



**UNISUL**

**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**

**GLAICON EXTERKOETTER**

**JONAS ALBINO MANOEL**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE A  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Tubarão

2020

**GLAICON EXTERKOETTER**  
**JONAS ALBINO MANOEL**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE A  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso Proposta de Tema do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Vilson Luiz Coelho, Dr.

Tubarão  
2020

## Resumo

As descargas atmosféricas são caracterizadas como descargas elétricas de elevada intensidade entre pontos inicialmente carregados eletricamente podendo percorrer grandes extensões, estas por sua vez são as maiores responsáveis por interrupções nas linhas de transmissão e queima de transformadores, dependendo do tipo de proteção aplicada na rede este episódio pode gerar interrupções temporárias ou permanentes. Com objetivo de estimar o número de interrupções anuais de uma linha de transmissão causado por descarga atmosférica. Utilizou-se dois modelos de análise, sendo estes, por agrupamento real das torres e por agrupamento através das resistências de aterramento. Após o desenvolvimento dos modelos, as simulações foram realizadas utilizando o software ATPDraw®. Os resultados foram expressos em curvas corrente *versus* impedância de aterramento, e através destas foi possível analisar a presença de *backflashover*, bem como estimou-se sua probabilidade e número de ocorrência. Foram relacionados os resultados dos dois modelos de análise, comprovando a sua proximidade nos números de interrupções encontrados. Como resultado final de 4,5835 desligamentos/ano para a análise feita com o posicionamento real das torres, necessitando de 275 simulações, e 4,2083 com o agrupamento através das resistências de aterramento, obtido através de apenas 15 simulações. Analisando os resultados, é possível evidenciar que o método simplificado (agrupamento através da resistência de aterramento) pode apresentar resultados satisfatórios com menor labor.

Palavras-chave: Linha de Transmissão, Descargas, Simulação, Interrupções.

## **Abstract**

Lightning strikes are characterized as electrical discharges of high intensity between points initially charged electrically and can cover large extensions, these in turn are the main responsible for interruptions in the transmission lines and burning of transformers, depending on the type of protection applied in the network this episode can generate temporary or permanent interruptions. In order to estimate the number of annual interruptions of a transmission line caused by lightning. Two analysis models were used, these being, by actual grouping of the towers and by grouping through the grounding resistors. After developing the models, the simulations were performed using the ATPDraw® software. The results were expressed in current versus ground impedance curves, and through these it was possible to analyze the presence of backflashover, as well as its probability and number of occurrences. The results of the two analysis models were related, proving their proximity in the numbers of interruptions found. As a final result of 4.5835 disconnections / year for the analysis made with the actual positioning of the towers, requiring 275 simulations, and 4.2083 with the grouping through the grounding resistors, obtained through only 15 simulations. Analyzing the results, it is possible to show that the simplified method (grouping through the grounding resistance) can present satisfactory results with less labor.

**Keywords:** Transmission Line, Discharges, Simulation, Interruptions.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relâmpago nuvem-solo.....	15
Figura 2: Relâmpago nuvem-nuvem .....	15
Figura 3: Tempo de descarga.....	17
Figura 4:Densidade de descargas da região sul do Brasil .....	18
Figura 5: Linha de transmissão.....	20
Figura 6: Modelo .....	22
Figura 7: Acoplamento elétrico .....	23
Figura 8: Acoplamento condutivo .....	24
Figura 9: Acoplamento magnético .....	24
Figura 10: Acoplamento irradiado.....	25
Figura 11: Efeito corona.....	26
Figura 12: Faixa de segurança .....	28
Figura 13: Raio de atração.....	29
Figura 14: Forma de onda da descarga.....	33
Figura 15: Estrutura típica das linhas de subtransmissão .....	34
Figura 16: Modelagem da linha no <i>ATP Draw</i> ®.....	38

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Perfil altimétrico das torres .....	36
Gráfico 2: Relação $I_0 \times$ Resistencia de aterramento das torres. ....	44
Gráfico 3: Relação $I_0 \times$ Resistência de aterramento das torres agrupadas. ....	44
Gráfico 4: Probabilidade de incidência por corrente da descarga. ....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões e características da linha. ....	34
Tabela 2: Comprimento total dos cabos de aterramento e resistência de aterramento em cada torre.....	35
Tabela 3: Vãos entre torres.....	37
Tabela 4: Resistências de aterramento e correntes de disrupção nas torres no grupo real .....	42
Tabela 5: Resistências de aterramento e correntes de disrupção nas torres agrupadas. ....	43
Tabela 6: Quantidade de interrupções por ano nas torres e total.....	45
Tabela 7: Quantidade de interrupções por ano nas torres agrupadas e total.....	46

## LISTA DE ABREVIACÕES

### SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
ATP Draw®	Interface gráfica do programa ATP
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
IEEE	<i>Institute of Eletrical and Electronic Engineers</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
TSI	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico

### SÍMBOLOS

$\mu$ s	Micro Segundo
$\Omega$	Ohm
$\Omega$ /km	Ohm por Quilômetro
°C	Graus Celsius
A	Ampere
b	Largura da estrutura
C	Coulomb
CFO	<i>Critical Impulse Flashover Voltage</i>
H	Altura da Estrutura
Hz	Hertz
$I_0$	Corrente da Descarga
$I_p$	Corrente de Disruptura da Torre
kA	Quilo Ampere
kg	Constante para Raio de Atração
km/h	Quilômetro por Hora
km/s	Quilômetro por Segundo
kV	Quilo Volt
ra	Raio de Atração
m	Metros
mm <sup>2</sup>	Milímetros Quadrados
N	Número de Interrupção por Quilômetro por Ano

Ng	Densidade de Descargas na Região;
P	Probabilidade de Ocorrência de Io.
rg	Raio de Atração da Terra
rs	Raio de Atração do Condutor
ymin	Distância de Atração
®	Marca registrada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	11
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	11
1.3 OBJETIVOS .....	12
<b>1.3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>12</b>
1.4 DELIMITAÇÕES .....	12
1.5 METODOLOGIA .....	12
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	14
<b>2.1.1 Principais tipos de relâmpagos .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2 Corrente elétrica do raio.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3 Densidade de descargas atmosféricas.....</b>	<b>18</b>
2.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	19
<b>2.2.1 Características construtivas de uma linha de transmissão.....</b>	<b>19</b>
2.2.1.1 Cabos condutores.....	20
2.2.1.2 Isoladores.....	21
2.2.1.3 Torres.....	21
2.3 INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	22
<b>2.3.1 Acoplamentos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2 Parâmetros em regime de surto .....</b>	<b>25</b>
2.3.2.1 Impedância de surto.....	25
2.3.2.2 Efeito corona .....	25
2.3.2.3 Descarga disruptiva inversa ( <i>backflashover</i> ).....	26
2.4 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DA LINHA DE TRANSMISSÃO PARA AVALIAÇÃO FRENTE À DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	26
<b>2.4.1 Nível de isolamento.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2 Distância de segurança.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.3 Raio de atração .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.4 Impedância de surto da torre.....</b>	<b>29</b>

<b>2.4.5</b>	<b>Aterramento.....</b>	<b>29</b>
<b>2.5</b>	<b>FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Interrupções por descargas atmosféricas.....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>DELINEAMENTO DO ESTUDO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>FERRAMENSTAS DE ANÁLISE.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.1</b>	<b>ATP Draw® .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Excel.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>MODELAGEM.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Forma de onda do impulso atmosférico .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Caracterização da linha de transmissão.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>SIMULAÇÕES E CÁLCULOS DE PROBLABILIDADE .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Simulação no ATP Draw® .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Processamento Excel® .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Simulações com agrupamento real das torres .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Simulações com agrupamento das torres considerando resistência de aterramento 40</b>	
<b>3.4.5</b>	<b>Probabilidade.....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas provém da ruptura da rigidez dielétrica do ar, ocasionada por uma diferença de potencial entre dois pontos carregados eletricamente com cargas opostas, podendo assim percorrer grandes extensões. Estas podem ser conceituadas como descargas elétricas de elevada intensidade, e conhecidas popularmente como raios (ELAT, 2019).

As descargas atmosféricas são as maiores responsáveis por interrupções de linhas de transmissão e queima de transformadores de potência, sendo estes causados por descargas diretas na linha ou nas proximidades, gerando tensões induzidas (ELAT, 2019).

Definem-se linhas de transmissão como sistemas físicos que transportam um sinal elétrico entre um gerador e uma carga através de um campo eletromagnético (HAYT, 1975).

As linhas de transmissão são responsáveis por transportar uma determinada quantidade de energia elétrica a uma distância preestabelecida. Este transporte de energia elétrica tem a função, perante o setor elétrico, de ser eficiente, confiável e econômico (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Como descrito anteriormente, as descargas atmosféricas possuem elevados valores de tensão, produzindo um grande campo elétrico nas suas proximidades. Quando uma descarga atinge diretamente uma linha de transmissão ou seus arredores, surtos são causados em sua extensão, devido a criação de arcos de potência provenientes da sobretensão na linha. Dependendo do tipo de proteção aplicada na rede, este episódio pode gerar interrupções temporárias ou permanentes (COELHO, 2010).

Tendo em vista o descrito acima, este trabalho tem como objetivo quantificar através de simulações, a probabilidade de interrupção anual de uma linha de transmissão, causado por descarga atmosférica.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Considerando que as descargas elétricas são as maiores responsáveis por interrupções de linhas de transmissão, é de grande importância quantificar a probabilidade dessas ocorrências, para fins de estudos de viabilidade de investimentos.

### 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Qual o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Estimar o número de interrupções anuais de uma linha de transmissão causados por descargas atmosféricas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar a linha definida no software ATPdraw®.
- Simular a linha frente a descargas atmosféricas no software ATPdraw®.
- Quantificar intensidade de descarga necessária em cada torre para ocasionar interrupção da linha.
- Quantificar a probabilidade de ocorrência de interrupção da linha por ano causado por descargas atmosféricas.

## 1.4 DELIMITAÇÕES

Analisar através de simulação utilizando software ATPDraw®, o desempenho frente a descargas atmosféricas de uma linha de transmissão de 138kV, localizada no estado de Santa Catarina.

## 1.5 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma pesquisa experimental de natureza quantitativa que tem como objetivo quantificar a probabilidade de interrupções de uma linha de transmissão causados por descargas atmosféricas.

A fim de viabilizar a análise técnica, é necessário desenvolver modelos com base nas estruturas típicas das linhas e nas formas de onda de impulso padronizadas.

Após o desenvolvimento dos modelos, foram realizadas simulações utilizando o software ATPDraw®, que resultou numa série de dados de corrente de impulsos atmosféricos, calculados em cada estrutura analisadas da linha. Os resultados foram expressos relacionando os dados de corrente da descarga em relação a tensão de disrupção da linha, através destes valores foi possível analisar a presença de *backflashover*.

Ao analisar os resultados obtidos, e com os dados climáticos da região foi quantificada a quantidade de interrupções da linha causados por descargas atmosféricas.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo apresentou o contexto de pesquisa e as motivações para realização desse trabalho, bem como as questões de pesquisa, os objetivos planejados e a metodologia de trabalho. Cada um destes itens será detalhado nos seguintes capítulos:

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: apresenta uma revisão inicial da literatura sobre o conceito de descargas atmosféricas, parâmetros de linhas de transmissão e a influência das descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão.

Capítulo 3 – Procedimentos Metodológicos: apresenta o delineamento do estudo, *softwares* utilizados e apresentação modelo de simulação e cálculos analítico.

Capítulo 4 – Análise e Discussão dos Resultados: o capítulo demonstra por meio de quadros e gráficos os resultados obtidos além das discussões sobre os mesmos.

Capítulo 5 – Considerações Finais: apresenta as considerações finais dos autores.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

As descargas atmosféricas são caracterizadas como descargas elétricas de elevada intensidade entre pontos carregados eletricamente, podendo percorrer grandes extensões. Quando estes, por sua vez estão abundantes e opostamente carregados obtém-se uma alta diferença de potencial entre ambos, podendo assim romper a rigidez dielétrica do meio, causando os popularmente conhecidos raios, acompanhado do efeito visual relâmpago e das ondas sonoras conhecidas como trovão (ELAT, 2019).

Em 1889 H. H. Hoffert aplicou uma câmera fotográfica em suas pesquisas, monitorando assim relâmpagos próximos ao solo, o que favoreceu o descobrimento das descargas individuais ou correntes de retorno. Através das medidas do campo magnético residual gerado por relâmpagos, F. Pockels conseguiu pela primeira vez em 1897 estipular aproximadamente a corrente máxima de uma descarga atmosférica. Com o passar dos tempos e com a evolução da tecnologia, aplicou-se diversas outras técnicas para estudar e mensurar valores mais aproximados das grandezas físicas destas descargas (ELAT,2019).

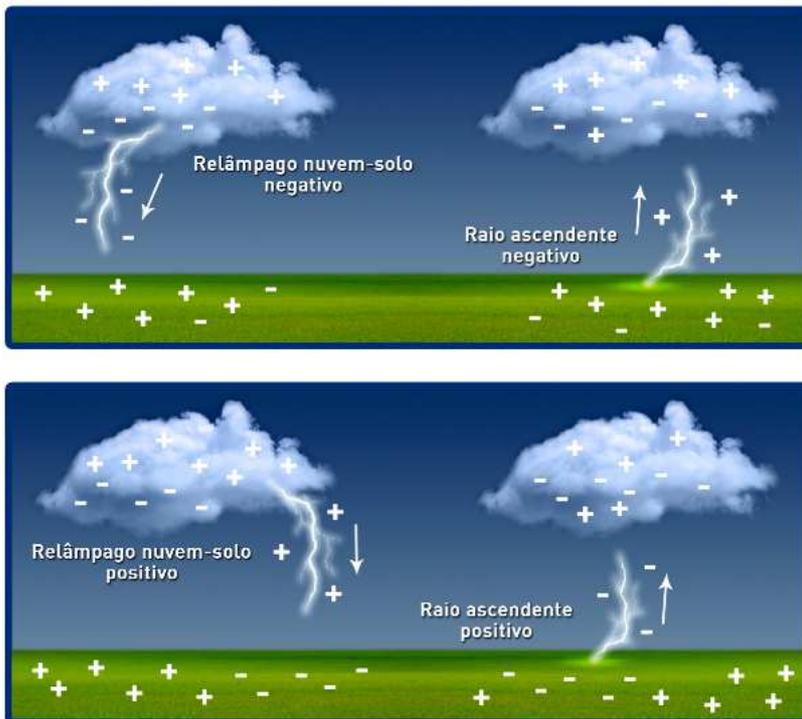
#### **2.1.1 Principais tipos de relâmpagos**

Existem alguns tipos diferentes de propagação de raios, podendo estes variar de acordo com o tipo de solo ou de tempestade. Essas variações podem ser em sentido de propagação e polaridade de carga transferida (VISACRO, 2005).

O sentido de propagação mais danoso pode ser denominado como nuvem-solo (Figura 1), não sendo este o mais incidente, porém o mais compreendido. Neste tipo, o sentido da corrente dá-se da nuvem para o solo, transportando carga negativa. Este fenômeno pode ocorrer transferindo cargas positivas, porém é muito mais incomum (ELAT, 2019), tendo incidência conhecida nos meses que compõe o inverno (NASA, 2019).

Os relâmpagos solo-nuvem são muito menos frequentes que os relâmpagos nuvem-solo, ocorrendo em sua maioria em locais altos, como planícies ou grandes estruturas que é o caso das torres de linhas de transmissão. Estes também podem conter cargas positivas ou negativas (ELAT, 2019).

Figura 1: Relâmpago nuvem-solo.



Fonte: ELAT, 2019.

Um tipo mais incidente, porém, menos conhecido de descarga, é o relâmpado nuvem-nuvem ou relâmpago intranuvem (Figura 2). Estes originam-se dentro das nuvens *Cumulonimbus* e propagam-se entre duas nuvens ou mesmo dentro dela própria. Em alguns casos pode-se haver descarga da nuvem para uma direção qualquer, sendo caracterizados como descargas para o ar. Neste caso, assim como nos casos supracitados, é mais comum o deslocamento das cargas negativas para a região carregada positivamente, mas fazendo-se possível também os relâmpagos no sentido inverso (ELAT, 2019).

Figura 2: Relâmpago nuvem-nuvem



Fonte: ELAT, 2019.

À medida que as partículas de gelo dentro de uma nuvem crescem e interagem, elas colidem, fraturam e se quebram. Acredita-se que as partículas menores tendem a adquirir carga positiva, enquanto as partículas maiores adquirem mais carga negativa. (NASA, 2019).

Este processo faz com que eventualmente as nuvens carreguem-se com elevadas densidades de cargas elétricas, induzindo então, comumente no solo, cargas elétricas de sinal oposto. Nestas condições pode-se afirmar que há uma grande diferença de potencial entre ambos, criando então um campo elétrico entre as extremidades destes. Estes valores elevam-se até o ponto onde ocorre a ruptura da rigidez dielétrica do ar, gerando assim as descargas atmosféricas, através de um canal ionizado (ELAT, 2019; NBR 5419, 2015).

### **2.1.2 Corrente elétrica do raio**

Nos raios nuvem-solo as cargas geralmente movem-se com uma velocidade de aproximadamente 100 km/s (Quilômetro por Segundo), gerando clarões em um canal com diâmetro inferior a 10 metros, canal este onde existe a concentração da sua carga. A primeira etapa de um relâmpago nuvem-solo é chamada de líder escalonado (ELAT, 2019).

Estipula-se que o líder escalonado transporte consigo até 10 C (Coulomb) de carga e uma potência da ordem de *terawatts*. Podendo assim atingir o solo em intervalos de 30 microssegundos até 30 milissegundos, podendo variar devido aos caminhos percorridos, onde a corrente média atinge cerca de 1000 A (Amperes) (IEEE, 2004).

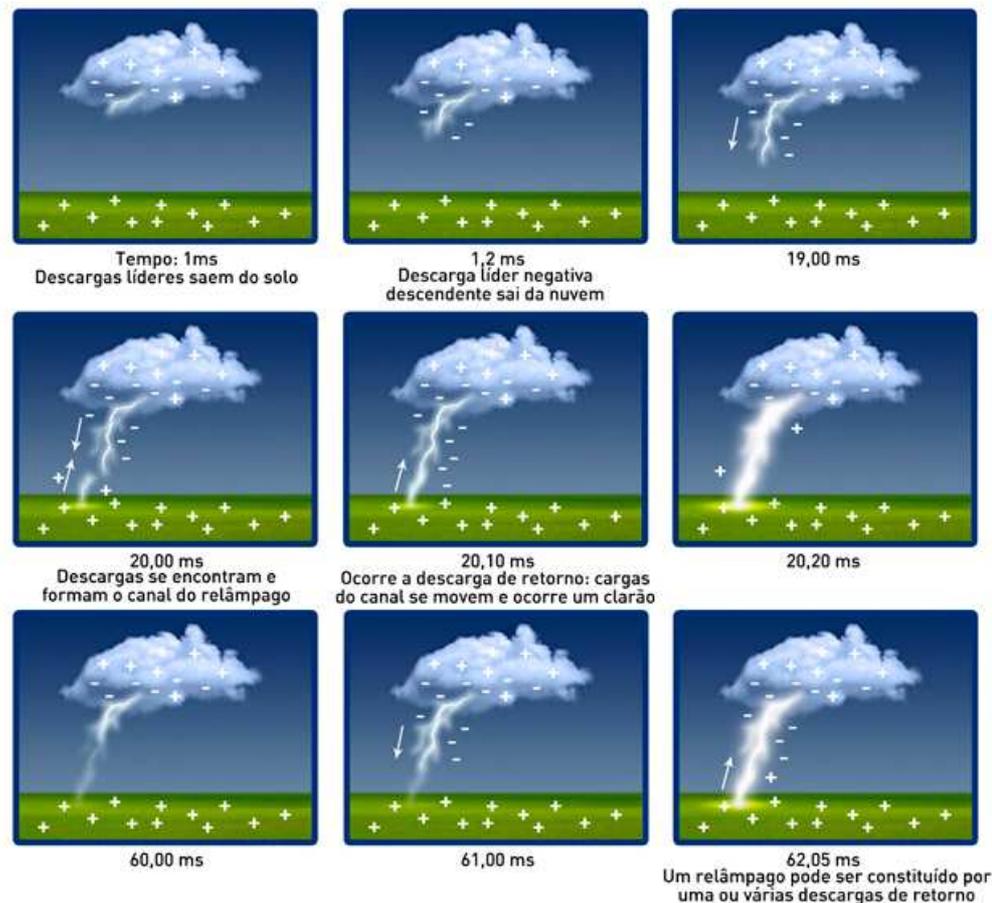
Quando o raio supracitado se aproxima do solo (menos de 150 metros) transportando grandes níveis de carga, gera-se um campo elétrico de elevada intensidade entre este e o solo. A diferença de potencial entre ambos é de cerca de 100 milhões de volts, esta grande diferença faz com que o solo em questão gere também líderes com sinais opostos, conectando-se ao líder proveniente da nuvem, formando assim o canal de propagação (ELAT, 2019).

Após o canal formado, as cargas começam a migrar através deste, no sentido nuvem-solo, é neste momento que se forma o fenômeno visual, o qual dura menos que 30 microssegundos, movendo-se de baixo para cima a uma velocidade de 100 mil km/s. O processo também gera uma onda acústica, proveniente do aquecimento e deslocamento de ar da atmosfera. As temperaturas podem chegar ao 20 000 °C (Graus Célsius), superior a temperatura da superfície do sol (ELAT, 2019).

Obtém-se no solo um pico de corrente que pode variar de 30 kA (Quilo Ampere) até 400 kA. Após 50 microssegundos do seu pico, a corrente decai seus valores em 50% (INPE,

2019). A figura 3 apresenta os tempos de uma descarga, utilizando como exemplo a descarga nuvem-solo.

Figura 3: Tempo de descarga



Fonte: ELAT, 2019.

A descarga solo-nuvem possui comportamento semelhante ao nuvem-solo, porém normalmente acompanhado de uma corrente contínua pulsante, característica que permite maior transferência de cargas entre os dois extremos carregados. Os máximos valores de corrente registrados possuem valores até 30 kA, variando muito de acordo com a polaridade das descargas (ELAT, 2019).

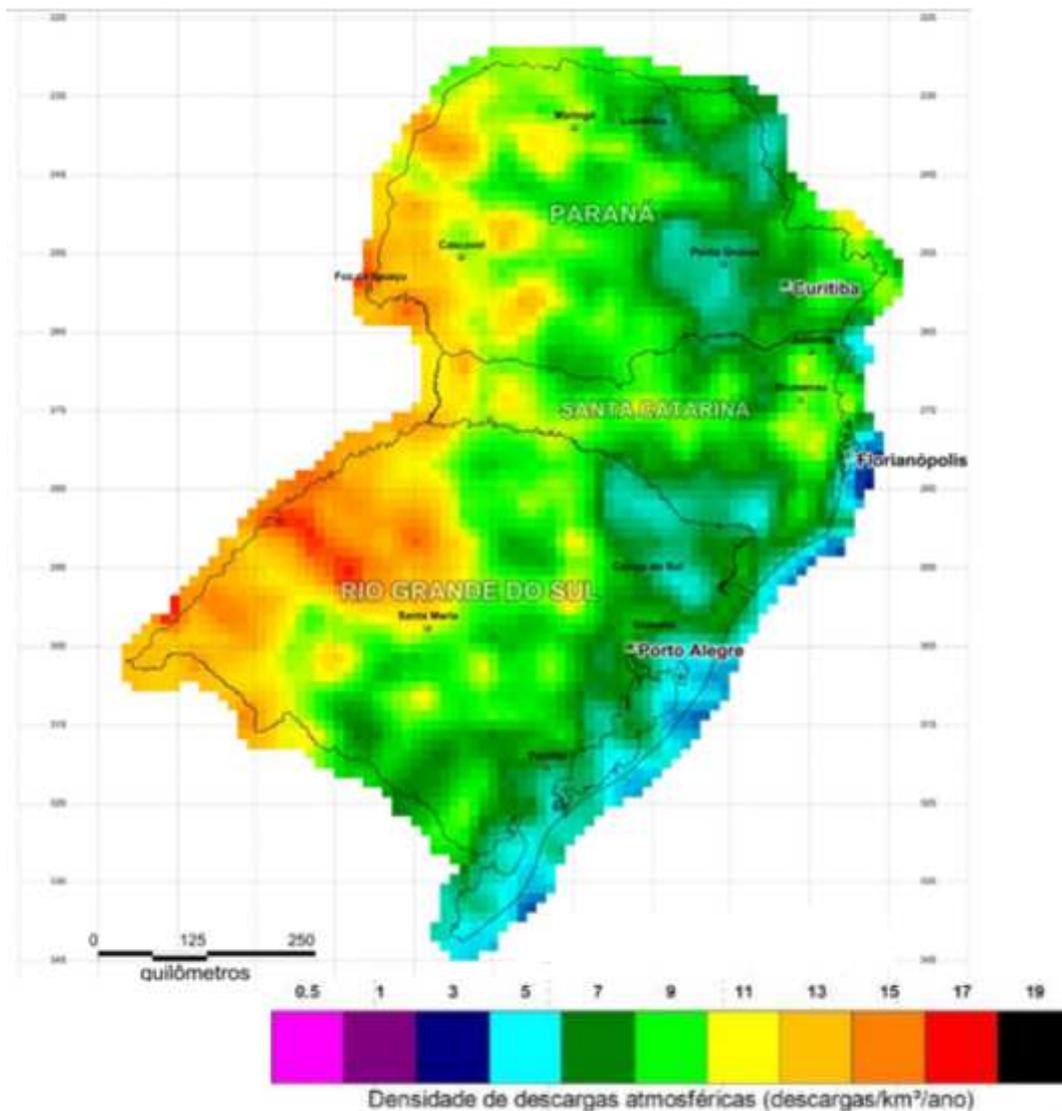
As descargas nuvem-nuvem ou intranuvem propagam-se com velocidade de 40 000 Km/h (Quilômetro por Hora), geralmente transferindo cargas do ponto negativo para o ponto positivo, podendo deslocar-se horizontal ou verticalmente (ELAT, 2019).

### 2.1.3 Densidade de descargas atmosféricas

Devido a sua grande extensão territorial e localização geográfica, o Brasil está entre os países onde há a maior incidência de descargas atmosféricas do mundo. O fato de localizar-se entre as zonas climáticas tropical e temperada, colabora em muito para que o país seja o recordista em descargas, atingindo valores anuais entre 50 e 70 milhões de incidências (INPE, 2019).

Os mapas ceráunicos apresentam a quantidade de tempestades com raios por ano, contribuindo com valores da distribuição da quantidade de descargas em cada região. Esse índice é baseado em quantidades médias obtidas a partir de observações de instituições de pesquisa (ELAT, 2019). A figura 4 apresenta a densidade de descargas da região sul do Brasil.

Figura 4: Densidade de descargas da região sul do Brasil



Fonte: NBR 5419, 2015.

Segundo o mapa de densidade de descargas atmosféricas da NBR 5419, a região de Curitiba-SC onde a linha de transmissão em análise está situada, possui índice cerâmico próximo de 9 descargas por quilômetro quadrado por ano.

## 2.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Uma linha de transmissão é o meio mais importante para entregar a energia produzida aos consumidores finais. Definem-se linhas de transmissão como sistemas físicos que transportam um sinal elétrico entre um gerador e uma carga através de um campo eletromagnético (HAYT, 1975).

A transmissão da energia elétrica pelo território brasileiro é diferenciada por vários níveis de tensão que são determinados pela quantidade de potência a ser transmitida, o que remete a parâmetros físicos e econômicos de construção de linhas de transmissão para esse transporte da energia elétrica (ROBBA, 1972).

O transporte de energia elétrica pelas linhas de transmissão tem a função, perante o setor elétrico, de ser eficiente, confiável e econômico. A fim de transportar uma determinada quantidade de energia elétrica a uma distância preestabelecida (LABEGALINI *et al.*, 1992).

As linhas de transmissão, são compostas por uma parte ativa e uma parte passiva. Os condutores representam a parte ativa, guiando os campos elétrico e magnético e direcionando o fluxo de potência, transmitindo a energia de um ponto a outro. Os elementos passivos, representados pelos isoladores, ferragens e torres, formam toda a estrutura de suporte dos condutores. Existe também uma parte ativa e passiva, formada pelos cabos-guarda e aterramento, responsáveis por conduzir as correntes provenientes das descargas atmosféricas ao solo (FUCHS, 1982).

### 2.2.1 Características construtivas de uma linha de transmissão

Sendo também peça fundamental no comportamento de surtos em linhas de transmissão, os componentes mecânicos de uma linha bem dimensionados em um projeto podem trazer benefícios, facilidades de manutenção, maior grau de confiabilidade do sistema além de uma menor agressão ao meio ambiente (CAMARGO, 1984). Os principais itens construtivos de uma linha de transmissão, são: os cabos condutores, os isoladores e as torres (Figura 5).

Figura 5: Linha de transmissão



Fonte: Autores, 2020.

#### 2.2.1.1 Cabos condutores

Os cabos condutores são os elementos ativos das linhas de transmissão. Atuam com a função de “guias” da energia elétrica, já que, o transporte da energia elétrica se dá pelos campos elétricos e os campos magnéticos. Para se manter dentro dos limites aceitáveis de perdas de energia elétrica pelo seu custo, a escolha adequada e o dimensionamento correto dos cabos condutores são de extremamente importantes. Condutores ideais para linhas aéreas de transmissão devem apresentar as características de alta condutibilidade elétrica, baixo custo de confecção, instalação e manutenção, boa resistência mecânica, baixo peso específico, além da alta resistência a oxidação. Como já citado, essas características são de condutores ideais, pois as mesmas não são atendidas por nenhum material particular. Os que atendem o maior número dessas propriedades são os condutores de cobre e alumínio (LEBEGALINI, 1992).

### 2.2.1.2 Isoladores

Os cabos são suportados pelas estruturas através dos isoladores, que os mantêm isolados eletricamente do seu suporte e do solo. Devem resistir tanto a demandas mecânicas quanto às elétricas. As demandas mecânicas, a que os isoladores são submetidos pelos cabos condutores são as forças verticais, horizontais axiais e transversais. A demanda elétrica que um isolador deve resistir está relacionada a maior tensão que pode ocorrer em algum momento nas linhas. Essas sobretensões podem ter origem atmosférica, por manobras ou chaveamentos de curta duração e as próprias sobretensões senoidais (LEBEGALINI, 1992).

Suas superfícies devem ter acabamento e ser feita de materiais capazes de resistir bem às exposições ao tempo, assim em sua fabricação são utilizados materiais como porcelana vitrificada, vidro temperado ou material sintético composto. Em linhas de transmissão, são utilizados basicamente três tipos de isoladores: (LEBEGALINI, 1992).

- Isoladores de pino;
- Isoladores tipo pilar;
- Isoladores de suspensão.

### 2.2.1.3 Torres

As torres são também chamadas de elementos de sustentação dos cabos das linhas de transmissão. A quantidade de pontos de suspensão na estrutura depende da quantidade de cabos condutores e cabos para-raios a serem suportados. (LABEGALINI; *et al.*, 1992).

A forma final das estruturas toma como base os requisitos citados abaixo, buscando sempre a melhor relação custo/benefício.

- Disposição e distância dos condutores – disposição triangular, horizontal ou vertical;
- Dimensões e formas de isolamento – são determinadas pela tensão nominal e pelas sobretensões previstas;
- Flechas dos condutores;
- Altura de segurança;
- Função mecânica – determinada pelos tipos de carga que devem suportar;
- Formas de resistência das estruturas – estruturas autoportantes (rígidas, flexíveis, mistas ou semirrígidas) ou estruturas estaiadas;
- Materiais estruturais – estruturas metálicas, madeiras ou estruturas de concreto;
- Número de circuitos etc.

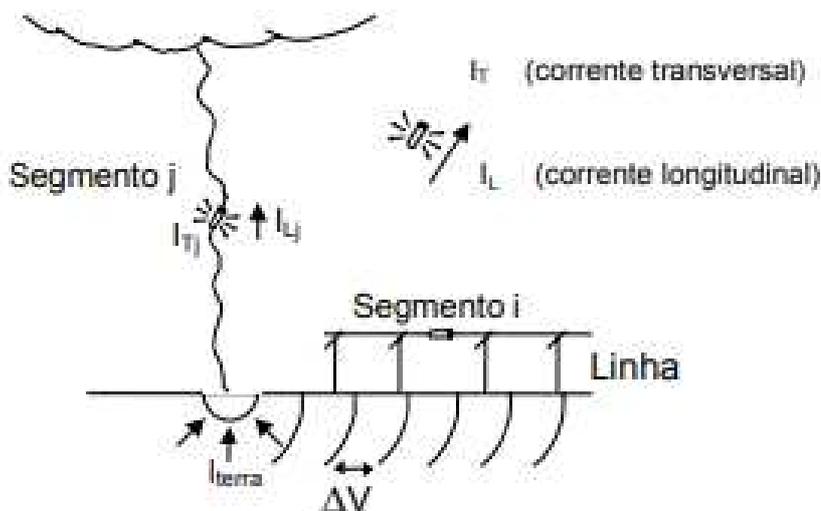
## 2.3 INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 2.3.1 Acoplamentos

Como descrito anteriormente, as descargas atmosféricas possuem elevados valores de tensão, produzindo um campo elétrico de valores elevados em suas proximidades. Quando uma descarga atinge diretamente uma linha de transmissão ou seus arredores, sinistros são causados em sua extensão, devido a criação de arcos de potência provenientes da sobretensão na linha. Dependendo do tipo de proteção aplicada na rede, este episódio pode gerar interrupções temporárias ou permanentes (COELHO, 2010).

A interação entre descargas e condutores da linha, acarretam em ondas de corrente e tensão anormais que se propagam por toda a sua extensão. Os acoplamentos entre descarga e linha podem ocorrer de diferentes formas, sendo as principais, acoplamento elétrico, acoplamento condutivo, acoplamento magnético e acoplamento irradiado. Considerar-se-á para explicitar os fenômenos, uma linha com um condutor, estando este isolado em relação ao solo, por intermédio do dielétrico do ar e dos isoladores da torre (Figura 6) (VISACRO, 2004).

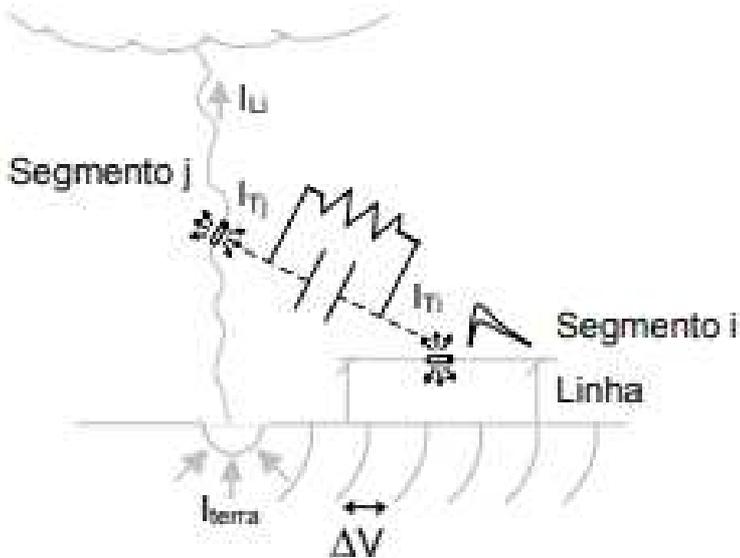
Figura 6: Modelo



Fonte: Silveira, 2001.

O acoplamento elétrico dá-se através de condução ou capacitância como apresentado na figura 7, considerando-se que no ar existe demasiada predominância de efeitos capacitivos (VISACRO, 2005).

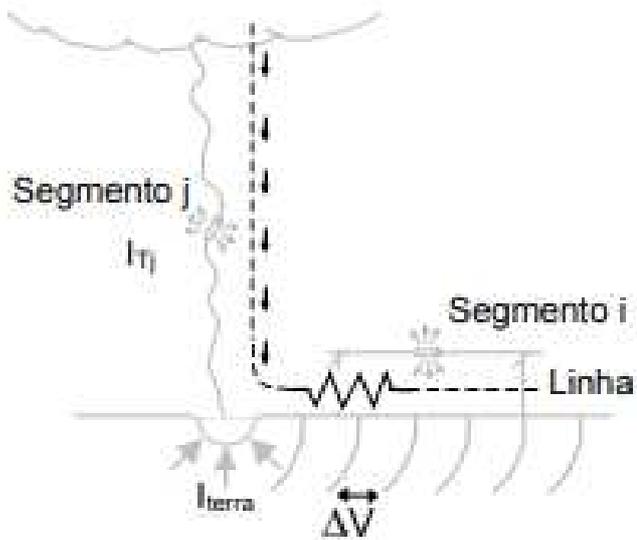
Figura 7: Acoplamento elétrico



Fonte: Silveira, 2001

A corrente de retorno dá condições para que haja condutividade entre o canal e o solo, caracterizando assim o acoplamento condutivo. Ao acoplar-se ao solo, geram-se diferentes potenciais em sua superfície, caso a torre esteja neste meio, poderá sofrer as consequências e induzir um campo nos condutores, como apresentado na figura 8. Neste episódio a corrente que flui pelo canal pode gerar quedas de tensão acentuadas, devido as propriedades resistivas e indutivas (SILVEIRA, 2001).

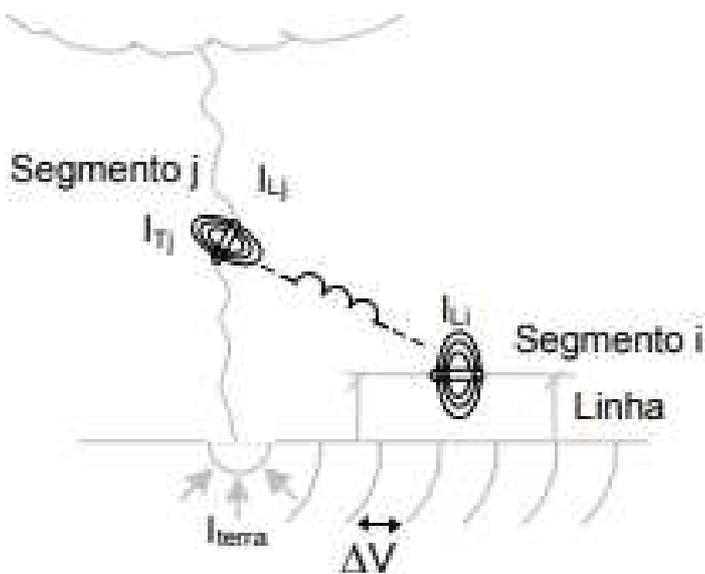
Figura 8: Acoplamento condutivo



Fonte: Silveira, 2001

A corrente de retorno pode ainda induzir um campo magnético entre os condutores da linha e o solo, tipificando um acoplamento magnético, assim como disposto na figura 9. Este acoplamento gera uma força eletromotriz, que possui maior intensidade no espaço vertical entre solo e linha (SILVEIRA; VISACRO, 2002; BARKER, 1996).

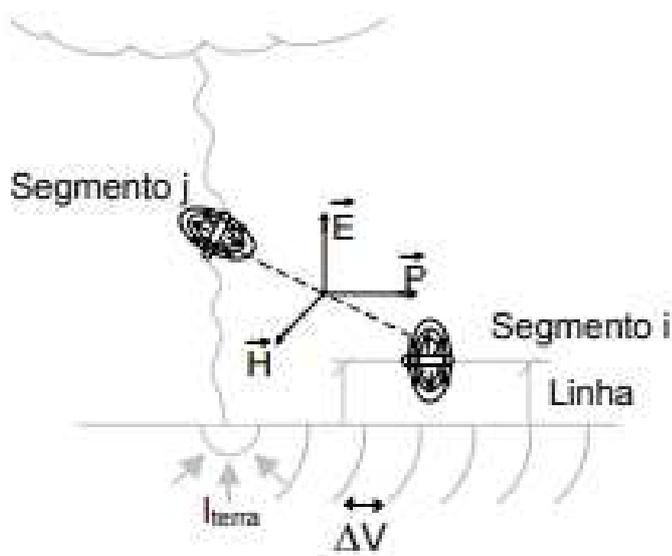
Figura 9: Acoplamento magnético



Fonte: Silveira, 2001

A variação demasiadamente rápida da corrente de retorno no tempo, pode gerar um acoplamento irradiado entre a linha e o canal de descarga, juntamente com uma onda eletromagnética que por sua vez induz tensão na linha, como mostra a figura 10 (MACCANN, 1947).

Figura 10: Acoplamento irradiado



Fonte: Silveira, 2001

## 2.3.2 Parâmetros em regime de surto

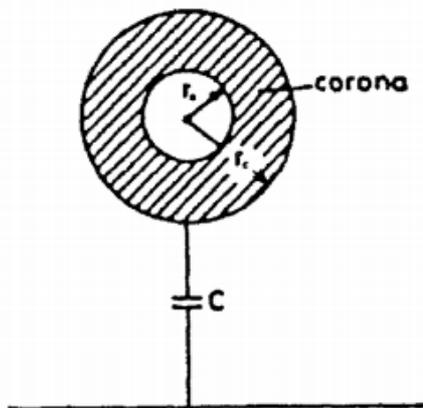
### 2.3.2.1 Impedância de surto

O surto caracteriza-se quando a descarga influencia valores anormais nos parâmetros da linha de transmissão. Ao elevar-se demasiadamente a frequência da linha, automaticamente reduz-se a resistência e condutância da mesma, podendo ser desconsideradas (SADIKU, 2001).

### 2.3.2.2 Efeito corona

Outra consequência do surto, pode ser denominada como efeito corona. Este tem como característica a elevação crítica do campo elétrico nos arredores do condutor. Assim, o ar passa a ser ionizado (figura 11) propiciando então as descargas de corona (SADIKU, 2001).

Figura 11: Efeito corona



Fonte: Miranda, 1994.

### 2.3.2.3 Descarga disruptiva inversa (*backflashover*)

Quando as descargas atingem o cabo de cobertura ou as torres, acabam propagando-se por seus periféricos e possuem seu sentido de corrente geralmente voltados para o sistema de aterramento. Este fenômeno pode gerar reflexões de onda, estas reflexões podem sobrepor-se a onda incidente, causando sobretensões no topo das torres (HILEMAN, 1999).

Este fenômeno acaba por gerar uma grande diferença de potencial entre os condutores e a torre, causando a ruptura da cadeia de isoladores e um curto entre fase e terra (HILEMAN, 1999).

## 2.4 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DA LINHA DE TRANSMISSÃO PARA AVALIAÇÃO FRENTE À DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

### 2.4.1 Nível de isolamento

A tensão máxima suportável pela linha frente a descargas atmosféricas determina o nível de isolamento desta. Podendo ser classificado com a TSI (tensão suportável de impulso atmosférico) ou CFO (*Critical Impulse Flashover Voltage*). Para obtenção destes valores, aplica-se uma tensão impulsiva na linha, cujas quais buscam representar um surto com frente rápida e decaimento lento (RESENDE, 2016).

Denomina-se TSI ou tensão crítica de descarga, o pico de tensão de um impulso que cause interrupção do isolador ou cadeia de isoladores na cauda da onda em 90% dos eventos. Já

o CFO corresponde ao pico de tensão causador de interrupção em 50% dos eventos (RESENDE,2016).

#### **2.4.2 Distância de segurança**

O dimensionamento das distâncias de segurança, deve atentar para os aspectos mecânicos e elétricos da linha. As características elétricas estabelecem as distâncias mínimas de segurança, enquanto os dimensionamentos mecânicos determinam as estruturas cabíveis para os esforços propostos. O correto dimensionamento destes, tem como função reduzir os interrupções ocasionados por sobretensões (FUCHS, 1982).

Dentre todos os espaçamentos, os mais relevantes para a análise abordada são, distância do suporte de isoladores, cabo guarda, altura de segurança e distância de escoamento do isolador (FUCHS, 1982).

O suporte da cadeia de isoladores deve ser determinado analisando-se os cenários elétricos a qual a linha será submetida, assim como as condições de ventos da região, permitindo a movimentação transversal do condutor. A menor distância entre condutor e torre deve ser maior que a distância disruptiva (FUCHS, 1982).

No ponto mais alto da torre deverá estar situado o cabo guarda, criando um ângulo de proteção sobre os condutores fase. A altura deste em relação ao solo, deve ser dimensionada de acordo com o ângulo de cobertura desejado (FUCHS, 1982).

A altura de segurança representa a menor distância admissível entre condutores fase e o solo, esta medida é determinada de acordo com a tensão da linha e o perfil do terreno percorrido, a vegetação situada abaixo da linha deve ser rasteira para não oferecer riscos, como mostra a figura 12 (FUCHS, 1982).

Figura 12: Faixa de segurança



Fonte: Souza, 2012.

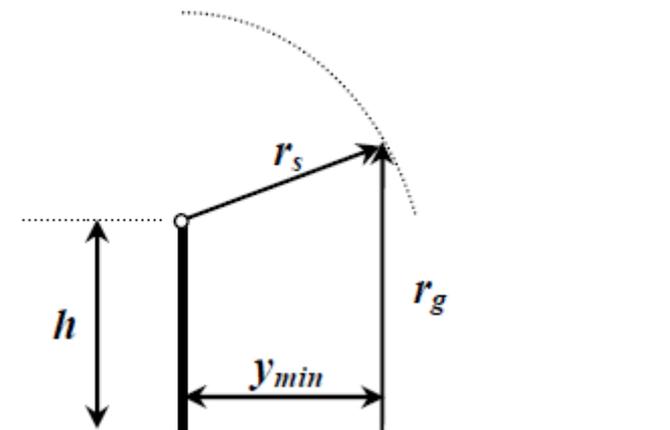
As distâncias de escoamento de um isolador, são as distâncias que garantem a rigidez dielétrica entre condutor e estrutura. Para determinar estas distâncias deve-se levar em conta os níveis de poluição da região, níveis de tensão da linha e índice cerâmico (FUCHS, 1982).

### 2.4.3 Raio de atração

O cabo guarda, quando inserido paralelamente acima dos condutores fase, tem por finalidade criar uma blindagem, atraindo as descargas que eventualmente atingiriam estes condutores. A distância de atração, pode variar de acordo com alguns fatores como altura dos cabos em relação ao solo e amplitude da corrente da descarga atmosférica (RESENDE, 2016).

A quantificação do raio de atração foi desenvolvida empiricamente, a partir de modelos de incidência podendo ser definido com a equação 2, no item 2.4.3 e representado na figura 13. Este parâmetro corresponde a uma distância crítica entre o canal descendente e o objeto. Caso esta distância seja atingida, há grande probabilidade de fechamento do percurso e, conseqüentemente, a materialização da descarga atmosférica, com o fluxo da corrente de retorno (RESENDE, 2016).

Figura 13: Raio de atração



Fonte: Coelho, 2020.

#### 2.4.4 Impedância de surto da torre

A impedância de surto da torre é um item de grande relevância quando analisado o seu comportamento frente a descargas atmosféricas, pois colabora para a obtenção da real tensão sobre o isolador (MOTA, 2011).

A capacitância e indutância da torre são variáveis de acordo com os formatos e tamanhos de estruturas. Logo, estas características tem influência direta nos seus valores de impedância. Para efeito de simulação, as torres deveram ser divididas em três partes iguais, tornando possível verificar o comportamento da impedância e tensão em cada parte quando submetida a um surto. (MOTA, 2011)

#### 2.4.5 Aterramento

Os aterramentos da linha podem ser compostos por cabos ou hastes inseridas no solo, conectados diretamente à estrutura metálica da torre, são os denominados contrapesos. A resistividade do solo é a principal responsável pelo desempenho do sistema de aterramento da linha. Os níveis de resistividade são diretamente influenciados pelos seguintes fatores, tipo de solo, teor de umidade, temperatura, composição química, concentração dos sais da água retida, estratificação e compactação do solo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Em situações de solo com baixa resistividade, são normalmente utilizados eletrodos e cabos de pequenas extensões, neste caso a resistência e impedância de aterramento tem valores baixos e muito próximos. Em cenários de resistência de solo alta, é comum a prática de

estender-se o comprimento dos cabos de aterramento, assim como a profundidade dos eletrodos, visando reduzir os valores da resistência de aterramento, porém, a impedância permanece imutável (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Desta forma, um aterramento com baixa eficiência pode estar mascarado com uma baixa resistência, utilizando-se de longos contrapesos com grandes impedâncias.

## 2.5 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 2.5.1 Interrupções por descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de perturbação causadas em linhas de transmissão, gerando sobretensões que podem leva-las à interrupção. Estes eventos podem causar danos em diversos componentes da linha, principalmente nas cadeias de isoladores (VISACRO, 2005).

Quando as descargas atingem de forma direta os cabos fase produzem uma sobretensão ao longo do circuito, podendo assim proporcionar a disruptura da cadeia de isoladores, este evento caracteriza o *flashover*. É função do cabo guarda interceptar a descarga antes de esta atingir de forma direta os cabos fase, impedindo interrupções (VISACRO, 2005).

O cabo guarda é equipotencializado a estrutura da torre aterrada, e quando uma descarga atinge um destes dois elementos, o campo elétrico destes eleva-se drasticamente. O *backflashover* caracteriza-se quando este campo elétrico atinge um valor crítico com potencial de causar a ruptura da rigidez dielétrica do ar, gerando então um arco elétrico entre torre e fase ou cabo guarda e fase. O correto dimensionamento das estruturas e aterramentos eficientes colaboram para a minimização das interrupções dados por este fenômeno (VISACRO, 2005).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 DELINEAMENTO DO ESTUDO

Este estudo trata-se de uma pesquisa experimental de natureza quantitativa, com base em dados primários, obtidos através de simulações via *software* e cálculos analíticos.

A aplicação da pesquisa experimental refere-se à determinação de um objeto de estudo, as características que podem ser possíveis modificadoras dele e, sobretudo, definição das formas de controle e de observação dos efeitos que esses traços podem produzir no objeto (GIL, 2010).

Na pesquisa quantitativa, os resultados são gerados através de medidas precisas e confiáveis, que permitam análises estatísticas, e que evitem erros de interpretação (SILVA; LOPES; JUNIOR, 2014).

#### 3.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

##### 3.2.1 ATP Draw®

O ATP (*Alternative Transient Program*), é um programa de simulação voltado principalmente para o setor de energia elétrica. O programa pode prever variáveis de interesse dentro das redes de energia elétrica como funções do tempo, tipicamente iniciadas por alguns distúrbios, como a comutação de um disjuntor ou uma falha. Outros estudos especiais são: eletrônica de potência, proteção contra sobretensão e controle do sistema de potência. O programa ATP® é, em princípio, livre de *royalties*, mas requer um contrato de licença assinado.

Ao longo dos anos, o *software* sofreu inúmeras modificações, dentre elas destaca-se a codificação dos dados de entrada, que atualmente faz-se por meio de interface gráfica. A essa evolução deu-se o nome ATP Draw (Interface gráfica do programa ATP), o qual permite a inserção de dados de modo facilitado através de blocos que correspondem a linhas de programação do ATP, o mesmo usualmente é utilizado como passo inicial para uma simulação. Com o programa ATP Draw® é possível construir um circuito elétrico convencional, bastando para isso selecionar modelos pré-definidos dos principais elementos componentes de uma rede elétrica.

É dotado de inúmeros modelos, o que permite a simulação de sistemas como máquinas rotativas, linhas de transmissão, transformadores, para-raios. As interfaces TACS e MODELS

permitem também a modelagem e simulação de sistemas controlados e componentes com características não-lineares como arcos e corona. Além destes, distúrbios assimétricos e simétricos, como faltas no sistema, surtos por descargas atmosféricas e qualquer transiente gerado por chaveamento também podem ser simulados, assim como a análise de harmônicas no domínio da frequência (PRIKLER, 2009).

Uma das razões para se utilizar um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos é que apesar dos sistemas elétricos operarem em regime permanente a maior parte do tempo, eles devem ser projetados para suportar as piores solicitações a que podem ser submetidos. Estas solicitações extremas são normalmente produzidas durante situações transitórias dos sistemas. Conseqüentemente, o projeto de um sistema de potência é determinado mais pelas condições transitórias do que pelo seu comportamento em regime permanente.

### 3.2.2 Excel

O Excel, é uma ferramenta que permite a elaboração de tarefas simples, como controles de contas bancárias ou rotinas domésticas, até funções mais complexas, como tabelas estatísticas, gráficos, planilhas de registro e gestão de dados, dentre outros (SANTOS, 2000).

A função gráfica proporciona a visualização do comportamento de dados, estimativa de tendências e também respostas para funções elementares na análise de desempenho de comportamento de um sistema (MICROSOFT, 2016).

Já as funções mais avançadas permitem a elaboração de planilhas automatizadas, recebendo em sua entrada os dados obtidos em campo e devolvendo na saída, de acordo com as equações inseridas, os demais dados necessários (CANEVER, 2016).

### 3.3 MODELAGEM

Para expressar o comportamento de linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas, são construídos modelos com base nas estruturas típicas e nas formas de onda de impulso padronizadas, de acordo com as normativas nacionais e internacionais.

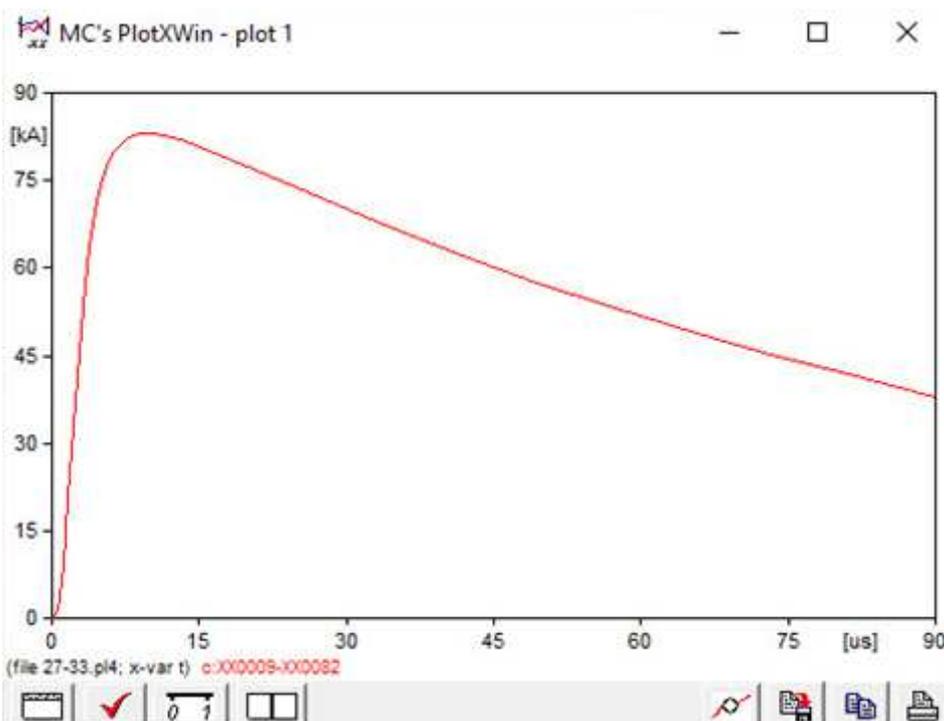
Os itens subsequentes descrevem, de modo mais detalhado, a determinação de cada parâmetro necessário para a determinação dos componentes e assim a construção da simulação em ATP Draw®.

### 3.3.1 Forma de onda do impulso atmosférico

Utilizando-se dos recursos do ATP *Draw*®, criou-se um componente que simula a descarga atmosférica na linha. O recurso permite inserir valores de pico de corrente, constantes de tempo e constante de ajuste da função de *Heidler*. O valor de corrente varia de acordo com os valores de resistência de aterramento do trecho simulado.

A corrente da descarga atinge seu pico em 9,75  $\mu\text{s}$ , tempo de frente efetivo igual a 5,5  $\mu\text{s}$  e tempo de cauda de 77,5  $\mu\text{s}$ . A forma de onda está representada na figura 14.

Figura 14: Forma de onda da descarga

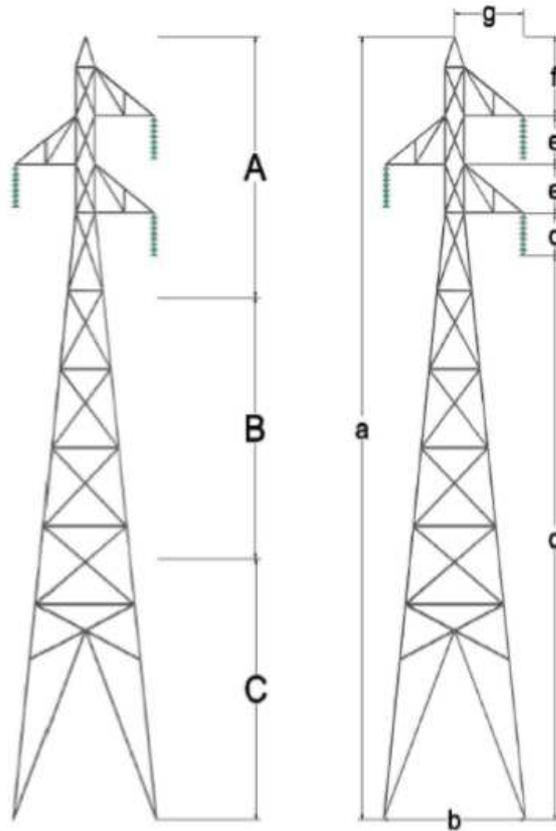


Fonte: Autores, 2020.

### 3.3.2 Caracterização da linha de transmissão

As estruturas de uma linha de transmissão são dimensionadas de acordo com os níveis de tensão a qual é submetida, caracterizando assim os níveis de isolamento requeridos, distâncias de segurança, tipos e quantidade de isoladores. Os vãos médios, tipos de cabos, flechas e distância entre condutores e solo, também são fatores de grande influência para determinar as dimensões do sistema. A tabela 1 apresenta as dimensões e características elétricas, de forma geral, de uma torre de 138 kV (Quilo Volt), referenciadas de acordo com a figura 15.

Figura 15: Estrutura típica das linhas de subtransmissão



Fonte: Canever, 2016.

Tabela 1: Dimensões e características da linha.

<b>(continua)</b>			
<b>Dimensões (m)</b>			
<b>a</b>	20,00	<b>e</b>	1,86
<b>b</b>	6,00	<b>f</b>	3,03
<b>c</b>	22,08	<b>g</b>	2,90
<b>d</b>	1,168	<b>h</b>	0,80
<b>Dados elétricos</b>		<b>Dados mecânicos</b>	
CFO (kV)	570	Cabo guarda (mm <sup>2</sup> )	71
<b>Impedância da torre (Ω)</b>		Condutor fase (mm <sup>2</sup> )	198
A	173	Ri (mm)	0,337
B	173	Re (mm)	0,915

(conclusão)

<b>Impedância da torre (<math>\Omega</math>)</b>		<b>Dados mecânicos</b>	
C	172	Vão médio (km)	0,35
<b>Resistência (<math>\Omega/\text{km}</math>)</b>		Flecha cabo guarda (m)	6,36
Cabo de cobertura	3,44	Flecha do condutor (m)	8,5
Condutor	0,203	Número de isoladores	9
Frequência (Hz)	60	Ângulo de proteção	34,63°

Fonte: Canever, 2016.

Para garantir a fidelidade da simulação, foi utilizada uma planilha disponibilizada com os valores reais da resistência de aterramento para cada uma das 55 torres, comprimento do cabo de contrapeso, distâncias planimétricas e altimétricas, possibilitando estimar o valor de cada vão.

Tabela 2: Comprimento total dos cabos de aterramento e resistência de aterramento em cada torre

(continua)

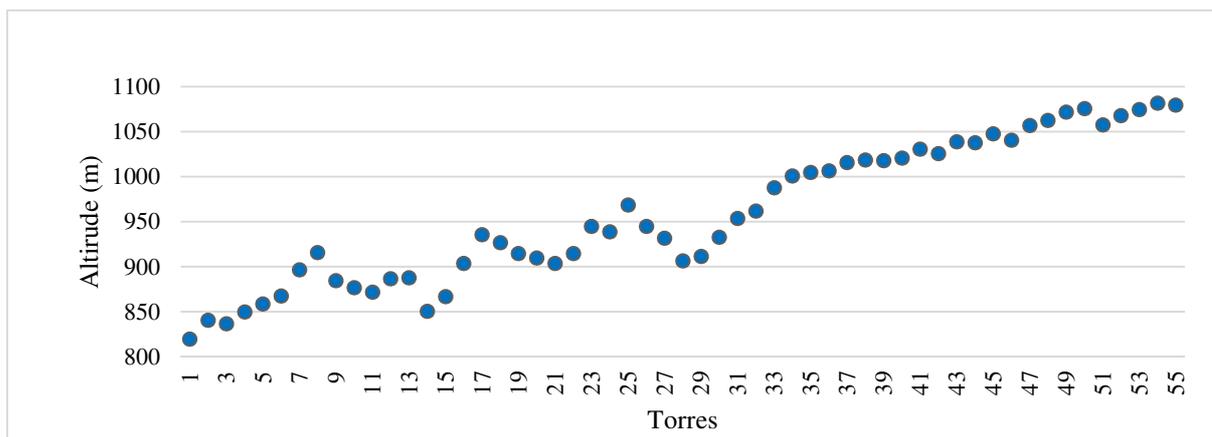
<b>Torre</b>	<b>Comprimento cabo terra (m)</b>	<b>rcc torre (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Torre</b>	<b>Comprimento cabo terra (m)</b>	<b>rcc torre (<math>\Omega</math>)</b>
<b>1</b>	20,0	13,1	<b>29</b>	20,0	13,8
<b>2</b>	10,0	12,0	<b>30</b>	20,0	13,9
<b>3</b>	20,0	9,2	<b>31</b>	10,0	10,6
<b>4</b>	10,0	9,4	<b>32</b>	10,0	12,1
<b>5</b>	20,0	11,7	<b>33</b>	10,0	10,6
<b>6</b>	10,0	13,2	<b>34</b>	30,0	10,8
<b>7</b>	10,0	3,0	<b>35</b>	10,0	11,2
<b>8</b>	10,0	3,9	<b>36</b>	10,0	12,0
<b>9</b>	20,0	11,1	<b>37</b>	10,0	10,2
<b>10</b>	20,0	14,1	<b>38</b>	10,0	12,4
<b>11</b>	30,0	13,2	<b>39</b>	20,0	13,5
<b>12</b>	10,0	11,8	<b>40</b>	10,0	15,0
<b>13</b>	10,0	13,9	<b>41</b>	10,0	9,0
<b>14</b>	120,0	18,2	<b>42</b>	10,0	5,8

(conclusão)

Torre	Comprimento cabo terra (m)	rcc torre ( $\Omega$ )	Torre	Comprimento cabo terra (m)	rcc torre ( $\Omega$ )
15	20,0	5,2	43	10,0	5,1
16	30,0	12,5	44	10,0	7,1
17	10,0	3,6	45	10,0	5,9
18	10,0	9,4	46	20,0	4,3
19	10,0	7,5	47	20,0	11,3
20	20,0	11,9	48	30,0	11,8
21	20,0	15,0	49	30,0	11,9
22	10,0	11,5	50	20,0	11,0
23	10,0	12,3	51	30,0	7,6
24	10,0	11,1	52	10,0	13,2
25	10,0	12,5	53	10,0	6,2
26	30,0	7,9	54	10,0	6,3
27	10,0	14,8	55	20,0	11,6
28	10,0	11,5			

Fonte: Autores, 2020.

Gráfico 1: Perfil altimétrico das torres



Fonte: Autores, 2020.

Tabela 3: Vãos entre torres

<b>Torre</b>	<b>Vão anterior (m)</b>	<b>Torre</b>	<b>Vão anterior (m)</b>
<b>1</b>	0	<b>29</b>	302
<b>2</b>	269	<b>30</b>	329
<b>3</b>	226	<b>31</b>	453
<b>4</b>	567	<b>32</b>	461
<b>5</b>	380	<b>33</b>	236
<b>6</b>	174	<b>34</b>	221
<b>7</b>	360	<b>35</b>	271
<b>8</b>	348	<b>36</b>	316
<b>9</b>	505	<b>37</b>	352
<b>10</b>	301	<b>38</b>	421
<b>11</b>	366	<b>39</b>	317
<b>12</b>	406	<b>40</b>	397
<b>13</b>	249	<b>41</b>	455
<b>14</b>	342	<b>42</b>	463
<b>15</b>	568	<b>43</b>	368
<b>16</b>	291	<b>44</b>	311
<b>17</b>	405	<b>45</b>	398
<b>18</b>	227	<b>46</b>	179
<b>19</b>	498	<b>47</b>	482
<b>20</b>	280	<b>48</b>	140
<b>21</b>	500	<b>49</b>	287
<b>22</b>	385	<b>50</b>	146
<b>23</b>	363	<b>51</b>	337
<b>24</b>	394	<b>52</b>	503
<b>25</b>	420	<b>53</b>	171
<b>26</b>	187	<b>54</b>	310
<b>27</b>	648	<b>55</b>	21,4
<b>28</b>	447		

---

Fonte: Autores, 2020.

### 3.4 SIMULAÇÕES E CÁLCULOS DE PROBLABILIDADE

As simulações foram realizadas a fim de quantificar a intensidade da descarga necessária em cada torre para que o ocorra o *backflshover*.

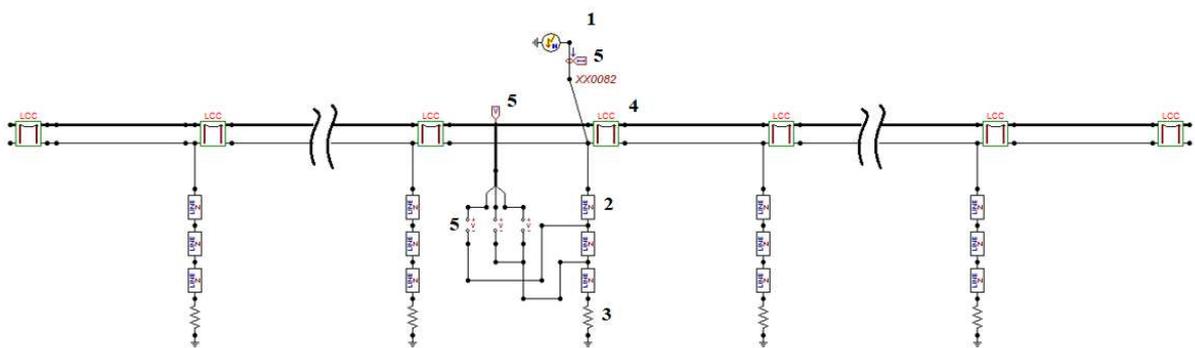
Por conta da limitação do software em relação a extensão da linha de análise, se fez necessário a sua divisão em partes para realizar as simulações, assim foram propostas duas maneiras para realização destas. Uma considerando fielmente a sequência das torres, ou seja, uma simulação para cada torre da linha e outra agrupando as torres com relação a sua resistência de aterramento, divididos em três grupos, o primeiro com resistencias de aterramento até 8 ohms, o segundo com resistencias entre 8,1 e 12 ohms e o terceiro com resistencias maiores que 12 ohms.

Após as simulações, através das características da linha e dos dados de intensidade da descarga encontrados através da simulação, foram calculadas as probabilidades de interrupção por ano da linha para cada modelo de simulação.

#### 3.4.1 Simulação no ATP Draw®

A linha de estudo foi modelada utilizando os blocos de programação disponíveis no *software*, e configurados conforme cada componente da estrutura.

Figura 16: Modelagem da linha no ATP Draw®



Fonte: Autores, 2020

Legenda:

- 1 - *Heidles* – Representa a descarga atmosférica incidente
- 2 - Três componentes *Linelt* – Representam três impedâncias monofásicas em série que caracterizam cada torre.
- 3 - Resistor – Representa resistência aterramento
- 4 - LCC – Configurando com o modelo *JMartí*, representa os dados relacionados aos condutores aéreos tanto relacionado à disposição física quanto a dados elétricos dos mesmos. Esse bloco também foi utilizado nas extremidades da linha, para possibilitar a análise sem considerar a influência das subestações existentes na mesma. (O modelo *JMartí* é o mais indicado para a análise de transitórios).
- 5 - *Open probe* – Dispositivos de medição, amperímetro e voltímetros.

### 3.4.2 Processamento Excel®

Através das simulações, foram obtidas as correntes mínimas necessárias para a ocorrência de descarga disruptiva nos isoladores, determinou-se a probabilidade de ocorrência das correntes encontradas e calculou-se as distâncias mínimas de atração para cada valor de corrente de descarga e altura da torre, resultando na área de atração para cada 100 km de linha. Com esses dados, estima-se a quantidade de faltas devido à incidência direta de descargas atmosféricas no cabo guarda em faltas/ano para cada vão da linha.

### 3.4.3 Simulações com agrupamento real das torres

No primeiro modelo de análise foram agrupadas as torres na mesma sequência que elas são dispostas fisicamente. Considerando a limitação do *software* que comporta para esse caso 15 torres simultâneas, criou-se modelagens que possibilitaram a análise de todas as 55 torres individualmente sem que ocorresse influência nos resultados devido a reflexões na linha.

Para a primeira modelagem criada, foi inserido no início da linha um bloco lcc com comprimento de linha de 7 km e após foram dispostas as primeiras 14 torres e por fim utilizando um bloco lcc com 5 km em sua extremidade e feitas as simulações até a décima torre. A segunda modelagem contemplou as 8 últimas torres da simulação anterior e as próximas 4 torres subsequentes da linha, com blocos lcc na extremidade, este com 5 km, assim foram feitas as simulações da décima primeira torre até a décima quinta. Fazendo esse mesmo procedimento até a décima segunda modelagem onde foram feitas as simulações até a última torre com um bloco lcc de 7 km na sua extremidade.

Para cada simulação, foram estimados os valores de pico de corrente da descarga necessários para causar a disrupção, sendo esse o valor de 530 kV, entre os cabos e a estrutura da torre. Caso o valor estimado não provocasse a disrupção, repetia-se o processo elevando-os até que a disrupção ocorresse. Nos casos onde o primeiro valor simulado ocasionasse a disrupção, o mesmo era reduzido até encontrar o menor valor possível. Essa elevação e redução dos valores de corrente foram feitos na magnitude de 500 amperes por tentativa. Considerando as 55 torres e um número médio de cinco tentativas para cada, foram necessárias 275 simulações para encontrar todos os valores de disrupção.

### 3.4.4 Simulações com agrupamento das torres considerando resistência de aterramento

No segundo caso, as torres foram agrupadas em relação a sua resistência de aterramento, dividindo-as em três grupos de até 8 ohms, de 8 a 12 ohms e maiores que 12 ohms, e então executada uma única simulação para cada grupo, feita a coleta dos dados na torre central dos mesmos.

A análise de disrupção foi feita da mesma maneira como apresentada para o agrupamento real das torres, so que nesse caso foram necessarias apenas o total médio de 15 simulações para ser possível encontrar o numero total de interrupções.

### 3.4.5 Probabilidade

Os valores de corrente necessários para causar interrupções por *backflashover* são elevados. O valor da impedância de aterramento das torres tem efeito importante neste número de interrupções, pois as correntes críticas diminuem à medida que a resistência de aterramento aumenta, fazendo com que a probabilidade de ocorrência de descarga disruptiva aumente e consequentemente o número estimado de interrupções.

A linha estudada está localizada em uma região com índice cerâmico de 9 descargas por ano por quilômetro quadrado, segundo a NBR 5419. Foram relacionados com esse índice o resultado do valor do seu raio de atração e distâncias de cada vão para estimar o número de descargas que possam vir a atingir a linha.

O fato de saber quantas descargas atingem a linha anualmente, não possibilita prever o índice de interrupções, visto que nem todas as descargas incidentes possuem valores de corrente suficientes para causar disrupção. Através dos valores de corrente necessária para ocasionar disrupção em cada torre obtidos através das simulações, foram calculadas a probabilidade de ocorrência de descargas desta magnitude na região através da equação 1.

$$P = \frac{1}{1 + \frac{I_p^{2,6}}{31}} \quad (1)$$

Onde:

P = Percentual de chances de a torre ser atingida por uma descarga que cause disrupção;

I<sub>p</sub> = Corrente de disrupção de cada torre (obtida através das simulações).

O número de interrupção por ano em cada vão da linha foi encontrado calculando as distâncias de atração utilizando as equações 2, 3, 4 e 5.

$$y_{min} = \sqrt{(rs^2 - (rg - h)^2)} \quad (2)$$

$$rs = \alpha \times I_o^\beta \quad (3)$$

$$rg = kg \times rs \quad (4)$$

$$kg = 0,36 + 0,17 \ln(43 - h) \quad (5)$$

Onde:

$y_{min}$  = distância de atração;

$I_o$  = corrente da descarga;

$h$  = altura da estrutura;

$rs$  = raio de atração do condutor;

$rg$  = raio de atração da terra;

$kg$  = constante.

Por fim o índice de interrupção em cada vão foi calculado utilizando a equação 6.

$$N = 2 \times 10^{-3} \times Ng \times y_{min} \left( I_o + \frac{b}{2} \right) \times P \quad (6)$$

Onde:

$N$  = número de interrupção / km / ano;

$Ng$  = Densidade de descargas na região;

$y_{min}$  = distância de atração;

$I_o$  = corrente da descarga;

$b$  = Largura da estrutura;

$P$  = probabilidade de ocorrência de  $I_o$ .

O somatório do número estimado de descargas por ano que causaram disruptura em cada vão corresponde ao provável número de descargas que irão causar na linha do estudo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando as informações das simulações com o posicionamento agrupado e real das torres, em relação as resistências de aterramento, foi possível estipular a corrente de pico necessária para ocasionar disrupção para cada um dos agrupamentos apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 4: Resistências de aterramento e correntes de disrupção nas torres no grupo real

(continua)

<b>Torre</b>	<b>Resistência de aterramento torre</b>	<b>Corrente disrupção (kA)</b>	<b>Torre</b>	<b>Resistência de aterramento torre</b>	<b>Corrente disrupção (kA)</b>
<b>1</b>	13,1	57,5	<b>29</b>	13,8	65,0
<b>2</b>	12,0	65,0	<b>30</b>	13,9	62,0
<b>3</b>	9,2	75,5	<b>31</b>	10,6	68,5
<b>4</b>	9,4	73,5	<b>32</b>	12,1	70,0
<b>5</b>	11,7	66,0	<b>33</b>	10,6	83,0
<b>6</b>	13,1	61,5	<b>34</b>	10,8	81,0
<b>7</b>	3,0	104,5	<b>35</b>	11,2	74,0
<b>8</b>	3,9	99,5	<b>36</b>	12,0	68,5
<b>9</b>	11,1	67,5	<b>37</b>	10,2	72,0
<b>10</b>	14,1	59,0	<b>38</b>	12,4	66,0
<b>11</b>	13,2	61,0	<b>39</b>	13,5	63,5
<b>12</b>	11,8	65,5	<b>40</b>	15,0	66,5
<b>13</b>	13,9	59,5	<b>41</b>	9,0	75,0
<b>14</b>	18,2	49,5	<b>42</b>	5,8	89,5
<b>15</b>	5,2	93,0	<b>43</b>	5,1	94,0
<b>16</b>	12,5	63,5	<b>44</b>	7,1	85,5
<b>17</b>	3,6	107,0	<b>45</b>	5,9	100,0
<b>18</b>	9,4	81,5	<b>46</b>	4,3	109,5
<b>19</b>	7,5	85,5	<b>47</b>	11,3	77,0
<b>20</b>	11,9	70,5	<b>48</b>	11,8	79,5
<b>21</b>	15,0	57,0	<b>49</b>	11,9	79,0
<b>22</b>	11,5	67,5	<b>50</b>	11,0	79,5

(conclusão)					
Torre	Resistência de aterramento torre	Corrente disrupção (kA)	Torre	Resistência de aterramento torre	Corrente disrupção (kA)
23	12,3	65,5	51	7,6	82,0
24	11,1	68,0	52	13,2	68,0
25	12,5	70,0	53	6,2	100,0
26	7,9	89,0	54	6,3	96,0
27	14,8	55,5	55	11,6	71,5
28	11,5	70,5			

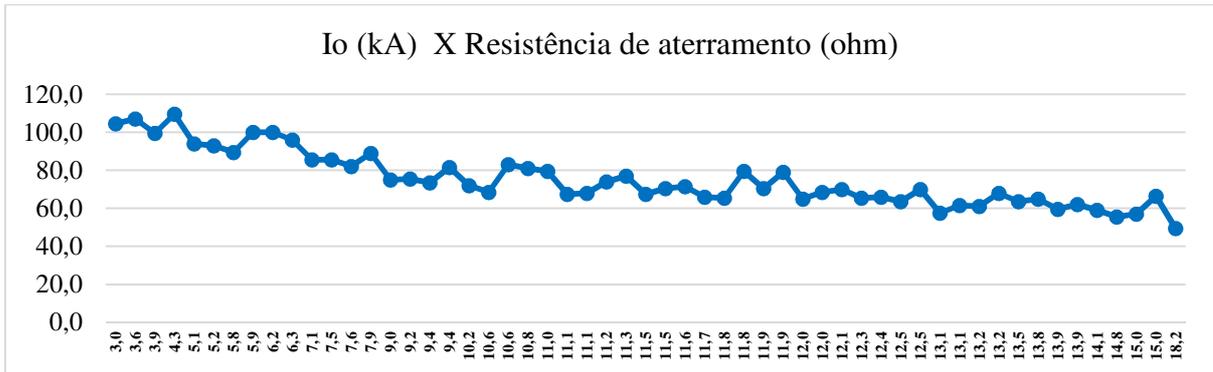
Fonte: Autores, 2020

Tabela 5: Resistências de aterramento e correntes de disrupção nas torres agrupadas.

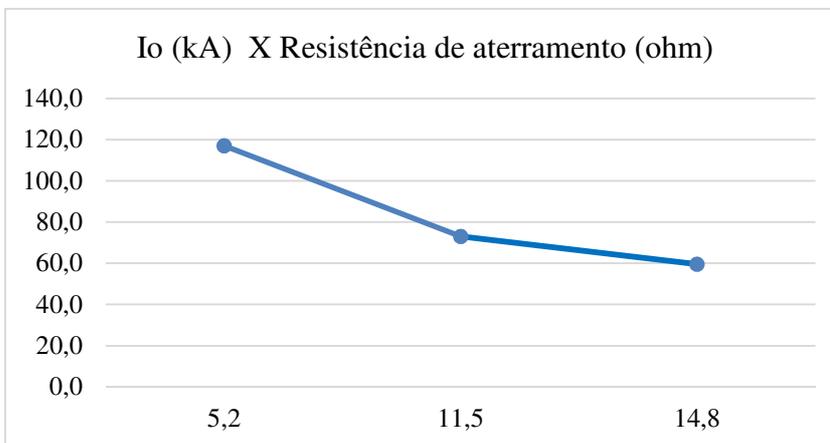
Agrupamento das torres	Resistência de aterramento torre central	Corrente disrupção (kA)
<8 OHMS	5,2	117,0
8>12 OHMS	11,5	73,0
>12 OHMS	14,8	59,5

Fonte: Autores, 2020

Analisando os valores de corrente da descarga necessário para ocorrer o *backflashover*, encontrados através das simulações, evidenciou-se a influência direta das resistências de aterramento com os resultados das correntes de descargas, estas expressas de maneira representativa nos gráficos 2 e 3. Verificou-se que a condição de aterramento mais crítica (18,2  $\Omega$ ), uma corrente de aproximadamente 49,5 kA é suficiente para causar uma disrupção, enquanto que com resistências menores que 4  $\Omega$  de impedância, são necessários correntes maiores que 100 kA para que ocorra tal evento. Segundo Canever, 2016 em sua análise, para a condição de aterramento mais crítica 50  $\Omega$ , uma corrente de aproximadamente 19 kA foi suficiente para causar uma disrupção, enquanto que com 5  $\Omega$  de impedância foram necessários 108 kA para que ocorra um *backflashover*, o que mostra uma relação semelhante aos valores encontrados neste estudo.

Gráfico 2: Relação  $I_o \times$  Resistência de aterramento das torres.

Fonte: Autores, 2020

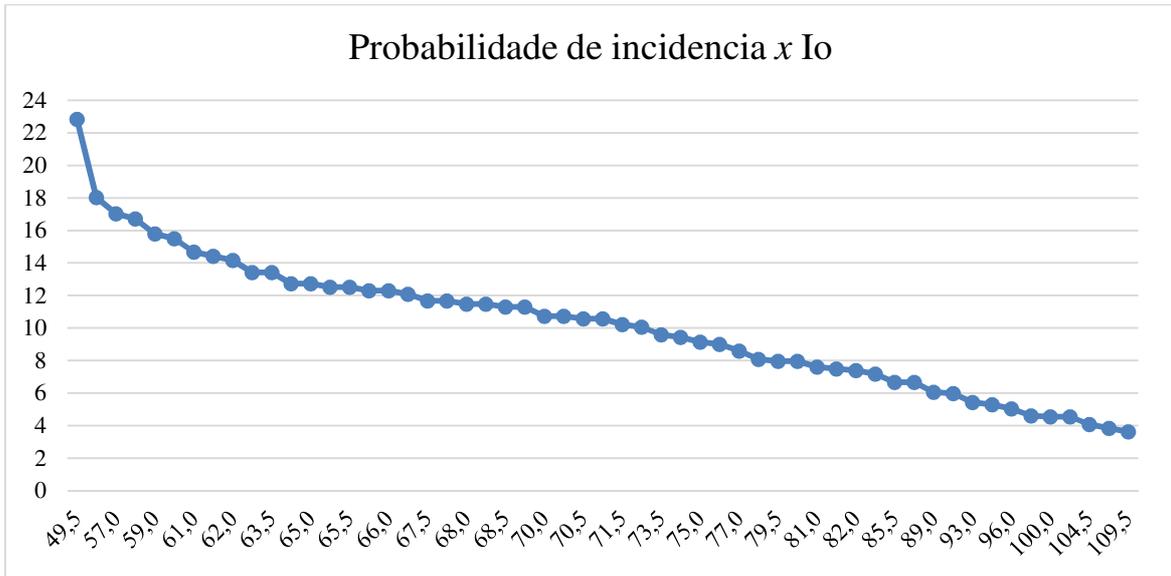
Gráfico 3: Relação  $I_o \times$  Resistência de aterramento das torres agrupadas.

Fonte: Autores, 2020

Através da análise feita, pode-se afirmar ainda que a resistência de aterramento da torre que é atingida pela descarga não é o suficiente para determinar a intensidade de corrente necessária para causar a disrupção, é necessário considerar as resistências das torres adjacentes, evidenciado no comparativo dos valores encontrados de corrente de disrupção para torres de 5,2 ohms dos dois agrupamentos justificada pelo escoamento da descarga ao longo da linha.

Através das correntes necessárias para a disrupção apresentadas nas tabelas 4 e 5, foram calculadas a probabilidade de ocorrência para cada intensidade de descarga, apresentadas no Gráfico 4.

Gráfico 4: Probabilidade de incidência por corrente da descarga.



Fonte: Autores, 2020

O gráfico expressa que quanto mais elevado é o valor de corrente, menor a probabilidade que o mesmo ocorra, sendo a menor corrente de descarga para ocasionar disrupção encontrada é de 49,5 kA, esta por sua vez tem a probabilidade de 22,85% de ocorrência e a maior de 109,5 kA de 3,62% de chance de acontecer.

Utilizando os dados levantados, foram calculadas as estimativas de números de interrupções por ano, da respectiva linha, através do somatório dos valores de cada vão.

Tabela 6: Quantidade de interrupções por ano nas torres e total.

(continua)

Torre	Corrente disrupção (kA)	Quantidade de interrupções/ano	Torre	Corrente disrupção (kA)	Quantidade de interrupções/ano
1	57,5	0,048	29	65,0	0,0917
2	65,0	0,0719	30	62,0	0,1232
3	75,5	0,0882	31	68,5	0,1211
4	73,5	0,1106	32	70,0	0,0888
5	66,0	0,0783	33	83,0	0,0426
6	61,5	0,0853	34	81,0	0,048
7	104,5	0,0425	35	74,0	0,0677
8	99,5	0,0563	36	68,5	0,0885
9	67,5	0,1096	37	72,0	0,0937

(conclusão)

<b>Torre</b>	<b>Corrente disrupção (kA)</b>	<b>Quantidade de interrupções/ano</b>	<b>Torre</b>	<b>Corrente disrupção (kA)</b>	<b>Quantidade de interrupções/ano</b>
<b>10</b>	59,0	0,1142	<b>38</b>	66,0	0,1044
<b>11</b>	61,0	0,125	<b>39</b>	63,5	0,108
<b>12</b>	65,5	0,0939	<b>40</b>	66,5	0,1189
<b>13</b>	59,5	0,0998	<b>41</b>	75,0	0,1033
<b>14</b>	49,5	0,2054	<b>42</b>	89,5	0,0672
<b>15</b>	93,0	0,0646	<b>43</b>	94,0	0,05
<b>16</b>	63,5	0,1053	<b>44</b>	85,5	0,0625
<b>17</b>	107,0	0,0362	<b>45</b>	100,0	0,0377
<b>18</b>	81,5	0,07	<b>46</b>	109,5	0,0362
<b>19</b>	85,5	0,0686	<b>47</b>	77,0	0,0667
<b>20</b>	70,5	0,0982	<b>48</b>	79,5	0,0431
<b>21</b>	57,0	0,1604	<b>49</b>	79,0	0,0443
<b>22</b>	67,5	0,1017	<b>50</b>	79,5	0,0488
<b>23</b>	65,5	0,1085	<b>51</b>	82,0	0,0802
<b>24</b>	68,0	0,1093	<b>52</b>	68,0	0,0905
<b>25</b>	70,0	0,0774	<b>53</b>	100,0	0,0314
<b>26</b>	89,0	0,0683	<b>54</b>	96,0	0,0234
<b>27</b>	55,5	0,2072	<b>55</b>	71,5	0,0026
<b>28</b>	70,5	0,0943	<b>TOTAL</b>		<b>4,5835</b>

Fonte: Autores, 2020

Tabela 7: Quantidade de interrupções por ano nas torres agrupadas e total.

<b>Agrupamento das torres</b>	<b>Resistência de aterramento torre</b>	<b>Corrente disrupção (kA)</b>	<b>Quantidade de interrupções/ano</b>
<b>&lt;8 OHMS</b>	5,2	117,0	0,4239
<b>8&gt;12 OHMS</b>	11,5	73,0	1,6276
<b>&gt;12 OHMS</b>	14,8	59,5	2,1568
<b>TOTAL</b>			<b>4,2083</b>

Fonte: Autores, 2020

Relacionando os dois modelos de simulação considerando as resistências de aterramento da torre, para o caso do agrupamento real, a média dos resultados das torres até 8 ohms é de 95,8 kA, enquanto na simulação agrupada, obteve-se 117 kA, o que demonstra uma diferença de 18,11%. Os valores de corrente de disrupção com a resistência de aterramento de 8 a 12 ohms para os modelos reais e agrupados são 73,7 kA e 73 kA respectivamente, resultando em 0,94% de diferença. Enquanto que para o valor de disrupção médio encontrado para as resistências de aterramento acima de 12 ohms é de 62,3 kA para o simulação real e de 59,5 kA para a agrupada, proporcionando uma diferença de 4,49% entre elas.

Com a relação aos resultados obtidos através dos dois modelos de análise, foi possível evidenciar que a influência da resistência de aterramento da torre tem relação direta nos valores de corrente de descarga necessária para ocasionar disrupção na linha de transmissão.

Com o somatório do número de interrupções em cada modelo de agrupamento das torres, encontrou-se o número de 4,5835 interrupções/ano para a análise feita com o posicionamento real das torres, e 4,2083 com o agrupamento através das resistências de aterramentos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando os dois modelos de agrupamentos das torres analisados, é possível perceber a diferença entre eles, expressa na probabilidade da disrupção por ano da linha, obtidas através das análises apresentadas, essa diferença por sua vez se deve ao fato da influência das torres adjacentes durante a simulação. De qualquer modo, não se pode descartar a possibilidade do agrupamento das torres, pois o mesmo mostra que com apenas 3 modelagens foi possível chegar a um valor próximo ao modelo que as avalia individualmente.

Isso mostra que com a análise simplificada pode se ter resultados satisfatórios, otimizando o tempo de estudo e levantamento de informações essenciais para tomadas de decisões, bem como para resolução de problemas nas linhas decorrentes de descargas atmosféricas.

Analisando os resultados é possível evidenciar que quanto menor a impedância de aterramento da torre maior é a intensidade de corrente da descarga necessária para que seja possível ocasionar *backflashover*. Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se implementar os modelos de análise em conjunto com soluções práticas para a diminuição da resistência de aterramento das torres, relacionando também com os indicadores de continuidade de fornecimento de energia das concessionárias.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas, NBR 5419**. Fev. 2001.
- ALLIBONE, T. E., PERRY, F. R. Standardization of Impulse-Voltage Testing. IEE Journal. Vol. 78, No. 471. March, 1936.
- BARKER, P.P., SHORT, T.A., EYBERT-BERARD, A.R., BERLANDIS, J.P., “**Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes**”, IEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, abril, 1996.
- CANEVER, G. L. **Análise do Desempenho de Linhas de Subtransmissão Frente às Descargas Atmosféricas**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia elétrica) Faculdade SATC. Criciúma, 2016.
- CAMARGO, C. C. B. Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Fundamentais, Florianópolis: Editore da UFSC / Eletrobrás, Co-Edição Eletrobrás, 1984.
- COELHO, V. L. **Análise do Desempenho de Redes Aéreas de Distribuição de Média Tensão Frente à Ação das Descargas Atmosféricas**. 2010. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93891/281953.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 18 mai. 2019.
- FUCHS, R. D., DE ALMEIDA, M. T. Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa/Antônio Carlos Gil. - 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2010.
- HAYT, William Hart. **Análise de circuitos em engenharia**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 619 p.
- HILEMAN, A. R. Insulation coordination for power systems. New York: Press, CRC, 1999.
- IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std 1410. New York, 2004.
- INPE/ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>, Acesso em: 10 mai. 2019.
- KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J.M.; “Aterramento Elétrico”. Editora Sagra, DCLuzzatto, Porto Alegre, 1995.
- LABEGALINI, P. R., LABEGALINI, J. A., FUCHS, R. D. ALMEIDA, M. T. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão. Editora Edgard Blücher LTDA, 1992.
- MACANN, G.D., “The Effect of Corona on Coupling Factors, Between Ground Wires and Phase Conductors” – AIEE Vol. 62, 1947.

MICROSOFT. Products Office. :< <https://products.office.com/pt-br/excel>> Acesso em: Maio de 2020.

MIRANDA, G. C., Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão. 1994. UFMG Belo Horizonte, 1994. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260544/1/Miranda\\_GlassioCostade\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260544/1/Miranda_GlassioCostade_D.pdf) Acesso em: 20 jun. 2020.

MOTA, P. C. A. Estimativa da Impedância de Surto de Torres das Linhas de Transmissão Utilizando o Método De Elementos Finitos. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG, Out 2011.

NASA - Global Hydrology and Climate Center (GHCC), <http://thunder.msfc.nasa.gov/>. Acesso em 05/03/2019.

PRIKLER, L., HOIDALEN, H. K. **ATPDraw Version 5.6 – User’s Manual**. Norway, 2009.

ROBBA, C. C. B. D. OLIVEIRA, H. P. SCHMIDT E N. KAGAN, Introdução a Sistemas Elétricos de Potência, São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1972.

SADIKU, M. N. O. Elements of Electromagnetics. 3rd Ed. New York: Oxford University Press, 2001.

RESENDE, F. B. “**Desempenho de linhas aéreas em relação a descargas atmosféricas**” Revista Eletricidade Moderna disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2016/12/20/desempenho\\_de\\_linhas.html](https://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2016/12/20/desempenho_de_linhas.html)

SANTOS, Aldemar de Araújo. Informática na empresa. São Paulo: Atlas. 2000.

SILVA, D; LOPES, E. L; JUNIOR, S. S. B. Pesquisa quantitativa: elementos, paradigmas e definições. **Revista de Gestão e Secretariado**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 1-18, Jan/Abr, 2014. Disponível em: [https://www.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/297/pdf\\_36/](https://www.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/297/pdf_36/) Acesso em: 07 maio 2019.

SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., “**Lightning Induced Overvoltage: How Return-current Model Influences It?**”, In: Proceedings of IEEE/PES T&D 2002 Latin America, São Paulo, Brasil, 2002a.

SILVEIRA, F.H., “**Aplicação de Um Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica.**” Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte – MG, Julho 2001.

SOUZA, C. J., Determinação da Largura de Faixa de Segurança de Linhas de Transmissão: Um Estudo Paramétrico. 2012. UFMG Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A2EFPP/11> Acesso em: 20 jun. 2020.

VISACRO, S. Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia. [S.l.]: Artliber, 2005.

VISACRO, S. et al. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at morro do cachimbo station. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 109, n. D1, 2004. 19

ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Livraria da física, 2006. 312 p. ISBN 8588325411