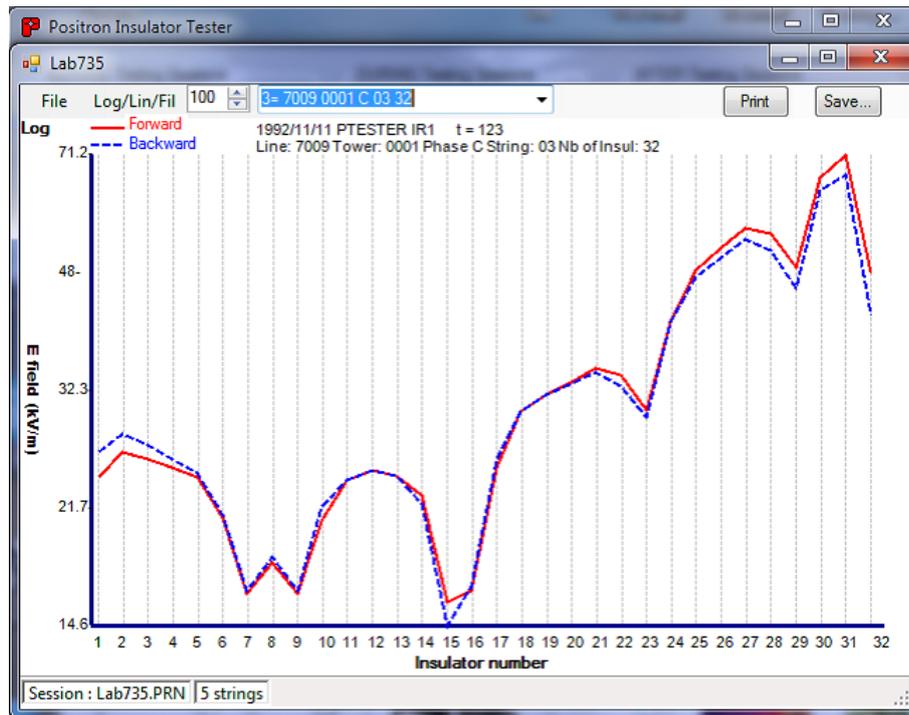


Fonte: (TEREX, 2013).

Um estudo feito por (GIRIANTARI, 2008) comenta sobre a possibilidade de realizar monitoramento via distribuição de potencial, e de como pode ser útil no monitoramento de isoladores em operação de maneira contínua em tempo-real. Entretanto o estudo é bem incompleto, apresentando poucos resultados, e os mesmos ainda desvalorizados por erros de medição que provavelmente ocorreram citados pelo próprio autor, não são apresentadas formas de como a distribuição de potencial se comportaria, nem dos níveis de variação de tensão que devem ser monitorados, nem da maneira como isso seria feito.

Em 2017, (ENG, 2017) indica através da técnica de medição de campo elétrico um sistema que alerta instantaneamente situações perigosas em linhas "vivas", usando o recurso chamado de relatório de gráficos instantâneos. O equipamento de teste da cadeia de isoladores consiste em um sensor de campo elétrico que é montado transversalmente em um trenó de alto impacto que é movido ao longo do isolador por meio de uma vara de manobra. O equipamento de teste inclui um Tablet PC *touchscreen* usado pelo operador localizado no solo. Neste artigo dois dispositivos de testes são apresentados um para isolador cerâmico e outro para isolador polimérico. Segue na figura 17 ilustração do relatório de gráficos do dispositivo. Através desse relatório foi concluído, segundo os autores, que as unidades 7, 9, 15, 16, 23 e 29 estão perfuradas.

Figura 17 – Relatório gráfico instantâneo



Fonte: (ENG, 2017).

Os métodos baseados nas inspeções tradicionais têm como desvantagem a necessidade de se ensaiar os isoladores em laboratório ou, para os casos em que os isoladores são ensaiados em campo, a necessidade de se instalar os equipamentos de inspeção junto ao isolador. Dessa forma, tais métodos, apesar de mostrarem vantagens em relação às inspeções tradicionais no que refere a precisão do diagnóstico, ainda não conseguem contornar a obrigatoriedade de se realizar as inspeções *in loco*.

Com o intuito de eliminar ou pelo menos reduzir a necessidade do deslocamento de operadores ao longo das linhas durante as inspeções, sistemas robóticos tem sido desenvolvidos utilizando diversas tecnologias e princípios de operação (CAPELINI, 2015). Os veículos aéreos não-tripulados são mais frequentemente encontrados. Há ainda robôs desenvolvidos exclusivamente para inspeção de isoladores, como no caso do modelo desenvolvido por (LEE et al., 2012b), o qual se diferencia dos citados anteriormente principalmente pelas ferramentas de inspeção. Este robô realiza a medição da resistência de isolamento e da distribuição de potencial em isoladores de suspensão como forma de avaliar sua integridade. A operação desses robôs depende do grau de sofisticação dos modelos, podendo ser manual ou semi-autônoma.

A concepção de um instrumento satisfatório, no entanto, não é uma questão simples, pelas seguintes razões: a capacitância de uma unidade isolante campânula-pino é de aproximadamente 50 pF, e para que uma medida precisa seja obtida na queda de potencial é necessário que a impedância do instrumento de medição seja alta em relação à impedância da unidade isolante.

Além disso, é necessário medir uma diferença potencial de alguns kilovolts quando o instrumento de medição está sob elevada tensão. Por exemplo, para detectar com sucesso uma unidade defeituosa na extremidade sob alto potencial numa linha de 132 kV, é essencial que o instrumento discrimine entre possíveis quedas de 2 kV e 8 kV quando o instrumento como um todo está em um potencial de 76 kV. Sob tais condições, grandes deflexões do instrumento devido à indução eletrostática podem ocorrer mesmo quando a queda potencial na unidade é insignificante, com o resultado de que uma unidade defeituosa escaparia à detecção. Além disso, é desejável que equipamentos de teste de isoladores deste tipo não requeiram uma conexão direta à terra, já que, embora o uso de tal conexão simplifique o projeto, ela pode acidentalmente entrar em contato com os condutores ativos quando o teste estiver sendo realizado, causando assim *flashover* e colocando em perigo os operadores (FORREST, 1942).

Dentre as diversas técnicas observadas na literatura, nesta dissertação optou-se por utilizar o método de inspeção passivo da categoria do tipo contato para identificar cadeias de isoladores com defeito e/ou quando descargas estejam ocorrendo em parte da cadeia devido a defeitos em curso.

No próximo capítulo serão apresentados os material e métodos utilizados durante os ensaios laboratoriais e simulações.

4 MATERIAL E MÉTODOS

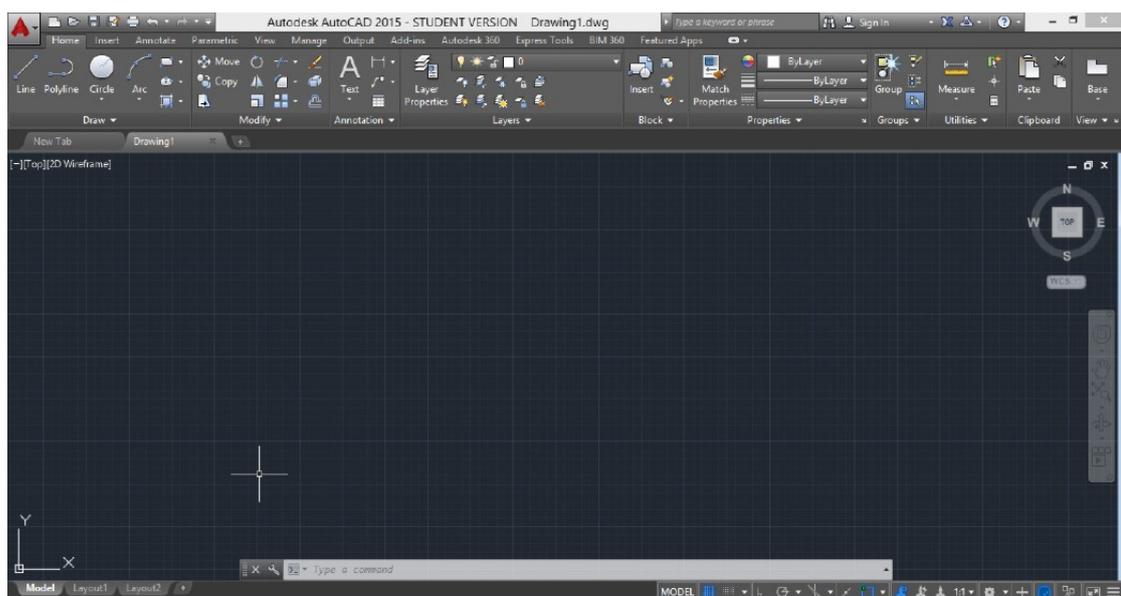
Neste capítulo serão descritos os materiais e os métodos empregados nas simulações e nos ensaios laboratoriais. Os *softwares* utilizados neste trabalho foram escolhidos por afinidade do autor e também por disponibilidade de utilização.

4.1 AUTOCAD®

AutoCAD® é um software do tipo CAD — computer aided design ou desenho auxiliado por computador - criado e comercializado pela Autodesk, Inc. desde 1982. É utilizado basicamente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões (2D) e para criação de modelos tridimensionais (3D), altura, largura e profundidade, sendo este recursos bastante utilizado, permitindo virar um automóvel, por exemplo, e ver a parte de baixo, abrir suas portas, motor e obter uma riqueza de detalhes de uma determinada peça em questão de segundos (DESK, 2013).

Além dos desenhos técnicos, o software vem disponibilizando, em suas versões mais recentes, vários recursos para visualização em diversos formatos. É amplamente utilizado em arquitetura, design de interiores, engenharia civil, engenharia mecânica, engenharia geográfica, engenharia elétrica e em vários outros ramos da indústria.

Figura 18 – Interface AutoCAD®



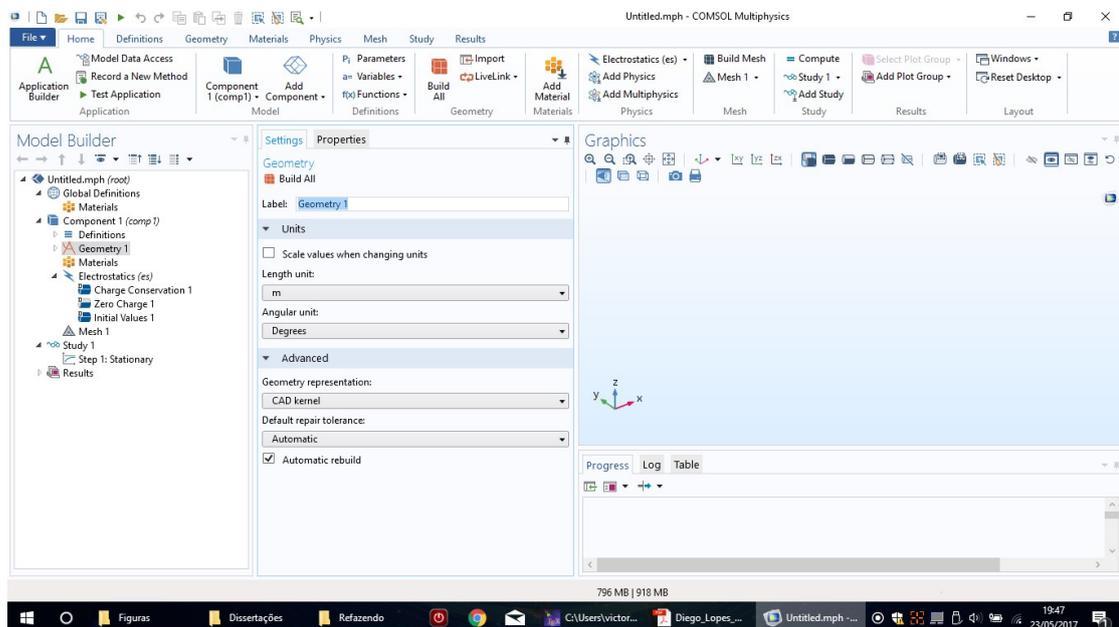
Fonte: O Autor.

4.2 COMSOL MULTIPHYSICS®

COMSOL Multiphysics® é um poderoso ambiente interativo para modelagem e resolução de diversos tipos de problemas da ciência e de engenharia. O software fornece ambiente integrado poderoso com um construtor de modelos em que obtém-se uma visão geral do problema a ser solucionado e acesso a diferentes funcionalidades. Pode-se também estender modelos convencionais para um tipo de física em modelos multifísicos que solucionam problemas com físicas acopladas de maneira simultânea. Para desenvolver esse tipo de aplicação não é necessário um conhecimento profundo em matemática ou análise numérica. Quando resolve os modelos, utiliza a conhecida técnica de elementos finitos. (MULTIPHYSICS, 2012).

O software executa a análise em elementos finitos juntamente com a geração adaptativa de malha e controle de erro usando uma variedade considerável de solucionadores numéricos. Os estudos podem ser realizados com sistemas de multiprocessadores e computação via cluster, sendo esta uma tecnologia capaz de fazer computadores mais simples trabalharem em conjunto, como se formassem uma máquina só. O COMSOL Multiphysics® tem como base a resolução de equações diferenciais parciais que formam o princípio das leis das ciências naturais e recursos para modelagem de uma ampla faixa de fenômenos da ciência e engenharia (MULTIPHYSICS, 2012). A Figura 19 ilustra a interface gráfica.

Figura 19 – Interface do COMSOL Multiphysics®



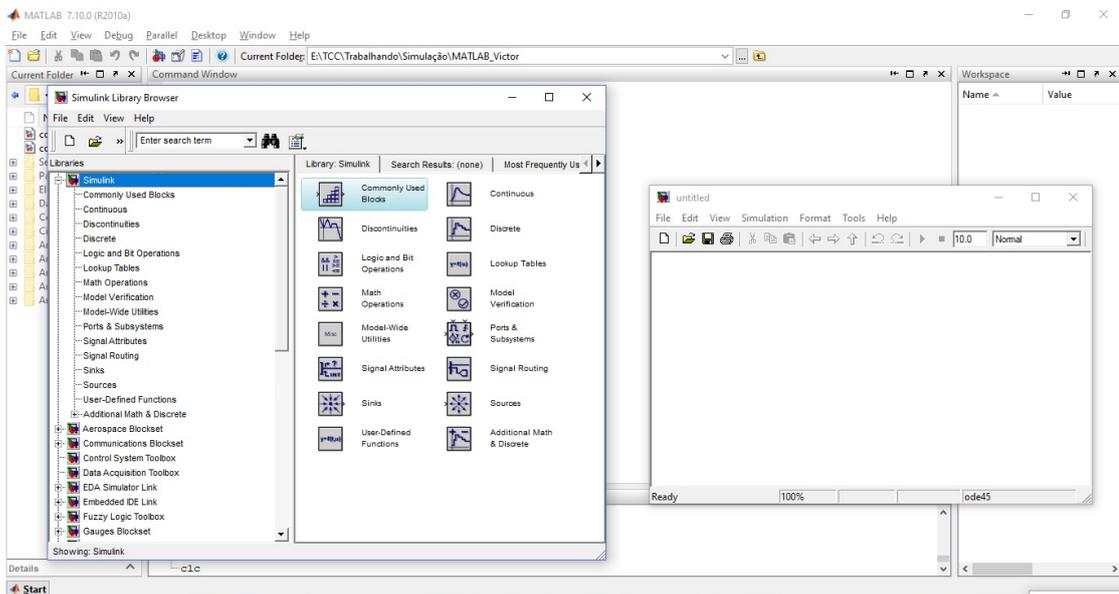
Fonte: O Autor.

4.3 MATLAB/SIMULINK®

O MATLAB® é uma linguagem de computação técnica de alto nível e um ambiente interativo para desenvolvimento de algoritmos, visualização de dados, análise de dados e computação numérica. Através desse software pode-se resolver problemas de computação técnica mais rápido do que com linguagens de programação tradicionais, como C, C++ e Fortran. Pode-se usar o MATLAB® em uma ampla gama de aplicações, incluindo processamento de sinais e imagens, comunicações, design de controle, teste e medição, modelagem e análise financeira e biologia computacional (GUIDE, 1998). Engenheiros e cientistas em todo o mundo usam MATLAB® para analisar e projetar os sistemas e produtos que transformam o mundo.

O Simulink é um ambiente de simulação e de projeto baseado em modelos para sistemas dinâmicos e incorporados, integrado ao MATLAB®. O Simulink é uma ferramenta de linguagem de programação gráfica de fluxo de dados para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos de vários domínios. É basicamente uma ferramenta gráfica de diagrama de blocos com conjunto personalizável de bibliotecas de blocos (GUIDE, 1998). Na Figura 20 pode-se observar a interface gráfica do MATLAB/Simulink®.

Figura 20 – Interface do Matlab/Simulink®



Fonte: O Autor.

4.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

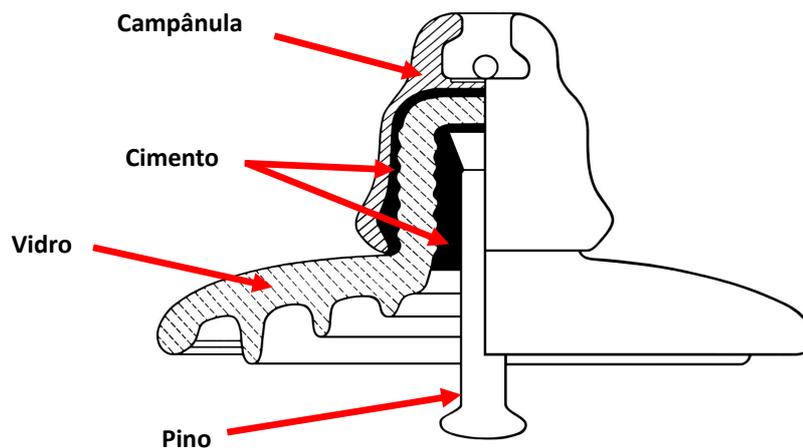
Inicialmente é necessário criar uma representação gráfica do equipamento isolante no ambiente computacional. Devido a complexidade da geometria do objeto a ser estudado optou-se por desenhá-lo no AutoCAD®, que, como mostrado anteriormente, é uma ferramenta adequada para referida atividade.

As simulações, propriamente ditas, foram realizadas em dois diferentes softwares, sendo esses o COMSOL Multiphysics® e o MATLAB/Simulink®.

As simulações no COMSOL Multiphysics® foram feitas considerando campos eletrostáticos, definidos pelo potencial elétrico V . Campos eletrostáticos consideram cargas e objetos em repouso, uns em relação aos outros, isto sendo uma idealização. Porém são úteis no desenvolvimento dos conceitos básicos (CARDOSO, 2006).

Nesse software a simulação foi elaborada e gerada para que se pudesse analisar a distribuição de potencial em uma cadeia de isoladores em condições específicas a serem apresentadas. Para isso, foi definido o domínio geométrico do espaço de simulação, bem como o domínio do objeto de teste (cadeia de isolador de vidro), este importado do AutoCAD®. O isolador de vidro modelado em 2D é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Isolador de vidro simulado.



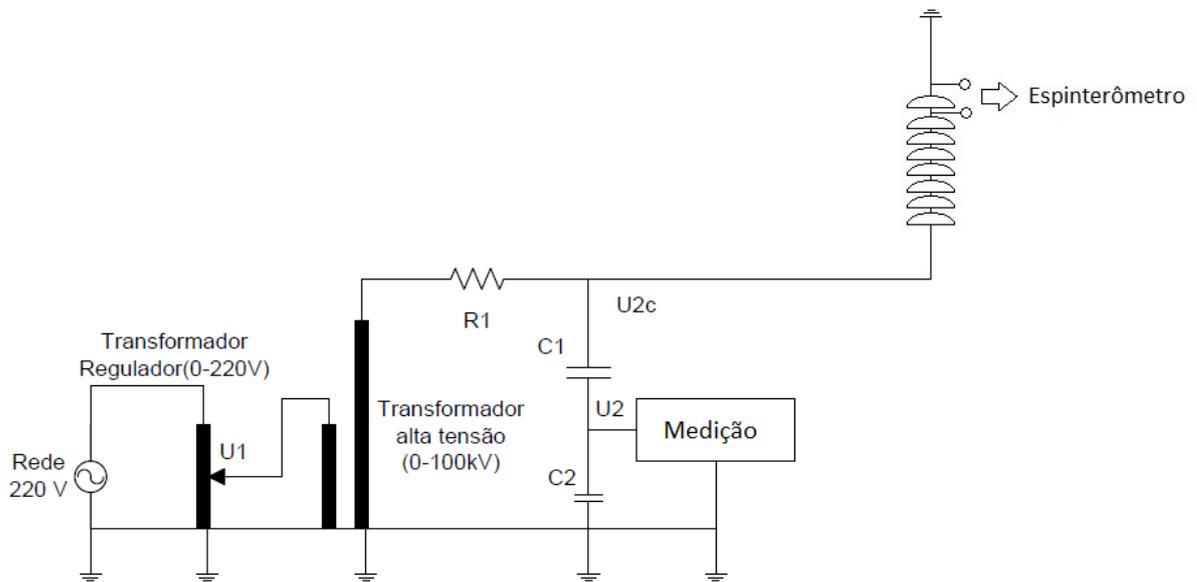
Fonte: O Autor.

4.5 ENSAIO LABORATORIAL

Com o objetivo de analisar o comportamento da distribuição de potencial em isoladores limpos e secos realizou-se ensaios em laboratório. Em paralelo foram desenvolvidas simulações com o objetivo de replicar o ensaio em ambiente computacional.

Neste estudo determina-se a porcentagem de tensão a qual cada isolador é submetido em uma cadeia de oito isoladores. O arranjo experimental a ser utilizado está mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Esquema elétrico para realização de ensaios de tensão aplicada.



Fonte: O Autor.

A medição de tensão por meio do espinterômetro consiste em estabelecer relação entre a tensão no circuito de teste e a indicação do voltímetro do circuito de controle. Em essência, o valor de pico de tensão obtido a partir do dispositivo de medição ou registro conectado ao lado de baixa tensão do sistema de medição é medido no momento do centelhamento. A menos que o contrário possa ser mostrado, a relação estabelecida deixa de ser válida se o circuito for alterado em qualquer aspecto que não seja devido a uma mudança no espaçamento dos eletrodos. Como a tensão na qual o centelhamento gerado depende do espaçamento entre os eletrodos e alguns outros parâmetros, a medição deve ser feita por um método consistente com a incerteza geral da medição de tensão.

O espinterômetro padrão consiste de duas esferas de metal com o mesmo diâmetro D , duas hastes, engrenagem de operação, suportes de isolamento, estrutura de suporte e cabos para conexão ao ponto em que a tensão deve ser medida. Os valores padrão de D são 2 cm, 5 cm, 6.25 cm, 10 cm, 12.5 cm, 15 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm, 150 cm e 200 cm. A tensão de ruptura do espinterômetro depende da distância de separação das esferas, do diâmetro dos eletrodos, do gás em que esferas estão imersas, da pressão, temperatura, densidade e umidade do gás, da forma de onda da polaridade e do tempo de aplicação da tensão e do nível de radiação recebido (IEEE... , 2013).

Como pode ser difícil medir e ajustar a folga com precisão suficiente se a relação entre espaçamento e diâmetro for muito pequena, recomenda-se que o espaçamento não seja inferior a $0,05 D$. Como também espaçamentos de mais de $0,5 D$ são de maior incerteza durante as

medições.

Para aquisição das medições, obtidas por meio do ensaio de tensão aplicada, um arranjo experimental foi montado, composto por uma mesa de controle, transformador elevador de tensão (0-100 kV), divisor capacitivo, objeto de teste e um espinterômetro. Este consiste de duas esferas de aço inoxidável cujo diâmetro é de 2 cm; parafusos e porcas, fazendo o função de operação das engrenagens para variar o *gap* entre as esferas; e para o suporte das esferas uma cuba cilíndrica de plástico.

A descarga disruptiva em uma isolação externa depende das condições atmosféricas no instante do ensaio. De modo geral, a tensão disruptiva para uma dada distância no ar cresce com a densidade ou umidade do ar. Entretanto quando a umidade relativa excede cerca de 80%, o comportamento da tensão disruptiva se torna irregular, em especial quando a descarga ocorre ao longo da superfície isolante. Pela aplicação dos fatores de correção, a tensão de ensaio medida nas condições ambientais (temperatura t , pressão p , umidade h) durante o ensaio pode ser convertida ao seu valor equivalente nas condições atmosféricas de referência (IEEE... , 2013).

A tensão disruptiva é proporcional ao fator de correção (K), que é resultado da razão dos fatores de correção para densidade do ar (k_d) e correção de umidade (k_h). Dessa forma, aplica-se um fator de correção na tensão a ser aplicada durante o teste de resistência de isolamento externo, que é determinada pela multiplicação da tensão suportada especificada por k_d/k_h .

O fator de correção da densidade do ar k_d é dado por:

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0} \right)^m \cdot \left(\frac{273 + t_0}{273 + t} \right)^n \quad (4.1)$$

em p é a pressão atmosférica no momento do ensaio e t é a temperatura no momento do ensaio. A pressão atmosférica p e p_0 são expressos na unidade de (kilopascals), t e t_0 são as temperaturas em graus Celsius.

O fator de correção de umidade é dado por:

$$k_h = k^w \quad (4.2)$$

Os expoentes m , n e w dependem do tipo da tensão de teste. Nesta dissertação o tipo da tensão a ser testado será Corrente Alternada (CA). Neste caso os valores de $m=n=1$ e $w=0$ (IEEE... , 2013).

$$V_{50\%} = K.V_{50\%o} \quad (4.3)$$

sendo $V_{50\%o}$ a tensão nas condições atmosféricas padrão e $V_{50\%}$ a tensão medida.

As tensões de descarga disruptiva para vários espaçamentos em gaps esféricos são dadas na Tabela 1 para as condições padrão de temperatura e pressão atmosférica: $t_0 = 20$ °C e $p_0 =$

101,3 kPa. A relação entre $V_{50\%o}$ e $V_{50\%}$ é mostrada na equação 4.3.

Tabela 1 – Valores de pico das tensões de descarga disruptiva (valores $V_{50\%}$ nos ensaios de impulso) em kV para tensões alternadas nas frequências de potência segundo (IEEE. . . , 2013)

Espaçamento do gap esférico (cm)	Tensão de pico (kV)
0,05	2,8
0,10	4,7
0,15	6,4
0,20	8,0
0,30	11,2
0,40	14,4
0,50	17,4
0,60	20,4
0,70	23,2
0,80	25,8
0,90	28,3
1,00	30,7

Fonte: (IEEE. . . , 2013).

Os valores para tensão de descarga disruptiva dados na Tabela 1 têm uma incerteza estimada de 3% para um nível de confiança não inferior a 95% para tensões alternadas e de impulso.

A determinação da distribuição de tensão em cadeias de isoladores obtêm-se variando a posição do espinterômetro ao longo da cadeia e registrando-se a tensão aplicada, na cadeia completa, que provoca a ruptura elétrica do meio gasoso entre as esferas. Para determinar a porcentagem que cada isolador suporta da tensão total aplicada a cadeia, é necessário alguns ajustes algébricos. Fazendo-se N o número de isoladores, Y isolador em questão, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ os valores percentuais das tensões nos isoladores 1, 2, 3, ..., N (contando-se do lado fase para o lado terra) e $V_1, V_2, V_3, \dots, V_N$, as tensões aplicadas à cadeia, para que a diferença de potencial em cada isolador ultrapasse a rigidez dielétrica do ar entre as esferas do espinterômetro e V a tensão disruptiva do espinterômetro, tem-se que:

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N = 1 \quad (4.4)$$

e

$$x_y = \frac{V}{V_Y} \quad (4.5)$$

então, pode-se escrever que:

$$x_y = \frac{\frac{V}{V_Y}}{1} \quad (4.6)$$

sendo igual a

$$x_y = \frac{\frac{V}{V_Y}}{\sum_{I=1}^N x_I} \quad (4.7)$$

o que leva a:

$$x_y = \frac{\frac{V}{V_Y}}{\sum_{I=1}^N \frac{V}{V_I}} = \frac{\frac{1}{V_Y}}{\sum_{I=1}^N \frac{1}{V_I}} \quad (4.8)$$

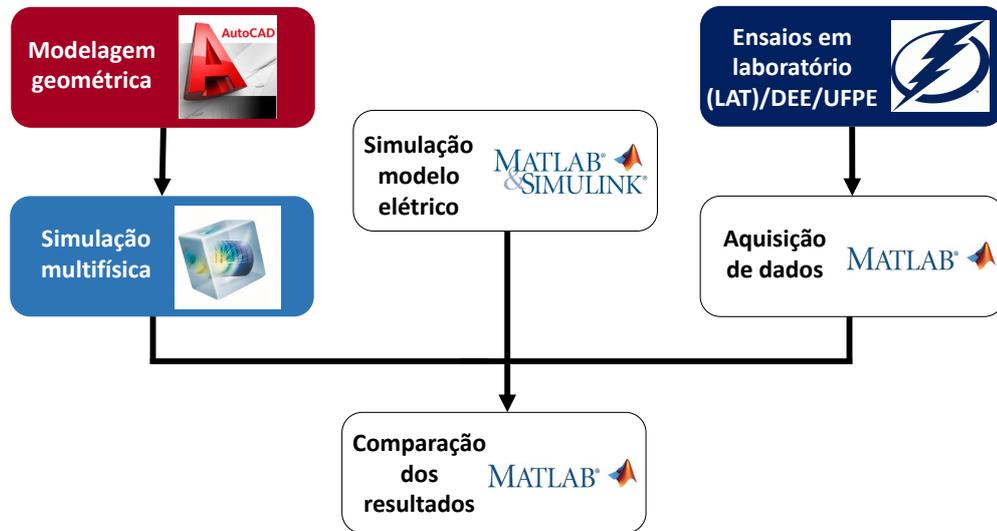
Assim,

$$x_y \% = \frac{\frac{1}{V_Y}}{\sum_{I=1}^N \frac{1}{V_I}} * 100 \quad (4.9)$$

4.5.1 Comparação de resultados

Após realizados simulações no COMSOL[®], no Matlab/Simulink[®], bem como os ensaios laboratoriais; os dados obtidos foram exportados para o Matlab[®] para a comparação dos resultados de simulação e laboratorial. A distribuição de potencial adquiridos na simulação do COMSOL[®] foi utilizados para analisar o comportamento dos isoladores em condições secas e limpas. Já no Matlab[®] tem-se a distribuição de potencial a parâmetros concentrados, assim como no ensaio laboratorial. Os resultados das simulações foram utilizados para reproduzir o efeito que ocorre na prática. Um fluxograma detalhado da sequência dos procedimentos e softwares utilizados pode ser observado na Figura 23. O material e os métodos apresentados neste capítulo foram empregados, fornecendo resultados de importância significativa para a pesquisa desenvolvida. Os resultados serão apresentados e comentados no próximo capítulo.

Figura 23 – Fluxograma da metodologia empregada.



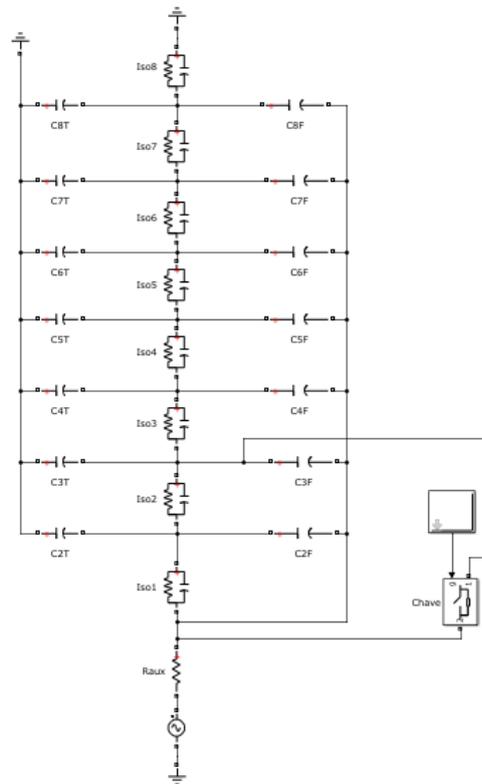
Fonte: O Autor.

4.6 APLICAÇÃO DO DEFEITO

Mediante as ferramentas computacionais de apoio, AutoCAD®, COMSOL Multiphysics® e MATLAB/Simulink®, é construído modelo do comportamento dinâmico da tensão ao longo da cadeia de isoladores, quando do curto-circuito de algumas unidades mais próximas do condutor fase, modelando, dessa forma, um defeito sendo este representado por um arco elétrico entre duas unidades da cadeia de isoladores do lado fase. Essa anormalidade na cadeia pode ser, por exemplo, descargas superficiais. Para isso introduz-se uma chave para representar o fenômeno. Conforme ilustrado na Figura 24. O modelo construído é objeto de simulações recursivas com o intuito de aferir sobretensões que são impostas à unidade mais próxima do lado terra, quando da ocorrência de curtos-circuitos no lado fase.

A escolha do isolador a ser monitorado foi feita prioritariamente pela facilidade de instalação de um equipamento de monitoração na cadeia. Uma vez que o inspetor ou eletricitista tenha capacidade de manusear de forma mais acessível o equipamento a ser instalado. Dessa forma, foi escolhido o isolador mais próximo a estrutura para ser o objeto de estudo. Além de ser uma região da cadeia com menor probabilidade de incidência de problemas, uma vez que os campos elétricos não são tão intensos quanto no lado fase. Uma vez que o gradiente do potencial elétrico são mais elevados próximos ao condutor, sendo conseqüentemente a região com maior probabilidade de defeitos/falhas elétricas.

Figura 24 – Circuito simulado através do MATLAB/Simulink.



Fonte: O Autor.

Na sequência considerou-se realizar o defeito exposto acima em laboratório. Os dados obtidos nessas simulações são utilizados para ajustar espinterômetro, o qual é utilizado como dispositivo de monitoração da cadeia. Escolheu-se o *gap* esférico, ou seja, o espinterômetro, pois esse estabelece campos elétricos quase uniformes possuindo características geralmente bem definidas. Significando comportamento mais exatos e precisos quando comparados a geometrias de *gaps* não uniformes (CARDOSO, 2006).

Após esses ajustes, direcionados para uma cadeia de isoladores de 138 kV, são realizados testes para avaliação em laboratório de alta tensão.

Os objetos de teste, utilizados nos experimentos, foram oito isoladores de vidro cedidos pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf). Os isoladores foram lavados com água desmineralizada e secos com toalhas de papel. Os isoladores podem ser visualizados na Figura 25.

Para reproduzir o defeito na cadeia de isoladores usa-se arame galvanizado atado a uma vara de manobra para provocar curto-circuito em unidades da cadeia.

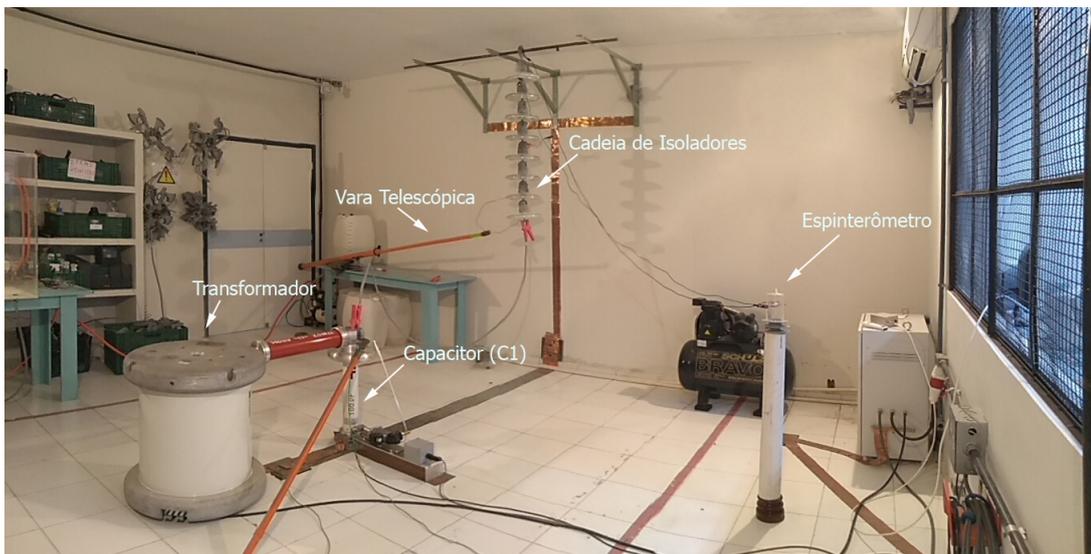
Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFPE (LAT/UFPE). O laboratório conta com um kit de alta tensão da Haefely, este possibilita variar a tensão elétrica de 0 a 100 kV. Com esse kit foi possível realizar os ensaios com tensão aplicada

de 80 kV fase-terra.

A tensão aplicada inicia-se com uma amplitude baixa o suficiente para não causar nenhuma descarga disruptiva quando a alimentação é energizada, e então é elevada suavemente de modo constante e sem interrupção para que a leitura seja feita com precisão no instante da descarga disruptiva no gap.

Na Figura 25 pode ser visualizado área de ensaio e indicação de alguns equipamentos e acessórios utilizados. Já na Figura 26 pode ser visto a sala de controle.

Figura 25 – Foto da área de ensaio



Fonte: O Autor.

Figura 26 – Foto da sala de controle



Fonte: O Autor.

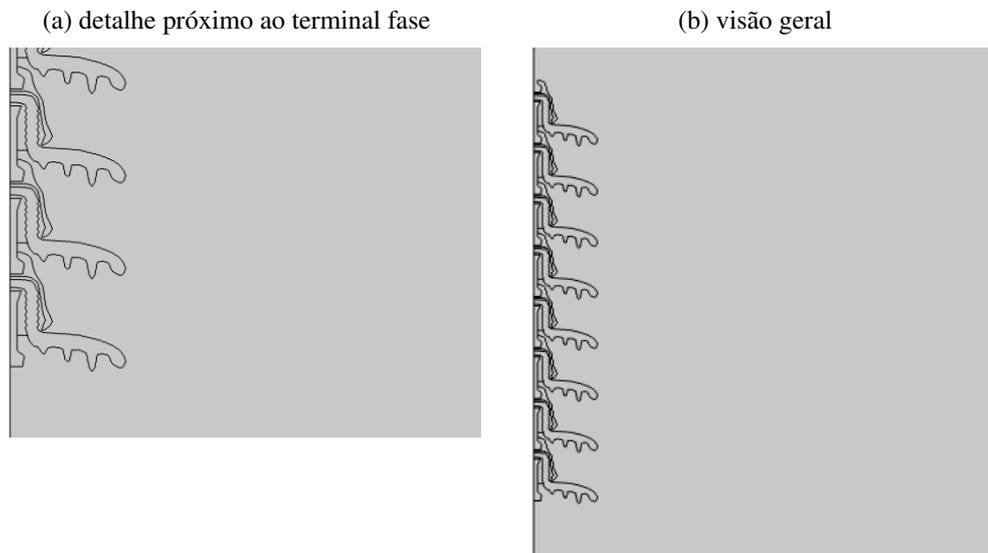
5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações e nos experimentos. Inicialmente, têm-se os resultados das simulações da distribuição de potencial ao longo da cadeia de vidro simulados através do COMSOL[®] e do MATLAB/Simulink[®]. Na sequência é apresentado o resultado dos ensaios laboratoriais. Então, é mostrado a comparação entre as simulações dos softwares e o ensaio laboratorial. Posteriormente foca-se na análise quando ocorre curto-circuito duas unidades mais próximas do condutor fase. Na sequência atesta-se a viabilidade de desenvolvimento de dispositivo incipiente, o espinterômetro, para detecção de defeito em cadeia de isoladores. Adiante analisa-se a indicação de falso positivo na atuação do possível dispositivo. E finalmente, verifica-se a influência da resistência de pé de torre com o intuito de analisar a interferência no comportamento distribuição de potencial devido à sua variação.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS NO COMSOL[®]

A configuração da cadeia de isoladores, importada pelo COMSOL Multiphysics[®], está ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Geometria desenvolvida para a simulação, isolador de vidro de alta tensão.



Fonte: O Autor.

5.1.1 Definição dos materiais

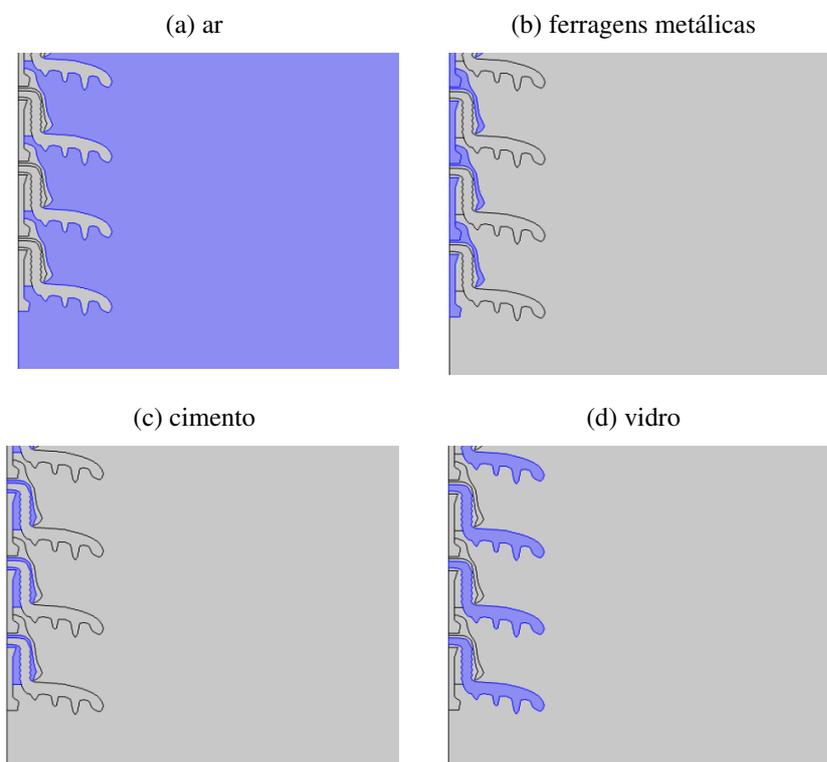
No ambiente do Comsol Multiphysics®, após a modelagem do objeto de teste, é necessário inserir as constantes físicas que caracterizam cada material do sistema a ser simulado. A definição dos materiais, quando utiliza-se o módulo físico de eletrostática, consiste na definição dos valores de permissividade relativa para cada material. As informações utilizadas estão apresentadas na tabela 2 e estão de acordo com valores utilizados por (ABD-RAHMAN et al., 2012) e demais retirados do COMSOL Multiphysics®. Na Figura 28 é indicada a definição dos materiais do isolador, na qual em azul escuro estão marcadas as regiões de cada material, objeto da especificação a ser informada.

Tabela 2 – Valores das permissividades elétricas dos materiais envolvidos

Material	Permissividade Relativa
Ar	1
Vidro temperado	7,5
Ferro galvanizado	10^5
Cimento Portland	4,5

Fonte: (ABD-RAHMAN et al., 2012)

Figura 28 – Definição dos materiais próximo ao terminal fase.

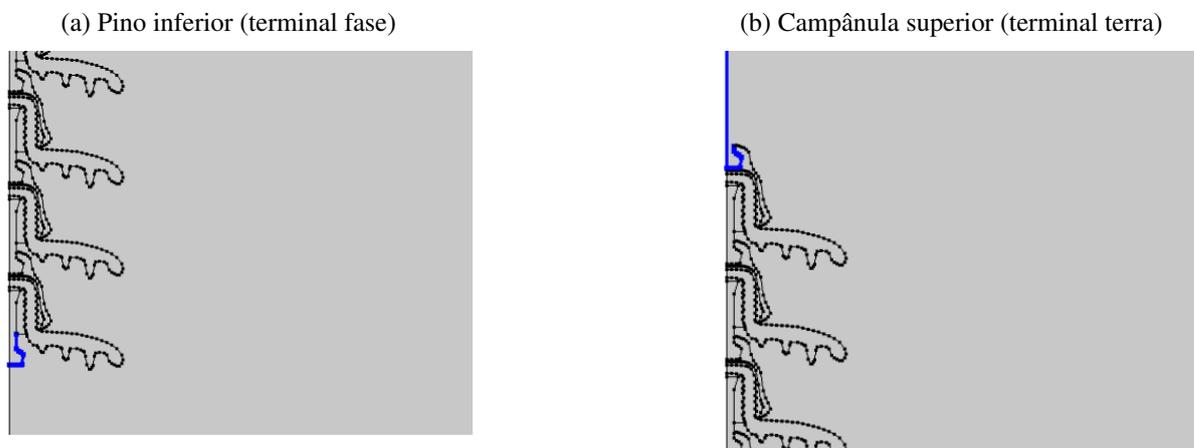


Fonte: O Autor.

5.1.2 Definição das condições de contorno

Logo após a inserção das constantes dos materiais, o sistema ainda não é solucionável, já que possui incógnitas que dependem da física do estudo. Assim, para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno. Define-se como condições de contorno: pino do isolador inferior (terminal fase), onde é aplicado a tensão à qual a cadeia está submetida; campânula do isolador superior da cadeia, onde está aterrada 0 V; contorno do espaço de simulação, 0 V. Pode ser visto na Figura 29 a definição das condições de contorno no isolador. A tensão aplicada à cadeia de isolador utilizada é de 79,67 kV ($\frac{138}{\sqrt{3}}$ kV), esse nível de tensão é tradicionalmente utilizado nos sistemas de transmissão de energia elétrica no Brasil.

Figura 29 – Definição das condições de contorno.



Fonte: O Autor.

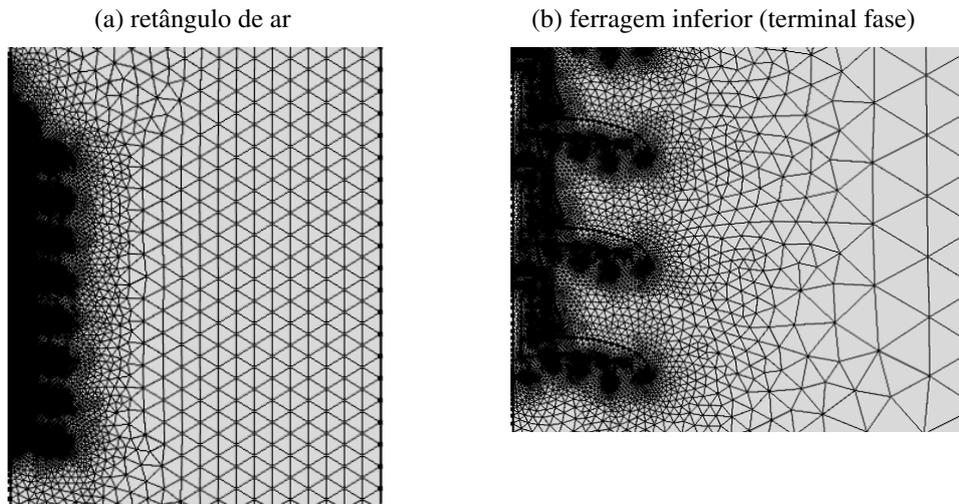
5.1.3 Definição da malha

Após a realização das etapas anteriores, ou seja, importação da estrutura do modelo, especificação das propriedades dos materiais e condições de contorno, todo o domínio foi discretizado em elementos triangulares durante o processo de *meshing*. Para melhorar a precisão dos resultados de simulação, foi realizado refinamento do *meshing* na região de interesse através do aumento do número de elementos da malha ao longo da superfície do isolador.

O refinamento resulta em um tamanho de elemento reduzido que pode ser visto a partir do *meshing* concentrado ao longo da superfície do isolador, tal como ilustrado na Figura 30.

Gera-se a malha de elementos finitos utilizando as ferramentas padrões disponíveis no COMSOL®. Testa-se diversos níveis de refinamento de malha os quais percebeu-se que o nível denominado de "extra fino" plotou sem alto custo computacional. Na Figura 30 é mostrada a malha gerada para o sistema.

Figura 30 – Malhas geradas no COMSOL



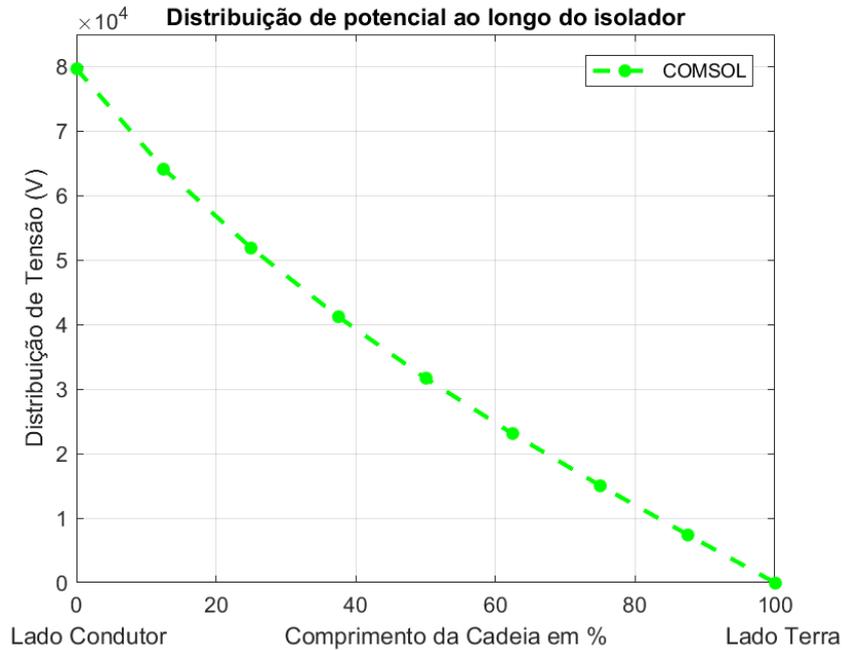
Fonte: O Autor.

5.2 DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL PELO COMSOL®

Para determinação da distribuição de potencial determinou-se em cada pino da cadeia de isoladores o potencial a ser mensurado, ou seja, visualiza-se o potencial elétrico em cada pino pertencente a cadeia.

As simulações foram realizadas para a condição de isolador limpo e em condições ambientais secas. A Figura 31 mostra a distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores de vidro elaboradas através do COMSOL®.

Figura 31 – Distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores de vidro COMSOL®



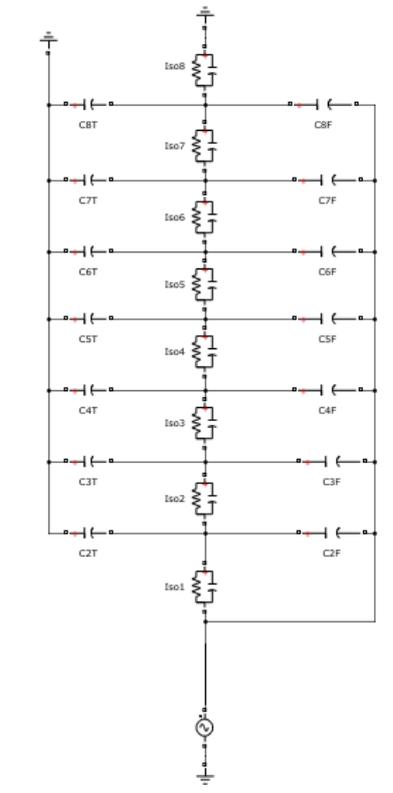
Fonte: O Autor.

5.3 SIMULAÇÃO MATLAB/SIMULINK®

Assim como no COMSOL Multiphysics®, a simulação no MATLAB/Simulink® foi elaborada e gerada para que se pudesse analisar a distribuição de potencial em uma cadeia de isoladores em condições específicas a serem apresentadas.

Como visto no capítulo 2 desta dissertação, o modelo elétrico de um dielétrico é representado por um resistor em paralelo com um capacitor. Associando esse modelo à cadeia de capacitores com dupla concatenação, configura-se o circuito equivalente da cadeia de isoladores. Implementa-se então, esse modelo elétrico no MATLAB/Simulink®, apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Circuito simulado através do MATLAB/Simulink.



Fonte: O Autor.

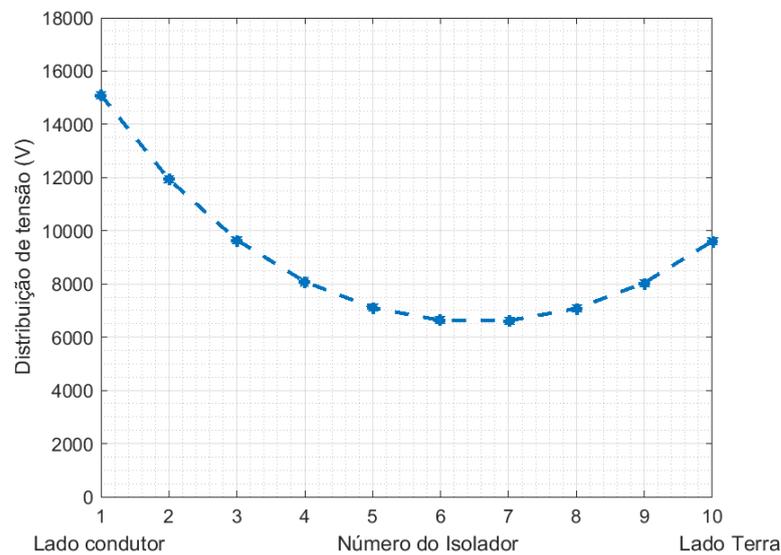
A distribuição de tensão ao longo de uma cadeia de isoladores é afetada tanto pela capacitância própria do isolador quanto pela distância do isolador até a torre, como também da distância do isolador ao solo. A capacitância própria do isolador, bem como a resistência, conseguiu-se medir através de medições em campo através do Medidor Doble M4100, equipamento padrão da indústria de aparelhos de energia e testes de isolamento. Mediu-se a capacitância e a resistência de 6 unidades e calculou-se a média das medições cujo valor da capacitância foi de $50,480 \text{ pF}$ e a resistência de $114.95 \text{ M}\Omega$ (LIMA, 2017).

As capacitâncias mútuas (c), isolador/terra; e (k), isolador/condutor; dependem das distâncias mencionadas. Para as simulações realizadas, essas capacitâncias e a resistência estão em concordância com (ILHAN; OZDEMIR, 2007), (ILHAN; OZDEMIR, 2007), (ANTONOV; GLUSHKOV; KROPOTUHIN, 2016), (PENA; WU; CHENG,), os quais aplicam o modelo de dupla concatenação em uma cadeia de isoladores convencionais em suas análises. As referências citadas reproduzem simulações semelhantes.

Uma tentativa para implementar o método para calcular as capacitâncias *shunts* foi pretendida. Entretanto, a modelagem para a torre e o condutor foram inviáveis para aplicação no COMSOL[®], surgindo assim a necessidade de buscar outro meio que determinasse tais parâmetros, como realizado através de referências.

Atentando realizar simulações mais refinadas, elaborou-se modelo via Simulink® apenas para inferir o valor das capacitâncias *shunts*. Para isso utilizou-se como referência (LEE et al., 2012a) o qual faz uma série de medições de distribuição de potencial em campo sobre cadeias de 10 isoladores cuja tensão de operação é de 155 kV. Fez-se de forma recursiva simulações para reproduzir de forma mais fiel o perfil da curva de distribuição de potencial objetivando inferir o valor das capacitâncias. Equiparando a Figura 33 com a Figura 2 percebe-se consonância na configuração das curvas. Diante do exposto, escolheu-se o valor das capacitâncias *shunts* (capacitância de uma unidade ao solo e capacitância de uma unidade ao condutor) para o nível de tensão pretendido neste trabalho conforme ilustrado na Tabela 3.

Figura 33 – Representação via Simulink® da medição de distribuição de potencial em campo por (LEE et al., 2012b).



Fonte: O Autor.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na simulação

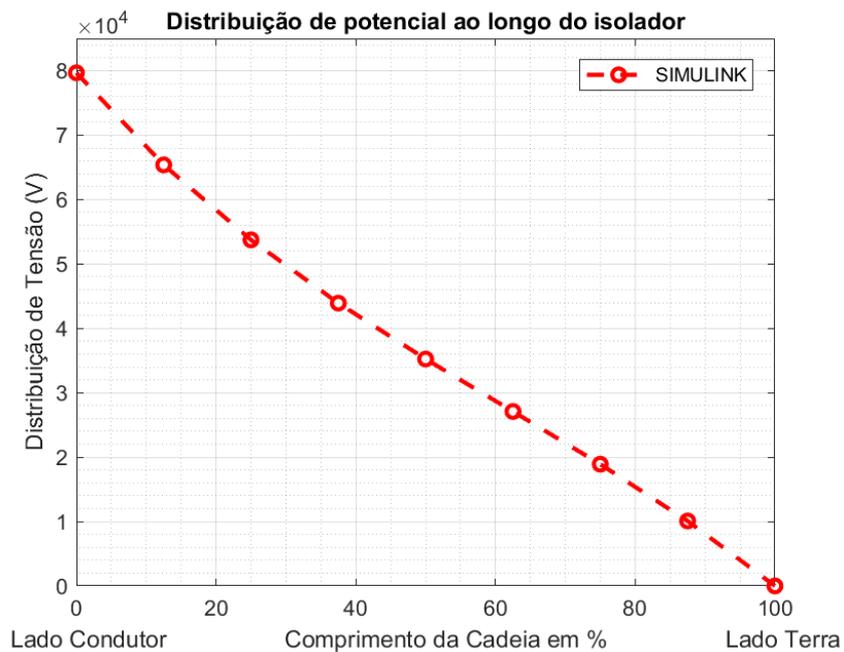
Tensão da fonte	79674,33 V
Capacitância de uma unidade ao solo	2,75 pF
Capacitância de uma unidade ao condutor	1,50 pF
Capacitância entre campânula e pino de um isolador	50,48 pF
Resistência <i>shunt</i>	115,00 MΩ

5.4 RESULTADOS OBTIDOS NO MATLAB/SIMULINK®

Relacionando a Figura 7 do capítulo 2 desta dissertação, a qual apresenta as curvas de distribuição de potencial do modelo de um dielétrico, com a Figura 34 deste capítulo, que

mostra a distribuição de potencial em cada ponto do isolador simulado, percebe-se coerência do modelo simulado com a teoria, onde pode ser observado que a curva (c) da Figura 7 possui representação mais próxima da configuração simulada, atentar ao referencial do potencial, pois o mesmo encontra-se invertido. Certifica-se a conformidade do modelo simulado com a literatura, conforme as referências (SCHWAIGER, 1925), (PROJECT-EHV, 1968) e (FUCHS, 1977).

Figura 34 – Distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores de vidro MATLAB/Simulink®

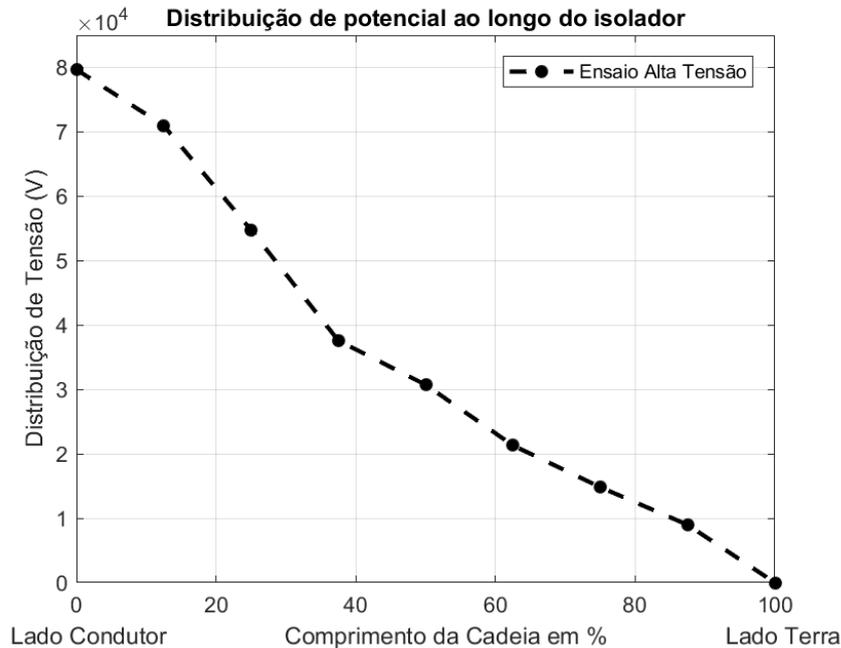


Fonte: O Autor.

5.5 RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

Conforme pode ser visto na metodologia apresentada na seção 4.5 (Ensaio laboratorial), os ensaios foram realizados para a condição de isolador limpo e em condições ambientais secas. A Figura 35 mostra distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores de vidro via laboratório de alta tensão.

Figura 35 – Distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores de vidro em laboratório de alta tensão



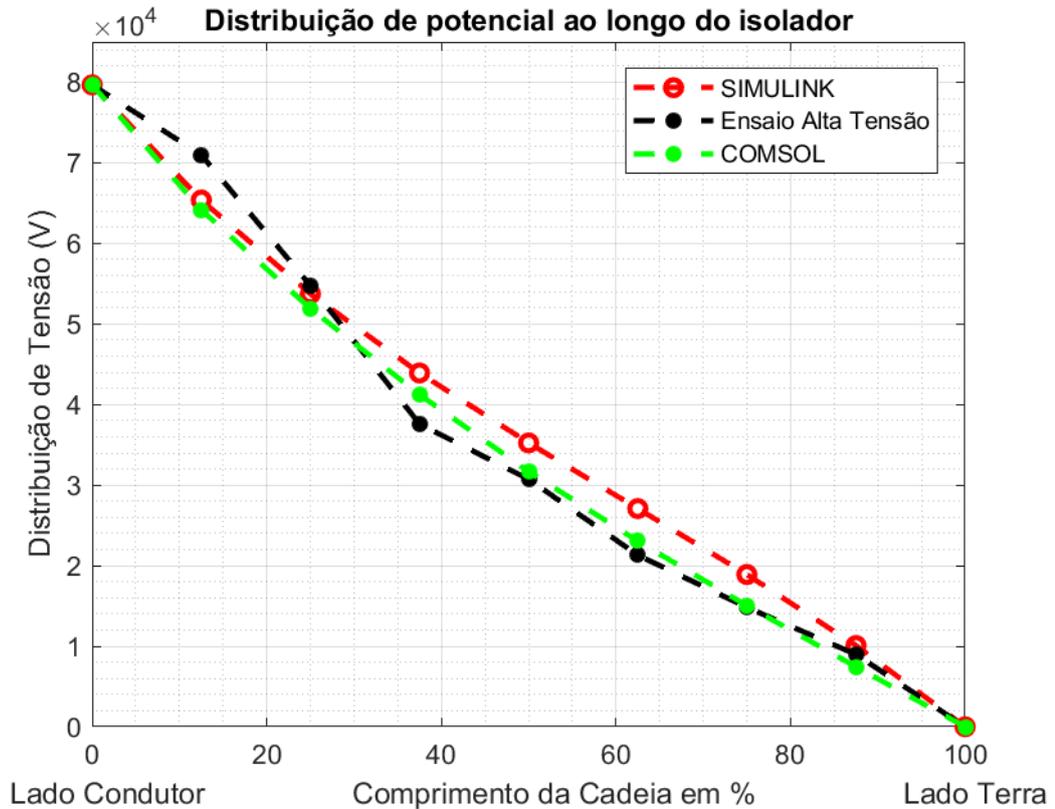
Fonte: O Autor.

Conforme pode ser visto na Figura 35 percebe-se comportamento da curva de distribuição de potencial diverge um pouco das simulações computacionais, uma vez que em ensaio laboratorial diversas influências externas influem no resultado, tais como: presença dos cabos para conexão do isolador, interferindo diretamente no campo elétrico; ventilação do condicionador de ar; umidade; temperatura; incerteza dos instrumentos de medição, dentre outros fatores.

5.6 ANÁLISE COMPARATIVA SIMULAÇÕES E ENSAIO LABORATORIAL

Com o intuito de comparar a distribuição de potencial para os diferentes métodos implementados, sendo um método construído no software COMSOL[®], outro no MATLAB/Simulink[®] e outro em laboratório de alta tensão, elabora-se um gráfico comparativo, como apresentado na Figura 37.

Figura 36 – Análise comparativa da distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores.



Fonte: O Autor.

Deve-se destacar que as curvas representam o potencial no mesmo ponto. Isto é, no COMSOL[®], o potencial é medido no pino de cada isolador pertencente a cadeia. Já no Simulink[®], o potencial é medido entre as unidades dielétricas, em outras palavras, a tensão é medida entre campânula e pino de cada isolador da cadeia, do circuito apresentado na Figura 32. E o ensaio em laboratório de alta tensão é adequado para ilustrar comparativamente, uma vez que no LAT sabe-se a tensão percentual de uma cadeia sob determinado nível de potencial. Não sendo medido diretamente.

A título de comparação foi medido o coeficiente de determinação adotando o sinal modelo da simulação realizada no Simulink[®]. Conforme ilustra a Tabela 4 percebe-se uma concordância forte entre as curvas de distribuição de potencial. Mesmo adotando diferente métodos.

Em um cenários ideal, as curvas de distribuição de potencial deveriam se sobreporem, entretanto diferentes métodos foram adotados e cada um tem suas simplificações e particularidades. No COMSOL[®] o tamanho da caixa que simula o envolto de ar o qual o objeto de estudo está sendo simulado tem uma relação com a curva de distribuição de potencial. Já no Simulink[®] as in-

Tabela 4 – Coeficiente de determinação obtido para efeito de comparação

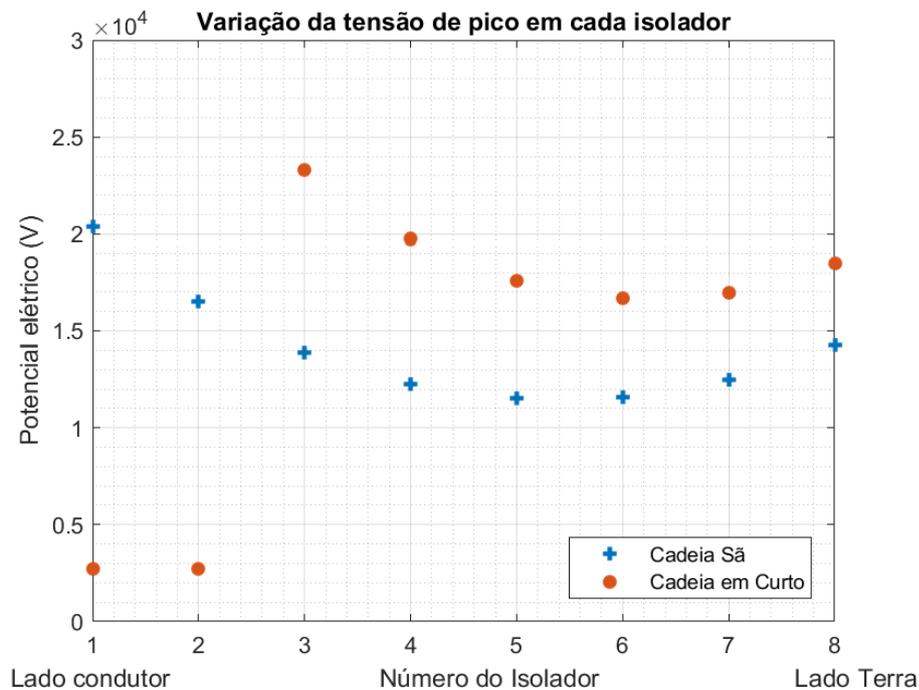
Simulink x Comsol	98.91 %
Simulink x LAT	97.68 %

ferências das capacitâncias *shunts* tem uma forte relação com a curva. O ensaio laboratorial tem as influências externas conforme mencionado no tópico de "Resultados obtidos em laboratório de alta tensão".

5.7 APLICAÇÃO DO CURTO EM DOIS ISOLADORES

Com o intuito indicar defeitos em cadeias de isoladores utilizou-se um espinterômetro para que o mesmo indique a situação de desequilíbrio de potencial elétrico na cadeia. Para isso, foi feita simulação como indicado na Figura 24, em que observa-se a variação da tensão de pico em cada isolador da cadeia conforme indicado na Figura 37. Baseado nesse resultado calibra-se o espinterômetro para que o mesmo indique a situação de defeito na cadeia de isoladores, ou seja, ajusta-se o espaçamento do *gap* para centelhamento de acordo com a tensão desejada.

Figura 37 – Variação da tensão em cada isolador quando do curto circuito de dois isoladores do lado fase.



Fonte: O Autor.

Verifica-se que a variação de tensão na unidade a ser monitorada (isolador lado terra) é por volta de 4190 V. De posse dessa informação, o ajuste do espinterômetro será a soma da tensão do isolador monitorado para a cadeia sã mais a variação de tensão, devido ao cenário de defeito determinado, ou seja, $V_{gap} = V_{sã_{pico}} + V_{variação_{pico}}$. Da simulação extraí-se que $V_{sã_{pico}} = 14260$ V. Logo, o ajuste do *gap* será de aproximadamente 18450 V. Destaca-se crescimento de 30% no valor da tensão no isolador monitorado. Analisando a Tabela 1 sabe-se que o espaçamento do *gap* esférico entre 0,50 cm e 0,60 cm causa o rompimento do dielétrico para o cenário determinado.

Calibrado o espinterômetro para validar a constatação do cenário de curto circuito em duas unidades, fez-se o ensaio laboratorial e constatou-se o centelhamento do espinterômetro para o nível operacional de uma linha de 80 kV fase-terra. Atentando averiguar possíveis falhas na calibração do espinterômetro aplicou-se o curto para tensões mais baixas, sendo essas 60 kV, 65 kV, 70 kV e em nenhuma das tensões o espinterômetro chegou a centelhar.

5.8 INDICAÇÃO DE FALSO POSITIVO

Os estresses elétricos nos isoladores são causados por: tensão contínua de operação, sobretensões de manobra e sobretensões de surtos atmosféricos. Os isoladores são projetados para suportar além das tensões contínuas de operação. Estas flutuam dependendo do carregamento da linha de transmissão, sendo o intervalo normal de flutuação por volta de $\pm 10\%$. A tensão fase-neutro causa estresse elétrico nos isoladores. Por exemplo, o requisito de isolamento de uma linha de 138 kV é pelo menos:

$$1,1 \cdot \frac{138kV}{\sqrt{3}} = 87,64kV \quad (5.1)$$

As causas mais frequentes de sobretensões de manobra são eliminação de falta, energização de linha, interrupção de carga e comutação de capacitores. O chaveamento produz impulsos unidirecionais ou oscilatórios com durações de 5000 a 20.000 μs . A amplitude dessa sobretensão varia entre 1,8 e 2,5 por unidade. Alguns disjuntores modernos usam resistência de pré-inserção, o que reduz a amplitude de sobretensão para 1,5-1,8 por unidade (GRIGSBY, 2007).

As sobretensões de surto atmosférico como, por exemplo, queda de raios nos condutores fase, queda de raios nos condutores de proteção (elevados níveis de corrente causam queda de tensão nos condutores de aterramento podendo causar *backflashover*). A tensão de pico da sobretensão gerada por descargas atmosféricas devido à falha de blindagem no condutor é muito alta cerca de 500 kV – 2000 kV. A tensão induzida por raios é geralmente menor que 400 kV (GRIGSBY, 2007).

Conforme (GRIGSBY, 2007) chaveamento, rejeição de carga, energização de linha, ressonância e faltas elétricas podem causar sobretensões de duração relativamente longa (de 5 segundos a vários minutos). As amplitudes e a duração esperadas de picos de tensão estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Amplitude esperada por sobretensões temporárias

Tipo da sobretensão (cm)	Amplitude esperada	Duração
Rejeição de carga:		
— Sistema da subestação	1,2 por unidade	1-5 segundos
— Estação geradora	1,5 por unidade	3 segundos
Ressonância	3 por unidade	2-5 minutos
Energização de transformador	1,5–2,0 por unidade	1-20 segundos

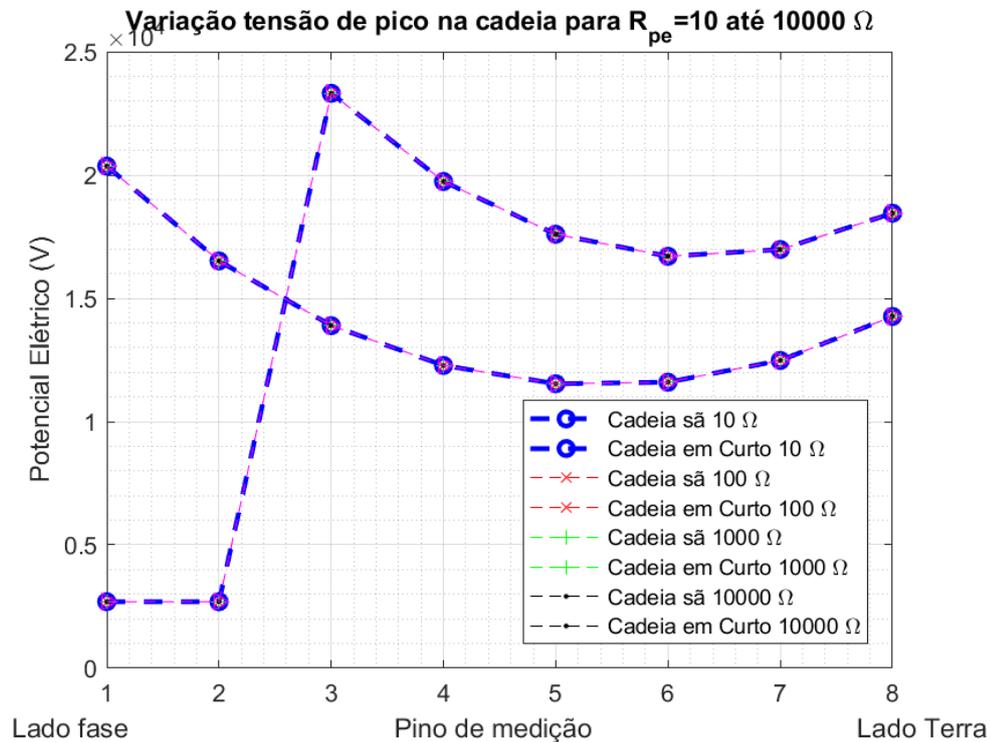
Fonte: (GRIGSBY, 2007).

Nota-se que sobretensões temporárias poderão indicar falso positivo, indicando defeito na cadeia através do dispositivo de monitoramento. No momento em que um transformador é energizado sobretensões de até 2 pu (100%) ocorrem. Visto que o cenário de duas unidades curto-circuitadas proporciona um crescimento de 30%, conclui-se sobreposição das ocorrências tanto da energização do transformador quanto do defeito, sinalizando falso positivo.

5.9 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PÉ DE TORRE

Com o propósito de avaliar o comportamento da distribuição de potencial devido à influência da resistência de pé de torre variou-se a mesma, apenas para a frequência da rede 60 Hz, via simulação no SIMULINK[®], nos seguintes valores 10 Ω , 100 Ω , 1k Ω , 10k Ω . Essas simulações foram realizadas tanto para a cadeia de isoladores sã quanto para cenário de defeito em duas unidades de isoladores curto circuitadas da cadeia. A figura 38, sintetiza o comportamento da distribuição de potencial da cadeia variando a resistência de pé de torre.

Figura 38 – Variação da resistência de pé de torre.



Fonte: O Autor.

De acordo com as figuras 38, constata-se que a influência da resistência de pé de torre, para a frequência industrial, pouco influencia na distribuição de potencial, uma vez que os valores simulados foram extrapolados e quase nenhuma interferência é identificada para valores reais, sendo esses da ordem de dezenas ou centenas de Ohms. Nem mesmo com valores extremos evidencia-se distorções.

6 CONCLUSÕES, TRABALHOS FUTUROS E PUBLICAÇÕES

Objetivando desenvolver novas técnicas de diagnóstico em isoladores, simulações e ensaios laboratoriais foram elaborados e realizados com o intuito de analisar o comportamento da distribuição de potencial ao longo de uma cadeia de isoladores sob diferentes condições de operação, desde condições normais de funcionamento até curto circuitos próximos ao terminal fase, esses curtos representam defeitos que podem vir a surgir.

Para as simulações computacionais os principais softwares utilizados foram COMSOL[®] e o MATLAB/Simulink[®]. De acordo com as simulações realizadas constata-se uma consonância no formato da curva de distribuição de potencial entre o modelo elétrico dos isoladores de vidro e cerâmico, já consolidados, com medições em campo identificada nas referências.

Observou-se que a dinâmica da variação de tensão para curto nas duas unidades mais próximas do lado fase simuladas e ensaiadas estão compatíveis. Experimentos laboratoriais realizados apontaram que, através de calibração adequada do espinterômetro, o mesmo veio a centelhar, conforme esperado diante das simulações realizadas.

Outra constatação foi a pequena influência da resistência de pé de torre na distribuição de potencial na cadeia de isoladores.

A pesquisa realizada e descrita nesta dissertação aponta que a identificação de defeitos incipientes em isoladores de alta tensão analisando a variação de distribuição de potencial através de espinterômetro se apresenta alvisareira, requerendo, entretanto refinamentos específicos, quais sejam:

- buscar ajustes relacionado com a configuração estrutural da torre de transmissão que influencia, mesmo que de forma sutil, na característica da curva de distribuição de potencial;
- avaliar e identificar possíveis compensações quanto a possibilidades de falso positivo do dispositivo de monitoração em caso de descarga atmosférica, surto de manobra e curtos-circuitos.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

O desafio de encontrar deteriorações incipientes nos isoladores ainda preocupa os agentes do setor elétrico, tornando necessário que pesquisas adicionais sejam desenvolvidas. São sugeridos os seguintes temas futuros:

- aferir experimentalmente a influência na distribuição de potencial da cadeia de isoladores em ambientes poluídos e úmidos e possíveis consequências no desempenho do dispositivo de monitoração;

- analisar o comportamento da distribuição de potencial alterando a posição do curto circuito na cadeia de isoladores;
- encontrar o ponto ótimo de posicionamento do dispositivo de monitoramento;
- realizar a mesma análise de distribuição de potencial feita neste trabalho para isoladores poliméricos.

6.2 PUBLICAÇÕES

Artigos publicados pelo autor durante o período do mestrado.

Publicação em periódico:

- **Evaluating failures of polymer insulators in Brazilian distribution networks**, dos autores: BEZERRA, J.M.B. ; RODRIGUES, S.H.M.S. ; LOPES, B.R.F. ; LOPES, D. S. ; FERREIRA, V.A.L. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, v. 35, p. 38-44, 2019.

Publicação em congresso internacional:

- **Performance Evaluation of Polymeric Insulators from a Dynamic Variations Analysis of Voltage Distribution along the String**, dos autores: FERREIRA, V.A.L.; BEZERRA, J.M.B.; LOPES, D. S. In: 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), realizado na cidade de Atenas, Grécia, 12 de setembro de 2018.

Publicação em congresso nacional:

- **Dynamic Voltage Distribution Analysis Applied to a Polymer Insulator Chain**, dos autores: FERREIRA, V.A.L.; BEZERRA, J.M.B.; LOPES, D. S. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), realizado na cidade de Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, em 12 de maio de 2018.
- **Study of the Criticality of Internal Voids in Polymeric Insulators with 15 kV Voltage Class**, dos autores: LOPES, B.R.F.; BEZERRA, J.M.B.; FERREIRA, V.A.L. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), realizado na cidade de Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, em 12 de maio de 2018.

REFERÊNCIAS

- ABD-RAHMAN, R. et al. Stress control on polymeric outdoor insulators using zinc oxide microvaristor composites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 19, n. 2, p. 705–713, April 2012. ISSN 1070-9878. 58
- ANTONOV, A. S.; GLUSHKOV, D. A.; KROPOTUHIN, S. Y. A set of models for investigation of voltage distribution along suspension insulator string. In: *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 482–487. 62
- ASENJO, E. S.; MORALES, N. O.; VALDENEGRO, A. E. Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method. *IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation*, Curitiba, Brazil., v. 4, p. 10–17, 1997. 20
- BARROS, R. M.; FERREIRA, T. V.; COSTA, E. G. Determinação de posicionamento Ótimo de anel equalizador em isoladores poliméricos. *Revista Científica Ingeniería Energética*, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría. Cujae, Havana, Cuba, v. 34, 2013. 20
- BASAVARAJA, B.; SIVAKUMAR, V. Design and evaluation of different types of insulators using pde tool box. *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies [ICCEET]*, v. 1, p. 332–337, 2012. 20
- C. E. BENNETT. *Instrument for Locating and Observing Defective Insulator Units*. 1925. United State Patent Nº 1,542,815. 39
- BEZERRA, J. M. B. et al. Estudo da distribuição de tensão em cadeias de isoladores aéreos de alta tensão em ambientes poluídos. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Uberlândia, Minas Gerais, v. 17, p. 6, 2003. 20
- CAPELINI, R. M. Inspeção remota de isoladores em linhas de transmissão a partir de sinais de descargas parciais externas. 2015. 43
- CARDOSO, A. d. S. *Ensaio de Suportabilidade Dielétrica de Diferentes Eletrodos e Espaçamentos ao Ar Livre e Dentro de Painel Metálico Sob Impulso Atmosférico e Tensão Alternada*. Tese (Doutorado) — Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2006. 48, 54
- DAVID, C. R. et al. Regression models and life tables (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 34, n. 2, p. 187–220, 1972. 37
- DESK, A. Autocad user guide. 2013. 45
- DIAS, B. A. et al. Simulação computacional da poluição biológica em isoladores de vidro. Universidade Federal de Campina Grande, 2017. 37
- DORF, R. C. *The Electrical Engineering Handbook Series*. [S.l.]: CRC-Taylor & Francis., 1995. 29
- ENG, C. J. P. High voltage insulator testing based on electric field method: Proposed paper for icolim 2017. In: *2017 12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. 16, 42, 43

- FERREIRA, T. Estudo do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos. *M. Sc. Dissertação, Dept. Eng. Elétrica, Univ. Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.* 35
- FORREST, J. S. The characteristics and performance in service of high-voltage porcelain insulators. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*, v. 89, n. 7, p. 60–80, February 1942. 39, 44
- FUCHS, R. D. Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas. *Rio de Janeiro: LTC*, v. 2, 1977. 64
- GARCIA, R. W. S.; SANTOS, N. C. G.; FRANCO, J. L. de. Critério de avaliação de isoladores em serviço. *CIGRÉ – Brasil.*, Brasil, 2008. 35, 36
- GIRIANTARI, I. A. D. Monitoring the insulator condition by on-line voltage distribution measurement. In: *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 392–394. 42
- GRIGSBY, L. L. Electric power generation, transmission, and distribution. CRC Press, 2007. 68, 69
- GUIDE, M. U. The mathworks. *Inc., Natick, MA*, v. 5, p. 333, 1998. 47
- HUANG, J. et al. An online measurement method for insulator creepage distance on transmission lines. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 7, p. 1781, 2018. 16
- IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. *IEEE Std 4-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995)*, p. 1–213, May 2013. 32, 49, 50, 51
- ILHAN, S.; OZDEMIR, A. Voltage distribution effects of non-uniform units in suspension strings. In: *2007 IEEE Lausanne Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 801–806. 62
- KUFFEL, J.; KUFFEL, P. *High voltage engineering fundamentals*. [S.l.]: Elsevier, 2000. 31
- LEE, J.-K. et al. Development of a live-line insulator inspection tool system for 154 kv power transmission lines. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, v. 7, 01 2012. 15, 22, 41, 63
- LEE, J.-K. et al. Development of a live-line insulator inspection tool system for 154 kv power transmission lines. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, The Korean Institute of Electrical Engineers, v. 7, n. 1, p. 23–33, 2012. 20, 38, 40, 41, 43, 63
- LIMA, R. P. d. Estudo de protótipo de sistemas de alerta de degradação em cadeias de isoladores de linhas de transmissão. Universidade Federal de Pernambuco, 2017. 62
- LINGS, R. J. Eprri ac transmission line reference book-200 kv and above. EPRI, 2005. 29
- LOPES, D. S. *Modelo de Elementos Finitos Aplicado na Avaliação de Desempenho de Isolantes em Ambientes Contaminados*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, julho 2016. 21
- LUNA, A. M. *Materias de Engenharia Elétrica*. 1. ed. Recife: Aelfo Marques Luna, 2006. 19, 20
- MULTIPHYSICS, C. Comsol multiphysics user guide (version 4.3 a). *COMSOL, AB*, p. 39–40, 2012. 46

- ÖCHSNER, A. *Computational statics and dynamics*. [S.l.]: Springer, 2016. 33, 34
- PARK, J.-Y. et al. Development of advanced insulator inspection robot for 345 kv suspension insulator strings. In: *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong*. [S.l.: s.n.], 2010. 20
- PENA, A. R.; WU, C.; CHENG, T. Analysis of a high voltage active insulator assembly. *Electric power systems research*. 62
- PROJECT-EHV. *EHV Transmission Line Reference Book*. Nova Iorque, NY, EUA.: [s.n.], 1968. 20, 64
- PYLARINOS, D.; SIDERAKIS, K.; THALASSINAKIS, E. Comparative investigation of silicone rubber composite and room temperature vulcanized coated glass insulators installed in coastal overhead transmission lines. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 31, n. 2, p. 23–29, March 2015. ISSN 0883-7554. 16
- RUEDENBERG, R. Die spannungsverteilung an kettenisolatoren. *ETZ*, v. 15, 1915. 25
- SADIKU, M. *Elementos de Eletromagnetismo*. [S.l.]: Bookman, 2004. 34, 35
- SCHMIDT, W. Materiais elétricos: isolantes e magnéticos. *Vol. II. Edgard Blücher*, 1979. 19
- SCHWAIGER, A. *Elektrische Festigkeitslehre*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1925. 21, 22, 24, 25, 26, 27, 64
- SINGH, S. N. *Electric Power Generation: Transmission and Distribution*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. 28, 29
- SOUZA, R. M. *O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor*. 2003. 40 p. Disponível em: <http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>. Acesso em: 1 maio 2016. 34
- C. H. SPANGLER. *Prong Type Holder For Safety Testing Devices*. 1933. United State Patent Nº 1,896,598. 8, 39
- TEREX, R. Catálogo de produtos 2012. [http://: www. terexritz. com](http://www.terexritz.com)>. Acessado em 10 de março de 2019, p. 217, 2013. 41, 42
- VAILLANCOURT, G. H. et al. New live line tester for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 1, p. 208–219, Jan 1994. ISSN 0885-8977. 15, 38, 40
- VILAR, P. B. et al. Caracterização térmica e elétrica de poluição salina em isoladores de vidro. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE.*, p. 6, 2012. 21
- VITA, V.; EKONOMOU, L.; CHATZARAKIS, G. E. Design of artificial neural network models for the estimation of distribution system voltage insulators ' contamination. In: . [S.l.: s.n.], 2010. 15, 16
- VOLAT, C. Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer. *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE, C*, p. 409–413, 2013. 20

WALKER, J.; HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentals of physics*. [S.l.]: Hoboken, NJ: Wiley, 2008. 19

WAVRIK, J. F. A. G. et al. Aeronave não tripulada para inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.*, Florianópolis, Santa Catarina, 2011. 16, 37

ZHAO, Z.; XU, G.; QI, Y. Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 23, n. 5, p. 2858–2866, October 2016. ISSN 1070-9878. 16