



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUIZ FERNANDO PEREIRA TEIXEIRA

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE
RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO NO DESEMPENHO ELÉTRICO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO PERANTE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS**

FORMIGA-MG

2022

LUIZ FERNANDO PEREIRA TEIXEIRA

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE
RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO NO DESEMPENHO ELÉTRICO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO PERANTE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal
de Minas Gerais como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: André Roger Rodrigues, Dr.

FORMIGA-MG

2022

Teixeira, Luiz Fernando Pereira.
T266a Análise computacional da influência dos modelos de resistência de aterramento no desempenho elétrico de linhas de transmissão perante sobretensões atmosféricas / Luiz Fernando Pereira Teixeira -- Formiga : IFMG, 2022.
97p. : il.

Orientador: Prof. Dr. André Roger Rodrigues
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Descargas atmosféricas. 2. Aterramento. 3. Ionização do solo.
4. Sobretensões impulsivas. 5. Suportabilidade elétrica de arranjos isolantes. 6. Transmissão de energia elétrica I. Rodrigues, André Roger.
II. Título.

CDD 621.3

LUIZ FERNANDO PEREIRA TEIXEIRA

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE RESISTÊNCIA
DE ATERRAMENTO NO DESEMPENHO ELÉTRICO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO PERANTE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Minas
Gerais como requisito para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Avaliado em: 17 de janeiro de 2022.

Nota: 89,3

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Roger Rodrigues, Dr. (orientador)

Prof. Carlos Renato Borges dos Santos, Dr.

Prof. Marco Antônio Silva Pereira, Me.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre iluminando meu caminho, me dando força e sabedoria a todo momento.

A meu pai, João Vilmar (*in memoriam*), e minha mãe, Magna Fernandes, por terem me proporcionado uma boa educação, por todas orações a mim direcionadas, e por terem me incentivado nos momentos mais difíceis da minha vida.

Agradeço aos meus irmãos, Mailson e Maria Gabriela, pela amizade e momentos de descontrações.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Roger Rodrigues, pelas oportunidades de crescimento acadêmico. Meu muito obrigado pela atenção, paciência e pelos conselhos.

Por fim, agradeço a todos aqueles que me ajudaram em algum momento da minha vida, na ausência de uma pequena ajuda ou apoio, minhas experiências poderiam ser totalmente diferentes.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência da resistência de aterramento na amplitude das sobretensões impulsivas estabelecidas nos arranjos isolantes de um sistema de transmissão ao ser atingido por uma descarga atmosférica direta nos cabos de blindagem. Para tanto foi realizada uma revisão acerca dos principais modelos de aterramento atualmente existentes e empregados para condução deste tipo de estudo. Os modelos identificados para representação da resistência de aterramento foram implementados computacionalmente por meio do emprego da linguagem *Models* do *software ATPDraw*. São apresentados os resultados de estudos computacionais conduzidos com o emprego dos diferentes modelos de aterramento com objetivo de identificar as vantagens e desvantagens de cada modelo investigado quanto ao desempenho das linhas de transmissão. Para tanto são realizadas análises comparativas entre as amplitudes das sobretensões atmosféricas resultantes nas cadeias de isoladores e as magnitudes da corrente crítica de descarga devido ao fenômeno de *backflashover*. A análise dos resultados evidencia a influência da resistência de aterramento na suportabilidade elétrica de sistemas de transmissão de energia perante sobretensões de natureza atmosférica considerando-se as características individuais de cada modelo de aterramento. As constatações advindas dos estudos computacionais são de grande relevância tendo influência direta no projeto de coordenação de isolamento de linhas de transmissão e conferindo maior precisão aos resultados de estudos de desempenho de linhas de transmissão perante sobretensões atmosféricas.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas. Aterramento. Ionização do solo. Sobretensões impulsivas. Suportabilidade elétrica de arranjos isolantes. Transmissão de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the influence of the grounding resistance on the amplitude of the impulsive overvoltages applied to the transmission lines insulation systems due to direct lightning strokes in the overhead ground wires. Thereby, a review was performed in order to investigate the main models able to represent the grounding resistance in transmission lines performance studies. The major models applied to grounding resistance representation were computationally implemented using the Models language available at *ATPDraw* software. The results of computational studies are presented considering the different models to represent the grounding resistance in electrical performance studies of transmission lines in order to identify both advantages and disadvantages of each investigated model. Therefore, the amplitude of lightning overvoltage and the magnitude of critical return stroke current are investigated through comparative analyses. The analysis of the obtained results reveals that it is fundamental to use grounding resistance models capable to accurately represent the soil parameters besides the electromagnetics phenomena that occurs during a backflashover. The findings of the computational studies carried out are relevant to improve insulation coordination studies once allowing to obtain more accurate results in the assessment performance of transmission lines under atmospheric overvoltages.

Keywords: Lightning. Grounding. Soil Ionization. Impulsive overvoltages. Insulation strength. Electric Power Transmission.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Circuito equivalente e componentes de corrente no eletrodo de aterramento.	20
Figura 2 - Comportamento das ondas de tensão (V) e de corrente (I) ao longo do eletrodo....	22
Figura 3 - Região de ionização do solo.	24
Figura 4 - Representação dos tipos de descargas atmosféricas.	25
Figura 5 - Representação de descargas diretas sobre uma LT e de descargas indiretas.....	26
Figura 6 - Ruptura de isolamento por flashover.	27
Figura 7 - Ruptura de isolamento por backflashover.	28
Figura 8 - Modelagem computacional do sistema de transmissão implementado para realização de estudos de casos empregando diferentes modelos de sistemas de aterramento das torres. .	32
Figura 9 - Geometria da torre convencional para sistemas de transmissão trifásicos de 500kV	33
Figura 10 - Representação da estrutura da torre da linha de transmissão empregando Transposed Lines (Clarke type),	34
Figura 11 - Exemplo de Curva $V \times T$, que representa a suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes.	35
Figura 12 - Sistema de controle constituído empregando dispositivos da TACS para a modelagem do fenômeno de interrupção para as cadeias de isoladores da Torre 1.....	36
Figura 13 – Ícone de um model criado no ATPDraw para representação de modelos de resistência de aterramento	38
Figura 14 - Haste cravada no solo.	39
Figura 15 - Layout da interface do model ATERRAM3 para cálculo da resistência de aterramento proposto por Kindermann (1995).	40
Figura 16 - Layout da model ATERRAM criado para representar o modelo proposto por MARTINEZ (2008) para representação da resistência de aterramento.	42
Figura 17 - Zonas de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.....	43
Figura 18 - Ilustração com configuração geométrica das hastes "h" e "m", e seus parâmetros mútuos para cálculo da resistência de aterramento resultante da associação de hastes em paralelo.	44
Figura 19 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $0 < Z_{ater} < Z_{torre}$).....	45
Figura 20 - Paralelismo das resistências devido ao modelo de aterramento com hastes associadas em paralelo.....	45

Figura 21 - Representação da malha de aterramento constituída por 16 hastes em paralelo. .	47
Figura 22 - Modelo de aterramento utilizando cabos contrapesos.	49
Figura 23 - Eletrodo enterrado horizontalmente no solo.	50
Figura 24 - Layout do modelo de aterramento ATERRAM4 implementado para modelo de aterramento por cabos contrapesos.	51
Figura 25 - Circuito equivalente do sistema de aterramento por cabos contrapesos.	52
Figura 26 - Resistência de aterramento obtidas para as três torres que constituem o trecho do sistema de transmissão modelado, proporcionada pela malha de aterramento constituída por cabos contrapesos 4BWG.	53
Figura 27 - Model que representa a fonte de corrente elétrica com forma de onda do tipo dupla exponencial.	57
Figura 28 - Representação da onda biexponencial, obtida no ATPDraw e utilizada para representação da corrente de descarga de retorno.	59
Figura 29 - Representação da onda do tipo pico duplo, obtida no ATPDraw.	61
Figura 30 - Correntes de descarga reais obtidas através de medições.	61
Figura 31 - Módulos DBM (Data Base Modularization) atuantes como fontes de corrente seguindo a função matemática de Heidler.	62
Figura 32 - Módulo DBM que constitui a fonte de corrente do tipo pico duplo.	63
Figura 33 - Comparação entre as formas de onda recomendada pelo CIGRÈ (Figura 33-A) e a forma de onda gerada pelo modelo computacional (Figura 33-B).	65
Figura 34 - Interface da model utilizada para representação da forma de onda da corrente de descarga atmosférica recomendada pelo CIGRÈ.	66
Figura 35 - Formato de onda da corrente de descarga proposta por CIGRÈ.	67
Figura 36 – Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Martinez, frente à descarga atmosférica do tipo pico duplo.	71
Figura 37 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Martinez, frente à descarga atmosférica do tipo dupla exponencial.	72
Figura 38 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Martinez, frente à descarga atmosférica proposta pelo modelo CIGRÈ.	72
Figura 39 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Kindermann, frente à descarga atmosférica do tipo pico duplo.	73
Figura 40 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Kindermann, frente à descarga atmosférica do tipo dupla exponencial.	74

Figura 41 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Kindermann, frente à descarga atmosférica proposta pelo modelo CIGRÉ.....	74
Figura 42 - Dependência da resistência de aterramento com a corrente de surto.	77
Figura 43 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Pico Duplo, para o modelo de aterramento proposto por Martinez.....	79
Figura 44 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Dupla Exponencial, para o modelo de aterramento proposto por Martinez.....	80
Figura 45 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga recomendada pelo CIGRÉ, para o modelo de aterramento proposto por Martinez.....	80
Figura 46 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Pico Duplo, para o modelo de aterramento proposto por Kindermann.	81
Figura 47 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Dupla Exponencial, para o modelo de aterramento proposto por Kindermann.	82
Figura 48 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga recomendada pelo CIGRÉ, para o modelo de aterramento proposto por Kindermann.	82
Figura 49 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à corrente impulsiva do tipo Dupla Exponencial, para o modelo de aterramento formado por haste única.	84
Figura 50 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à corrente impulsiva do tipo Pico Duplo, para o modelo de aterramento formado por haste única.....	84
Figura 51 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à corrente impulsiva recomendada pelo CIGRÉ, para o modelo de aterramento formado por haste única.	85
Figura 52 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores para o modelo resistência de aterramento igual a 30 ohms.....	88
Figura 53 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores para o modelo de aterramento composto por hastes em paralelo.....	89
Figura 54 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores para o modelo de aterramento composto por cabos contrapesos.	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Gradiente de ionização	23
Tabela 2 - Dados elétricos e geométricos dos cabos	34
Tabela 3 - Parâmetros da configuração da malha de aterramento utilizando hastes em paralelo.	46
Tabela 4 - Valores das resistências mútuas sofridas pela haste "1".	47
Tabela 5 - Módulos das resistências entregue por cada haste de aterramento presente no braço "a" da malha de aterramento.....	48
Tabela 6 - Resistências de aterramento das torres presentes na Linha de Transmissão.....	53
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para a simulação da descarga atmosférica do tipo dupla exponencial.....	59
Tabela 8 - Parâmetros utilizados na modelagem da fonte de corrente com pico duplo utilizando a função de Heidler.....	60
Tabela 9 - Parâmetros utilizados para simulação do modelo de descarga atmosférica sugerida por CIGRÈ.....	67
Tabela 10 - Parâmetros utilizados para a simulação de cada modelo de aterramento estudado.	69
Tabela 11 – Especificações mecânicas e elétricas das hastes utilizadas para estudos de casos.	70
Tabela 12 – Especificações mecânicas e elétricas dos cabos contrapeso modelo 4BWG utilizado nas simulações.	70
Tabela 13 - Resultados com valores da resistência de aterramento para modelo Martinez excitado por correntes de descarga dos tipos pico duplo, dupla exponencial e CIGRÈ.....	75
Tabela 14 - Resultados com valores da resistência de aterramento para modelo Martinez excitado por correntes de descarga dos tipos pico duplo, dupla exponencial e CIGRÈ.....	75
Tabela 15 - Comparação das máximas sobretensões impostas, utilizando modelo de aterramento proposto por Martinez, para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.....	81
Tabela 16 - Comparação das máximas sobretensões impostas, utilizando modelo de aterramento proposto por Kindermann, para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.	83
Tabela 17 – Comparação das máximas sobretensões impostas, utilizando modelo de aterramento composto por apenas uma haste, para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.....	85

Tabela 18 - Comparação dos parâmetros de desempenho elétrico da LT para os modelos de aterramento considerados neste estudo.	90
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos gerais	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. Motivação para realização deste estudo	16
1.4. Metodologia do trabalho	17
1.5. Organização do trabalho	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Sistemas de aterramento	19
2.1.1. Teoria básica sobre aterramentos elétricos	20
2.1.2. Impedância de aterramento.....	21
2.1.3. Efeitos de propagação da onda no solo	22
2.1.4. Ionização do solo	22
2.2. Descargas atmosféricas	24
2.3. Características dos desligamentos de linhas de transmissão oriundos de descargas atmosféricas	26
2.4. Efeitos das descargas diretas nas linhas de transmissão.....	27
2.4.1. O flashover	27
2.4.2. O backflashover	27
3. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO	31
3.1. Modelagem da linha de transmissão	32
3.2. Modelagem do sistema de controle para representação da disrupção nas cadeias de isoladores.....	35
3.3. Sistemas de aterramento	38
3.3.1. Modelo haste única proposto por Kindermann	38
3.3.2. Modelo haste única proposto por Martinez	41
3.3.3. Modelo de aterramento formado por múltiplas hastes associadas em paralelo	42
3.3.4. Modelo de aterramento empregando cabos contrapeso	49
3.3.5. Considerações e análise comparativa acerca dos modelos de aterramento formados por hastes em paralelo e também por cabos contrapesos	54

3.3.6. Resistência concentrada	55
3.4. Correntes de descarga de retorno	56
3.4.1. Corrente de descarga do tipo dupla exponencial	56
3.4.2. Corrente de descarga do tipo pico duplo.....	60
3.4.3. Corrente de descarga recomendada pelo CIGRÈ	63
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1. Parâmetros característicos para modelagem dos sistemas de aterramento utilizados nos estudos computacionais.....	69
4.2. ESTUDO DE CASO 1: Análise do comportamento da resistência transitória dos modelos de aterramento compostos por apenas uma haste	70
4.2.1. Resultados do modelo de aterramento proposto por Martinez (2008).....	71
4.2.2. Resultados do modelo de aterramento proposto por Kindermann	73
4.2.3. Constatações obtidas com base na análise dos resultados obtidos com o estudo de caso 1.....	76
4.3. ESTUDO DE CASO 2: Análise da influência do efeito de ionização do solo em modelos de aterramento quanto à amplitude das sobretensões originadas por descargas atmosféricas	78
4.3.1. Modelo proposto por Martinez.....	79
4.3.2. Modelo proposto por Kindermann	81
4.3.3. Modelo de aterramento com haste única, desconsiderando o efeito de ionização do solo	83
4.3.4. Constatações obtidas com base na análise dos resultados obtidos com o estudo de caso 2.....	86
4.4. ESTUDO DE CASO 3: Análise das sobretensões disruptivas para os modelos de aterramento convencionais	87
5. CONCLUSÕES.....	92
6. TRABALHOS FUTUROS	93
7. REFERÊNCIAS	94
8. APÊNDICE	99

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica constituem um setor fundamental para o desenvolvimento econômico e tecnológico das sociedades modernas. Com isso, estes sistemas tornaram-se alvos de grandes investimentos que resultaram em uma ampliação exponencial, devido à crescente demanda por energia elétrica nos últimos anos, o que transformou os pequenos sistemas elétricos isolados em grandes sistemas interligados.

As descargas atmosféricas podem causar efeitos negativos e prejuízos tanto nos sistemas de transmissão de energia elétrica quanto nos sistemas de distribuição onde originam distúrbios e interrupções não programadas, resultando na piora dos indicadores de continuidade do serviço estabelecidos pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

As descargas atmosféricas são motivos de grandes preocupações por parte de órgãos regulamentadores e concessionárias de energia elétrica, uma vez que as consequências relacionadas a estes fenômenos não podem ser estimadas de forma exata. A intensidade das descargas atmosféricas é estudada por meio de tratamentos estatísticos apropriados aplicados à dados de medições, o que pode resultar em modelos matemáticos limitados e capazes de representar apenas parte dos parâmetros característicos de descargas atmosféricas reais.

No intuito de minimizar os danos proporcionados por descargas atmosféricas, são realizados estudos a fim de prover um nível de proteção eficaz para a operação dos sistemas de potência. Caso a amplitude das sobretensões causadas pela incidência de descargas atmosféricas supere o nível de suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores, poderá ocorrer uma interrupção no fornecimento de energia elétrica além de danos aos equipamentos que compõem tais sistemas de transmissão.

Em relação aos prejuízos provocados pelas descargas atmosféricas, o Grupo de Eletricidade Atmosférica - ELAT do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE realizou um estudo junto às empresas do setor elétrico, telecomunicações, seguro, equipamentos eletroeletrônicos, construção civil, aviação, entre outras, e concluiu que os raios causam prejuízos anuais da ordem de um bilhão de dólares ao país. O setor elétrico sofre o maior prejuízo de aproximadamente 600 milhões de reais, seguido pelas empresas de telecomunicação com cerca de 100 milhões de reais e por empresas seguradoras e de eletroeletrônicos com prejuízos na ordem de 50 milhões de reais cada (ATMOSFÉRICA, 2017).

Alguns métodos e estratégias são empregados com o intuito de mitigar estes elevados níveis de sobretensões atmosféricas que atingem os sistemas de transmissão, tais como a utilização de cabos guarda e, principalmente, a implantação de um sistema de aterramento eficiente. Os sistemas de aterramento constituem um dos principais aliados na tentativa de redução da ordem de grandeza das sobretensões impulsivas que solicitam eletricamente os sistemas de isolamento de uma linha de transmissão. Estes sistemas são projetados com intuito de obter baixos valores de impedância de aterramento de forma que a diferença de potencial sobre os isoladores seja reduzida, evitando assim a ocorrência de disrupção ao longo das cadeias de isoladores e um consequente desligamento devido à falta fase-terra estabelecida pela disrupção.

Neste sentido, este estudo demonstra que um projeto de coordenação de isolamento de linhas de transmissão (daqui em diante referidas no texto como LT's) mais seguro e eficiente requer a utilização de modelos de aterramento capazes de reproduzir com precisão o comportamento transitório do solo ao conduzir correntes provenientes de surtos atmosféricos. De outra forma, podemos afirmar que estudos realizados com modelos de aterramento incapazes de reproduzir os fenômenos eletromagnéticos reais no solo podem resultar tanto em projetos sobredimensionados e, portanto, com alto custo, quanto projetos subdimensionados e que reduzem a confiabilidade operacional do sistema de transmissão de energia.

1.1. Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da impedância de aterramento na amplitude das sobretensões impulsivas estabelecidas nos arranjos isolantes de um sistema de transmissão atingido por descargas atmosféricas.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver uma ferramenta computacional, utilizando o *software ATP (Alternative Transient Program)* e sua interface gráfica ATPDraw, para realizar estudos acerca da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão;
- Analisar o desempenho elétrico de sistemas de transmissão perante sobretensões atmosféricas, levando-se em consideração diferentes modelos de aterramento;
- Identificar a influência dos sistemas de aterramento nos estudos computacionais de desempenho elétrico de linhas de transmissão perante sobretensões atmosféricas indicando quais os modelos de resistência de aterramento mais apropriados para este tipo de estudo.

1.3. Motivação para realização deste estudo

De acordo com o ELAT, no Brasil tem-se uma média de 77,8 milhões de registros de descargas atmosféricas. Estas ocorrências são responsáveis por diferentes danos provocados às linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. No Brasil, os raios são responsáveis por cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição. Cerca de 40% dos transformadores também são danificados por raios (ELAT, 2019).

As descargas atmosféricas, ao incidirem em uma linha de transmissão, devem fluir de forma eficiente para a terra através dos sistemas de aterramento, a fim de não acarretarem desligamentos.

Para reduzir o acentuado número de desligamentos causados por descargas atmosféricas e garantir uma melhora na qualidade de transmissão de energia elétrica, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos, salientando-se entre eles o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento (PASSOS JÚNIOR, 2010), (SHARIATINASAB; GHOLINEZHAD, 2017), (MAYER, 2018).

Tal fato demonstra a relevância do estudo de diferentes sistemas de aterramento e de suas características ao serem submetidos a correntes provenientes de descargas elétricas, classificando-os quanto às suas vantagens e aplicações práticas.

1.4. Metodologia do trabalho

O trabalho de desenvolvimento desta pesquisa teve início com a realização de revisão bibliográfica que possibilitou a identificação dos principais modelos atualmente empregados para representação da impedância de aterramento de torres de linhas de transmissão. Esta etapa permitiu a identificação do tratamento matemático apropriado para representação dos complexos fenômenos físicos associados ao comportamento não-linear da resistência de aterramento em estudos envolvendo correntes e sobretensões atmosféricas.

Também foi necessário estudar e compreender a sintaxe para utilização da linguagem *Models* do *ATPDraw* por meio da qual foi possível criar os modelos computacionais ora desenvolvidos.

Em seguida teve início a etapa de implementação computacional de diferentes modelos de aterramento com base no equacionamento matemático proposto por Kindermann (1995) e Martinez (2008), estes relacionados às configurações de aterramento envolvendo apenas uma haste.

Após a criação de um *model* específico para representação apropriada das características peculiares associadas a cada um dos modelos de aterramentos considerados, foram então conduzidos estudos computacionais com o intuito de avaliar a influência de cada um dos modelos de aterramento em estudos de suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes de sistemas de transmissão quando solicitados por sobretensões atmosféricas.

As fontes que representam as correntes de descarga atmosférica foram configuradas de acordo com as medições realizadas no morro do cachimbo, como apontado por Rodrigues (2017), conforme apresentado no tópico 3.4, adotando valores médios de amplitude igual a 40 kA.

1.5. Organização do trabalho

O presente trabalho é composto por 5 capítulos e encontra-se assim estruturado:

- No primeiro capítulo é apresentada a introdução do tema tratado, os objetivos, tanto gerais como específicos, a motivação para realização do estudo, além de uma breve descrição da estrutura textual deste trabalho.

- O segundo capítulo contém uma revisão do estado da arte quanto ao tema do trabalho, com descrição e citação dos principais trabalhos e artigos que oferecem fundamentação científica para o estudo realizado. São abordados temas essenciais para o entendimento da pesquisa desenvolvida, tais como descargas atmosféricas e seus efeitos nos sistemas de transmissão, desligamentos causados pelo mecanismo de *backflashover* e a influência dos sistemas de aterramento no desempenho elétrico de sistemas de transmissão acometidos por sobretensões de origem atmosférica.
- O terceiro capítulo trata da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho. São apresentadas as especificações elétricas e mecânicas dos componentes do sistema de transmissão considerado e que são fundamentais para implementação da modelagem computacional.
- No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através das simulações realizadas empregando-se a modelagem computacional implementada.
- No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais e as conclusões por inferência dos resultados obtidos.
- Por fim, no sexto capítulo, é apresentada uma proposta de continuidade do tema para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é designado ao estudo a respeito dos conceitos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho. São abordados de forma sucinta e esclarecedora os temas: sistemas de aterramento, descargas atmosféricas, linhas de transmissão e a simulação das linhas de transmissão empregando o *software ATPDraw*.

2.1. Sistemas de aterramento

Os sistemas de aterramento de uma linha de transmissão são planejados de forma a escoar para a terra as correntes elétricas provenientes da incidência de descargas elétricas, ou de um evento de curto-circuito, ou ainda correntes de fuga através dos arranjos isolantes, garantindo à LT um bom desempenho elétrico e continuidade no fornecimento. Este é constituído basicamente por:

- Conexões elétricas que ligam um ponto do sistema elétrico aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento;
- Terra que envolve os eletrodos.

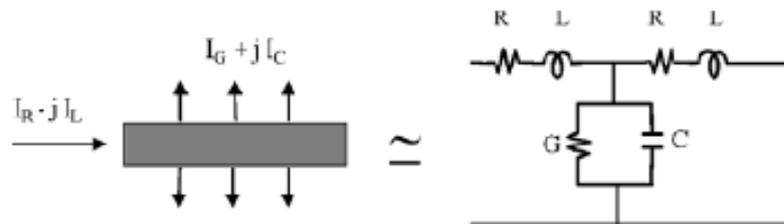
Ao desenvolver um sistema de aterramento para as torres de uma LT, é necessário levar em consideração os aspectos construtivos e de funcionamento da linha. Os materiais utilizados no aterramento não devem ser instalados em região fora da faixa de segurança e não devem interferir em outras instalações elétricas existentes. Tais materiais devem ter durabilidade compatível com a vida útil da LT, normalmente admitida como 30 anos (ABNT NBR 5422, 1985).

O aterramento de uma linha de transmissão deve ser projetado com intuito de prover um baixo valor de resistência de aterramento, assegurando um rápido escoamento das correntes provenientes de descargas atmosféricas para a terra, mantendo os potenciais elétricos gerados dentro dos limites de segurança, não acarretando danos à saúde humana e aos equipamentos da LT (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 1995).

2.1.1. Teoria básica sobre aterramentos elétricos

Para um melhor entendimento a respeito do comportamento do sistema de aterramento, a Figura 1 ilustra um circuito equivalente que representa uma parcela de um eletrodo enterrado. É considerado que este eletrodo possui características indutivas, resistivas e capacitivas. Considera-se que a corrente transitória que flui pelo eletrodo possui duas componentes: uma parcela longitudinal ($I_R - jI_L$) que é transferida para o restante do eletrodo e a parcela transversal ($I_G + jI_C$) que se dissipa para o solo.

Figura 1 – Circuito equivalente e componentes de corrente no eletrodo de aterramento.



Fonte: Extraída de Visacro (2002).

A parcela longitudinal da corrente que circula pelo eletrodo é associada às perdas internas do condutor e ao campo magnético gerado em seu interior e exterior. De acordo com a Figura 1 a energia envolvida com esta parcela de corrente longitudinal está associada com uma resistência R em série com uma indutância L (VISACRO, 2002).

Já a parcela transversal está ligada à dissipação de correntes condutiva e capacitiva para o solo. A magnitude de cada componente desta parcela da corrente depende da frequência angular do fenômeno solicitante e da condutividade e permissividade elétrica do solo. A energia relacionada com esta parcela de corrente transversal pode ser calculada através da representação de uma condutância e de uma capacitância inseridas em paralelo no circuito equivalente (VISACRO, 2002).

2.1.2. Impedância de aterramento

A impedância de aterramento é vista como a dificuldade imposta pelo solo à injeção de corrente elétrica no mesmo. Tal grandeza pode ser descrita através da razão entre a tensão aplicada ao eletrodo de aterramento e a corrente elétrica resultante.

Na análise comportamental de um sistema de aterramento quando submetido a fenômenos de baixas frequências (50/60Hz), os efeitos capacitivos e indutivos podem ser desconsiderados. Assim o sistema de aterramento pode ser representado eletromagneticamente por uma resistência (R_T), uma vez que o circuito equivalente se reduz a uma série de condutâncias acopladas (ALÍPIO, 2006).

$$R_T = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Todavia, quando se leva em consideração fenômenos de alta frequência, o sistema de aterramento deve ser representado por uma impedância. Com isso é necessário determinar um valor de impedância para cada frequência específica.

$$Z(w) = \frac{V(w)}{I(w)} \quad (2.2)$$

A grandeza $Z(w)$ depende tanto da geometria do aterramento quanto das características físicas e eletromagnéticas do solo.

Em uma análise quanto ao desempenho de um sistema de aterramento submetido a correntes impulsivas produzidas por descargas atmosféricas, é correto representar esse sistema diretamente no domínio do tempo através de uma impedância impulsiva Z_P .

Entretanto a grande maioria dos trabalhos consultados envolvendo sistemas de aterramento representam apenas a resistência de aterramento. Tal fato deve-se à complexidade do procedimento para obtenção da impedância de aterramento. A determinação da impedância de aterramento é dependente de procedimentos de medição com difícil execução além do emprego de equipamentos sofisticados e de alto custo, e que muitas vezes estão indisponíveis. Tais exigências tornam difícil o acesso a dados de impedância de aterramento em contrapartida à grande quantidade de dados de medição de resistência de aterramento.

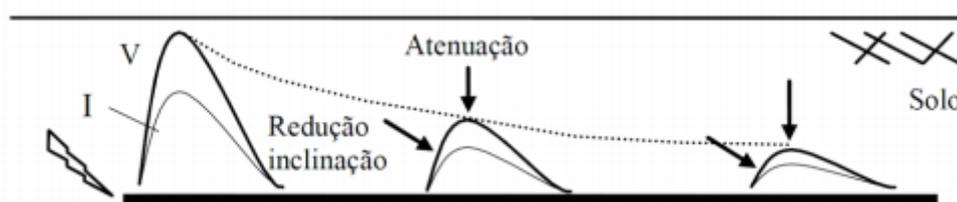
Diante desta constatação é ainda mais relevante em estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão a adoção de modelos de resistência de aterramento que sejam capazes de

reproduzir as características reais da resistência elétrica do solo, como por exemplo o fenômeno da ionização do solo.

2.1.3. Efeitos de propagação da onda no solo

O sistema de aterramento tem por finalidade guiar a corrente impulsiva diretamente para a terra. As grandezas tensão e corrente elétricas em um eletrodo enterrado sofrem uma atenuação e distorção em seus formatos de onda, à medida em que a onda eletromagnética propaga ao longo deste. Tal comportamento é ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 - Comportamento das ondas de tensão (V) e de corrente (I) ao longo do eletrodo.



Fonte: Extraída de Visacro (2002).

A consideração desta alteração no perfil da tensão que ocorre no sistema de aterramento é importante pois determina tanto a magnitude quanto os parâmetros característicos da sobretensão que solicita os arranjos isolantes. Portanto é importante que a modelagem computacional reproduza esta distorção na tensão para que os resultados de estudos de desempenho elétrico do sistema de transmissão sejam precisos e capazes de reproduzir os fenômenos reais.

2.1.4. Ionização do solo

Ao conduzir a corrente de surto para o solo, um campo elétrico é formado nas vizinhanças do eletrodo devido ao aumento de potencial elétrico provocado pela onda impulsiva de tensão. A ionização do solo se dá quando o campo elétrico gerado excede o gradiente de

ionização, valor limite do campo elétrico acima do qual o solo se ioniza. Alguns valores de gradientes de ionização são apresentados na Tabela 1, considerando diferentes tipos de solos (KINDERMANN, 1995).

Tabela 1 - Gradiente de ionização

Tipo do solo	Gradiente de Ionização $[\frac{kV}{cm}]$
Cascalho úmido	11,4 – 19,2
Cascalho seco	20,8 – 22,8
Areia úmida	13,0 – 23,4
Areia seca	17,1 – 18,8
Argila plástica	18,7 – 39,0

Fonte: Adaptado de Kindermann (1995).

Segundo Oettle (1987), o gradiente de ionização (E_o) pode ser calculado em função da resistividade do solo (ρ) empregando-se a equação (2.3).

$$E_o = 241 \cdot \rho^{0,215} \quad (2.3)$$

Onde:

E_o : é o gradiente de ionização dado em $[\frac{kV}{m}]$;

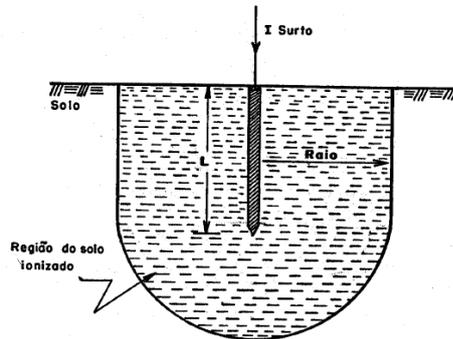
ρ : é a resistividade do solo dado em $[\Omega \cdot m]$.

A resistividade do solo, grandeza correlacionada diretamente ao gradiente de ionização, depende em grande parte da umidade do solo, onde tais valores variam consideravelmente com as condições meteorológicas. Hileman (1999) afirma mais precisamente que a resistividade do solo é fortemente dependente da composição da água do solo e, conseqüentemente, da resistividade elétrica desta água. Com isso, em regiões que foram expostas a um período de seca prolongada, a ocorrência de ruptura nas cadeias de isoladores é mais provável no início do período de tempestades, devido a resistência do solo ser mais alta enquanto a umidade do mesmo não tenha ainda se elevado (HILEMAN, 1999).

O fenômeno da ionização do solo é dado pela formação de canais ionizantes com altos valores de condutividade elétrica, causando assim uma redução nos valores de impedância de aterramento devido ao aumento da área de dispersão da corrente. Tal acontecimento é ilustrado

pela Figura 3 que representa as regiões de solo ionizado nas imediações de um eletrodo que conduz uma corrente de surto (I_{surto}).

Figura 3 - Região de ionização do solo.



Fonte: Extraída de Kindermann (1995).

Para a realização deste estudo, dispôs-se de dois modelos matemáticos para representação do sistema de aterramento e de seu comportamento dinâmico diante de descargas atmosféricas, sendo um desenvolvido por Kindermann (1995) e outro proposto por Martinez (2008). Os referidos modelos são descritos em detalhes no capítulo 3.

2.2. Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas podem ser definidas como descargas elétricas com grande extensão e alta intensidade de corrente elétrica. Estes fenômenos ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas presentes na atmosfera. Tal fenômeno se origina quando a rigidez dielétrica do ar, propriedade que representa sua capacidade isolante, é excedida pelo campo elétrico formado pelas cargas elétricas devidamente organizadas na atmosfera. Esse rompimento da rigidez dielétrica, possibilita, na maioria dos casos, um alto fluxo de elétrons, que se movimentam de regiões com acúmulo de cargas negativas para regiões com cargas positivas (BRITO, 2017). As descargas atmosféricas podem ter polaridade positiva ou negativa.

As descargas elétricas podem ocorrer de diversas formas, tais como, da nuvem para o solo (descendentes), do solo para a nuvem (ascendentes), da nuvem para um ponto qualquer da atmosfera ou ainda entre nuvens. A Figura 4 ilustra tais formas de ocorrência (BRITO, 2017).

Figura 4 - Representação dos tipos de descargas atmosféricas.



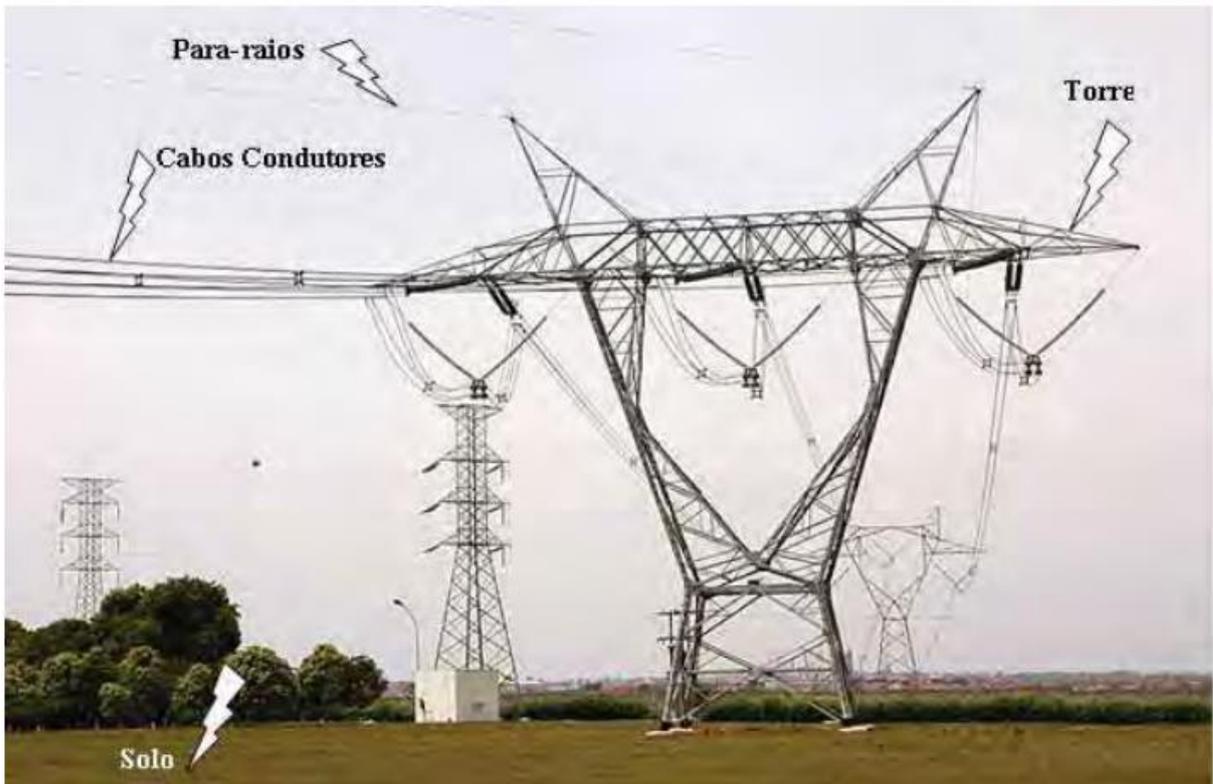
Fonte: Extraída de Brito (2017).

As grandezas relacionadas às descargas atmosféricas, dentre elas a intensidade, são muito complexas e dependentes de diversos fatores. A elevada variação das condições do ambiente eletromagnético que originam as descargas atmosféricas torna árdua a tarefa de definição dos parâmetros característicos da corrente de descarga de retorno. Deste modo, as formas de onda das correntes e sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas apresentam grandes variações relacionadas aos seus parâmetros de tempos de frente e de cauda, derivada máxima, amplitude e ocorrência de um ou mais picos (RODRIGUES, 2017). Desta forma, é muito importante que estudos de desempenho de linhas de transmissão perante sobretensões atmosféricas sejam conduzidos empregando-se modelos matemáticos capazes de reproduzir com a maior precisão possível os parâmetros característicos observados em correntes de descargas atmosféricas reais. Neste trabalho foram considerados o modelo de corrente de descarga do tipo dupla exponencial além da forma de onda recomendada pelo CIGRÈ. Também foram realizados estudos empregando formas de onda de corrente de descarga reais representadas empregando-se funções matemáticas de Heidler.

2.3. Características dos desligamentos de linhas de transmissão oriundos de descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas incidem em linhas de transmissão de duas formas, sendo elas diretamente ou indiretamente. As descargas diretas são definidas na literatura científica como aquelas com incidência na torre ou nos cabos para-raios, ou ainda nos cabos condutores. Por outro lado, a descarga indireta ocorre quando o raio atinge o solo próximo às estruturas da linha de transmissão. Tais fenômenos são ilustrados na Figura 5. Neste estudo serão consideradas apenas as descargas atmosféricas diretas que atingem o cabo para-raios no ponto de conexão com a torre da linha de transmissão.

Figura 5 - Representação de descargas diretas sobre uma LT e de descargas indiretas.



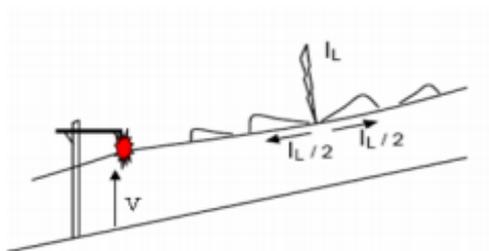
Fonte: Extraída de Berardo (2012).

2.4. Efeitos das descargas diretas nas linhas de transmissão

2.4.1. O *flashover*

O *flashover*, também chamado de falha de blindagem, é resultado de uma incidência direta de uma descarga elétrica no condutor energizado. A ocorrência dessa disrupção se dá pela falha na blindagem proporcionada pelos cabos guardas, o que pode ser ocasionado por incidência de descargas laterais, ou pela ausência de cabos de blindagem.

Figura 6 - Ruptura de isolamento por *flashover*.



Fonte: Extraída de Cunha (2010).

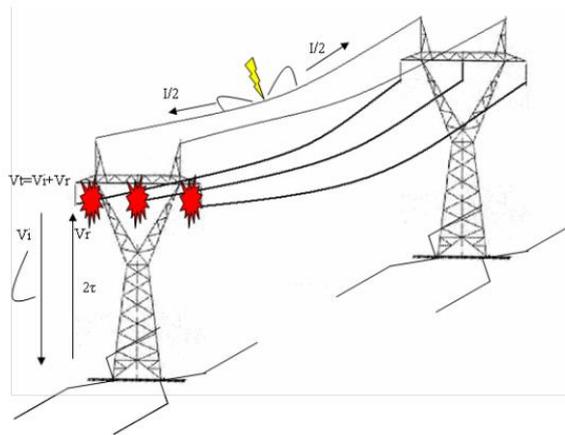
Como resultado da incidência direta é estabelecida uma sobretensão entre os cabos das fases e a terra com magnitudes que podem alcançar valores extremamente elevados, podendo levar à disrupção da cadeia de isoladores e o consequente desligamento por falta fase-terra. Uma vez rompida a rigidez dielétrica da cadeia de isoladores há o surgimento de um arco elétrico que além do desligamento pode também danificar alguns isoladores da cadeia de suspensão ou de ancoragem, além de danificar os demais equipamentos percorridos pela corrente de falta. (VISACRO, 2005).

2.4.2. O *backflashover*

O fenômeno de *backflashover* consiste em uma falha no isolamento elétrico das cadeias de isoladores como resultado de uma sobretensão oriunda de uma descarga elétrica incidente nos condutores de blindagem ou até mesmo na torre de transmissão. Este é o fenômeno

transitório que é investigado neste trabalho. O mecanismo físico pelo qual se dá este fenômeno é representado na Figura 7 (CUNHA, 2010).

Figura 7 - Ruptura de isolamento por *backflashover*.



Fonte: Extraída de Cunha (2010).

Nos sistemas de transmissão comumente são instalados cabos de blindagem com o propósito de impedir a incidência de raios diretamente sobre os condutores energizados. Tais cabos funcionam como captadores de descargas, como para-raios propriamente ditos, tendo a função de conduzir a onda de corrente de surto até o solo e também distribuindo a intensidade de corrente de surto até as estruturas adjacentes, as quais também se encontram aterradas. Caso a descarga elétrica ocorra nos cabos, como representado na Figura 7, duas ondas de corrente de surto são originadas no ponto de incidência ocorrendo a propagação em direção a cada uma das torres adjacentes do vão da linha de transmissão. Porém, ao chegar à primeira torre aterrada, a onda de corrente de descarga se divide em três parcelas. Uma das parcelas é refletida em direção ao ponto original de incidência da descarga nos cabos. Uma outra parcela da corrente de descarga percorre a estrutura metálica da torre descendo em direção ao solo. Concomitantemente, a terceira divisão da corrente de surto prossegue pelo cabo de blindagem do vão adjacente com propagação até a torre subsequente. Em relação à parcela da onda de corrente que flui em direção ao solo, esta se divide novamente em duas parcelas ao atingir o sistema de aterramento no pé da torre. Uma parcela da corrente de surto é transmitida ao solo por meio do eletrodo de aterramento e uma segunda parcela da onda de corrente sofre reflexão invertendo seu sentido de propagação e retornando em direção ao topo da torre. A parcela da onda de corrente refletida ocorre em função da descontinuidade entre a impedância de surto da torre (Z_T) e a impedância de aterramento (Z_G), conforme teoria de ondas viajantes em linhas de

transmissão. A corrente refletida propaga desde o sistema de aterramento no pé da torre até às cadeias de isoladores e ao topo da torre. Este mecanismo de propagação descrito para a corrente de surto ocorre também para uma onda de sobretensão com magnitude dada pelo produto da corrente de surto pela impedância de surto da torre. Logo, as cadeias de isoladores são submetidas à uma onda de sobretensão atmosférica que estressa eletricamente os isoladores. No caso em que a magnitude da sobretensão atmosférica ultrapassa a rigidez dielétrica ocorre a disrupção em uma ou mais cadeia de isoladores. Deste mecanismo decorre a denominação de *backflashover*.

As equações 2.4 e 2.5 descrevem matematicamente o comportamento da onda de sobretensão refletida no solo, onde Γ é o coeficiente de reflexão na base da torre (CUNHA, 2010).

$$\Gamma = \frac{Z_G - Z_T}{Z_G + Z_T} \quad (2.4)$$

$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad (2.5)$$

No ponto de descontinuidade entre a torre e o solo, a onda refletida é definida através de um coeficiente de reflexão, como apresentado nas equações acima. Quando se tem um coeficiente de reflexão igual a zero, ($Z_G = Z_T$), toda a parcela da onda incidente é transmitida ao solo sem haver a onda de sobretensão refletida em direção às cadeias de isoladores. Se a impedância de aterramento for menor que a impedância de surto da torre, ($Z_G < Z_T$), o coeficiente de reflexão se torna negativo, instruindo que a onda de sobretensão não apenas é refletida, mas também tem polaridade contrária àquela da sobretensão incidente. Para um coeficiente de reflexão maior que zero, ($Z_G > Z_T$), ocorre uma sobretensão refletida, porém com a mesma polaridade da onda incidente (VISACRO, 2005).

A sobretensão exercida sobre o polo da cadeia de isoladores conectada à torre é o produto de uma superposição da onda de sobretensão incidente com a onda de sobretensão refletida pelo aterramento, na junção do arranjo isolante com a estrutura da torre. No outro polo da cadeia de isoladores há a tensão de regime permanente da linha de transmissão que pode estar somada com a tensão induzida no cabo fase pela onda de corrente de surto que propaga no cabo de blindagem. Portanto, ao se projetar o sistema de aterramento com o menor valor de impedância de aterramento possível, contribui-se para um melhor desempenho dos sistemas de transmissão acometidos por sobretensões atmosféricas, uma vez que ao reduzir a impedância de aterramento de forma que sua magnitude seja inferior ao valor da impedância de surto da torre, a amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores é reduzida.

Nesse contexto observa-se que a utilização de modelos computacionais de sistemas de aterramento que sejam capazes de reproduzir com precisão os fenômenos eletromagnéticos supracitados é de fundamental relevância para estudos de desempenho de linhas de transmissão e de coordenação de isolamento.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO

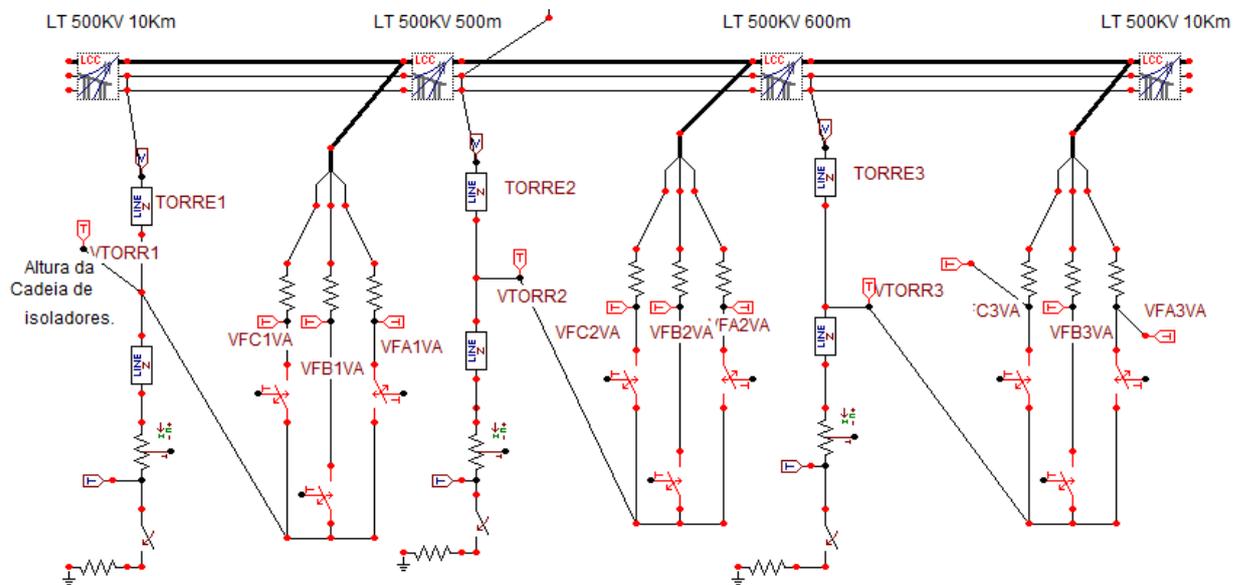
Este capítulo tem por objetivo descrever a modelagem computacional dos componentes do sistema de transmissão sob investigação. O sistema elétrico modelado é constituído por uma linha de transmissão com tensão operacional de 500 kV a circuito simples. Foram modelados 4 vãos sendo também representado o sistema de isolamento composto com cadeias de isoladores do tipo disco de vidro com 26 unidades resultando em um comprimento total de 3,8 metros. Também foi modelado o sistema de controle que representa a disrupção na cadeia de isoladores. As torres foram modeladas como dois trechos de linhas de transmissão, constituída pela impedância superior e inferior, empregando modelo de *transposed lines (Clarke type)*, através de parâmetros distribuídos, disponível *no ATPDraw*. O modelo de resistência de aterramento foi representado por uma resistência elétrica com magnitude variável a qual depende dos equacionamentos matemáticos implementados em cada modelo computacional desenvolvidos com uso da linguagem *Models*. Em relação à representação da corrente de descarga de retorno, são utilizadas funções *Heidler* conforme recomendação de VISACRO (2007) para representação da forma de onda de corrente do tipo pico duplo. Também foram empregados modelos computacionais para representar tanto a forma de onda de corrente de retorno recomendada pelo CIGRÈ quanto a forma de onda do tipo dupla exponencial, através da utilização de recursos disponíveis na linguagem *Models* (RODRIGUES, 2017).

O *software ATPDraw*, utilizado para implementação dos modelos computacionais utilizados neste trabalho, é mundialmente empregado em estudos de transitórios eletromagnéticos e para o desenvolvimento de novos modelos de equipamentos, sistemas de controle e sistemas elétricos. A linguagem *Models* do *ATPDraw* possibilita a criação de modelos computacionais capazes de representar com precisão métodos e modelos matemáticos e físicos, permitindo-lhes uma interação temporal em relação aos demais componentes do sistema, propiciando análises dinâmicas de fenômenos complexos, tal como o *backflashover*, investigado neste trabalho.

3.1. Modelagem da Linha de Transmissão

O modelo de linha de transmissão implementado computacionalmente para a realização deste estudo é apresentado na Figura 8. Este modelo é constituído por 4 vãos e três torres. As torres possuem silhuetas idênticas e foram simuladas com os mesmos parâmetros configurados no modelo *JMARTI* disponível no *ATPDraw*. Este modelo de linha de transmissão foi escolhido por considerar a influência da frequência nos parâmetros elétricos da linha, o que é importante neste tipo de estudo. O vão à esquerda da torre central possui comprimento de 500 m enquanto o vão à direita possui 600 m de comprimento. Neste estudo, o interesse é considerar apenas os efeitos dos dois vãos adjacentes à torre central nas amplitudes das sobretensões produzidas por *backflashover*, e, conseqüentemente, no desempenho elétrico do trecho de transmissão sob análise. Os vãos com comprimentos de 10 km impedem que as tensões refletidas nestes vãos influenciem nesta análise do fenômeno de *backflashover*, sendo então consideradas apenas as contribuições dos primeiros vãos à esquerda e à direita.

Figura 8 - Modelagem computacional do sistema de transmissão implementado para realização de estudos de casos empregando diferentes modelos de sistemas de aterramento das torres.

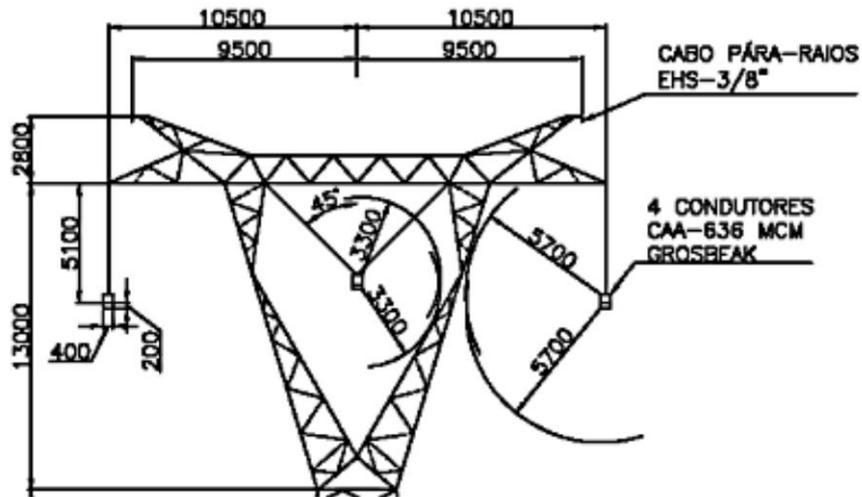


Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

A suportabilidade elétrica de uma linha de transmissão é função da geometria das torres e dos arranjos isolantes entre os cabos fases e os para-raios. Os tipos de torres utilizadas no

modelamento possuem uma altura de 44,7 m com perfil geométrico apresentado na Figura 9. Nesta figura estão identificados os tipos de cabos utilizados, tanto para as fases quanto para os cabos de blindagem. Também estão indicadas as principais dimensões e distâncias necessárias para implementação do modelo computacional da linha de transmissão.

Figura 9 - Geometria da torre convencional para sistemas de transmissão trifásicos de 500kV



Fonte: Extraída de Rocha (2009).

O modelamento das torres das linhas de transmissão pode ser realizado através da teoria de linhas de transmissão curtas com um valor constante de impedância de surto, aterrada por uma resistência de pé-de-torre em sua base (LAFORREST J. J., 1981). Yamada et al. (1995) estimou que a impedância de surto pode ser representada em duas partes, uma inferior e outra superior, utilizando resultados provenientes de medições realizadas em torres de 500kV. Com base nestes estudos, as torres foram modeladas como dois trechos de linha de transmissão monofásicas, possuindo comprimentos de $2/3$ (29,8 m) e $1/3$ (14,9 m) da altura da torre, conectadas em série como mostra a Figura 10 (GATTA et al., 2014). Esta modelagem também tomou por base os resultados de estudos apresentados por MOTA (2001).

Figura 10 - Representação da estrutura da torre da linha de transmissão empregando *Transposed Lines (Clarke type)*,



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A partir da utilização das técnicas de elementos finitos, MOTA (2001) apresentou método para definição do valor da impedância de surto equivalente para as torres de linhas de transmissão. Assim a estratégia de modelagem computacional empregada para representar as torres neste trabalho está fundamentada nestes resultados.

A tensão de operação do sistema de transmissão é de 500 kV a circuito simples. As fases estão dispostas em feixes simétricos compostos por quatro condutores GROSBEAK 636 MCM, CAA, espaçados de 0,4 m (ROCHA, 2009). Já os cabos de blindagem, são do tipo EHS 3,8". As principais especificações elétricas e mecânicas dos cabos fases e para-raios são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados elétricos e geométricos dos cabos

Nome do Cabo	<i>Grosbeak</i>	EHC 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe C
Comprimento do Vão [m]	600	600
Flechas [m]	25,67	22
Seção do Cabo [mm ²]	374,30	195
Diâmetro Interno [cm]	0,93	0
Diâmetro Externo [cm]	2,51	0,91
Resistência em CC [Ω /km]	0,101	3,36

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2017).

3.2. Modelagem do sistema de controle para representação da interrupção nas cadeias de isoladores

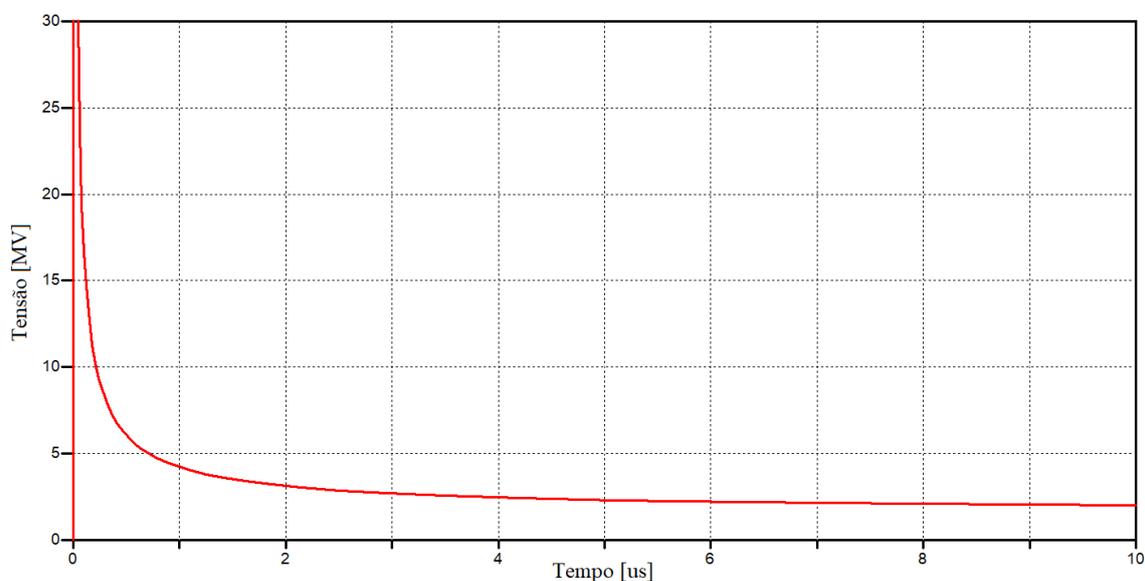
A interrupção é o processo físico pelo qual é estabelecido um arco elétrico de contornamento dos isoladores em uma cadeia de isoladores de linha de transmissão. A interrupção ocorre quando a sobretensão imposta à cadeia de isoladores supera o valor da rigidez dielétrica expressa pela curva de suportabilidade, no referido instante de tempo. A suportabilidade das cadeias de isoladores é representada empregando-se a curva TensãoxTempo (HILEMAN, 1999) ou curva VxT, descrita pela Equação (3.1). O perfil típico de uma curva TensãoxTempo está representado na Figura 11.

$$V(t) = 400 \cdot W + \frac{710 \cdot W}{t^{0,75}} \quad (3.1)$$

Onde:

- V : é o valor de pico da tensão aplicado à cadeia de isoladores [KV];
- W : representa o comprimento da cadeia de isoladores [m];
- t : é o instante de tempo de ocorrência da interrupção [μ S].

Figura 11 - Exemplo de Curva VxT, que representa a suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes.

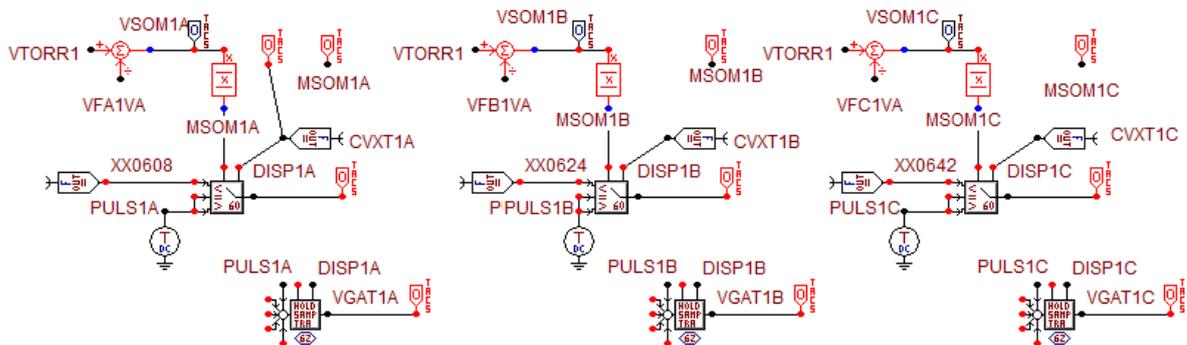


Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Para análise do fenômeno de disrupção, a curva V_xT foi plotada considerando uma cadeia de isoladores composta por 26 isoladores padrão do tipo disco de vidro com passo de 14,605 cm resultando em um comprimento total de 3,8 m, conforme especificações adaptadas de HILEMAN (1999).

O sistema de controle que representa a disrupção está representado na Figura 12. Nesta figura são apresentados os componentes da TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) empregados para implementar a modelagem computacional do fenômeno da disrupção (RODRIGUES, 2017). A TACS permite a utilização de diversos dispositivos de processamento lógico e algébrico para representação de um sistema de controle, utilizados para implementação do sistema de controle que representa a disrupção na cadeia de isoladores. Um sistema como este foi implementado para as cadeias de isoladores de cada uma das fases em cada torre. Desta forma, para este trecho de sistema de transmissão trifásico a circuito simples composto por três torres, foi necessário implementar um total de nove sistemas de controle como estes mostrados na Figura 12. Na Figura 12 em que estão mostrados os sistemas de controle para representar a disrupção nas fases A, B e C da Torre 1.

Figura 12 - Sistema de controle constituído empregando dispositivos da TACS para a modelagem do fenômeno de disrupção para as cadeias de isoladores da Torre 1.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

O princípio de funcionamento do sistema de controle representado na Figura 12 é descrito a seguir para a Fase A da Torre 1 do sistema de transmissão mostrado na Figura 10. É importante ressaltar que a descrição do sistema de controle foi realizada empregando os nomes dos nós tanto do sistema de transmissão representado na Figura 10 quanto os nomes dos nós atribuídos ao sistema de controle representado na Figura 12. Desta forma o sistema de controle que representa a disrupção possui a seguinte lógica de funcionamento:

I. Inicialmente é realizado o cálculo da sobretensão imposta à cadeia de isoladores da fase A da Torre 1. Por meio de um dispositivo registrador de tensão (Dispositivo TACS Type 90-Coupling to circuit) que funciona de forma análoga a um sensor de tensão, são registrados os valores instantâneos de tensão na Torre 1 (nó VTORR1-Figura 10) e no condutor da fase A (nó VFA1VA-Figura 10). Utilizando tal dispositivo o sistema de controle que representa a disrupção recebe como dados de entrada os valores instantâneos da tensão no cabo da fase A na Torre 1 e realiza o cálculo da diferença de potencial que representa a sobretensão imposta à cadeia de isoladores por emprego de um dispositivo subtrator (dispositivo com nó VSOM1A para cadeia de isoladores da fase A – Figura 12). Este dispositivo fornece como saída os valores instantâneos da sobretensão imposta à cadeia de isoladores. Em seguida é calculado o módulo do valor instantâneo da sobretensão imposta à cadeia de isoladores da fase A (dispositivo com nó MSOM1A para fase A – Figura 12).

II. O sistema de controle utiliza o dispositivo TACS-> Fortran Statement->General (com nó CVXT1A – Figura 12) para gerar a curva de suportabilidade V_xT da cadeia de isoladores da fase A empregando a Equação (3.1). Em seguida o sistema de controle utiliza o valor da sobretensão aplicada à cadeia de isoladores e o valor da suportabilidade elétrica da cadeia de isoladores por meio da curva V_xT como dados de entrada para um comparador (dispositivo TACS 60 Input IF - com nó DISP1A - Figura 12). Este dispositivo faz a comparação destes dois valores a cada passo de integração e é responsável por gerar um pulso de disparo (dispositivo TACS Source AC-11 com nó DISP1A - Figura 12) no instante de tempo em que o módulo da sobretensão calculado anteriormente (dispositivo TACS 62 Sample&Track com nó MSOM1A – Figura 12) seja igual ou superior ao valor da curva de suportabilidade da cadeia de isoladores

III. Em seguida o sistema de controle utiliza de um dispositivo registrador *Sample&Track*, para registrar o instante de tempo no qual o pulso de disparo DISP1A é gerado para determinar o instante de tempo de ocorrência da disrupção. Por último o sistema de controle gera um pulso de disparo da chave (dispositivo com nó VGAT1A – Figura 12) que determina o fechamento da chave da TACS (ligação entre os nós VTORR1 ao nó VFA1VA - Figura 10) representando a disrupção através da cadeia de isoladores da fase A ao ligar eletricamente o cabo fase à Torre1, promovendo um curto-circuito Fase A- Terra.

IV. Esta mesma lógica de funcionamento rege a operação do sistema de controle que representa a disrupção para as cadeias de isoladores das fases A, B e C das torres 2 e 3.

3.3. Sistemas de Aterramento

Os modelos para representação da resistência de aterramento foram implementados computacionalmente utilizando recursos da linguagem *Models* do *ATPDraw*. Considerando que este trabalho se propõe a investigar a influência do sistema de aterramento no desempenho elétrico de linhas de transmissão acometidas *por backflashover*, foram considerados 5 modelos para representação da resistência de aterramento, os quais são tratados a seguir. A Figura 13 apresenta um ícone elaborado para representar o *model* criado para os modelos de aterramento.

Figura 13 – Ícone de um model criado no *ATPDraw* para representação de modelos de resistência de aterramento

MODEL ATERRAMENTO.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

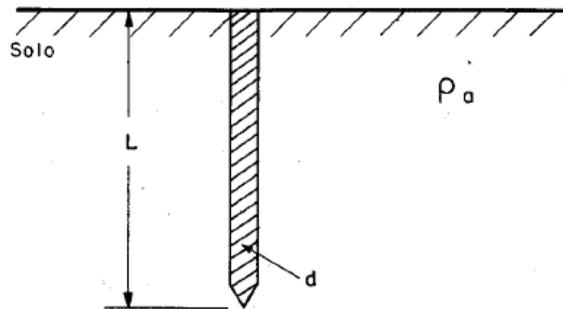
3.3.1. Modelo haste única proposto por Kindermann

Kindermann (1995) propôs que uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo, de acordo com a configuração representada na Figura 14 tem uma resistência elétrica, quando submetida à frequência fundamental, que pode ser determinada pela Equação (3.2)

$$R_{60Hz} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) \quad (3.2)$$

Onde ρ é a resistividade do solo em $[\Omega \cdot m]$, L é o comprimento da haste em $[m]$ e d é o diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da haste em $[m]$.

Figura 14 - Haste cravada no solo.



Fonte: Extraída de Kindermann (1995).

Kindermann (1995) afirma que correntes provenientes de surtos podem ionizar uma certa região do solo em torno da haste. Evidentemente esta região é limitada, ou seja, o solo em torno da haste é ionizado até uma certa distância (x_{limite}) na qual o campo elétrico $E(x)$, devido ao surto de corrente é igual ao gradiente de ionização (E_i) do solo. Além deste limite o campo elétrico $E(x)$ não tem valor suficiente para ionizar o solo. Este efeito pode ser observado analisando-se a Figura 3 (KINDERMANN, 1995).

Para calcular a resistência de surto definida em função do grau de ionização do solo produzido pela corrente de descarga atmosférica, é necessário considerar o gradiente de ionização do solo e também as distâncias ou faixas de solo em torno das hastes de aterramento que serão ionizadas para uma determinada amplitude de corrente de descarga pré-definida.

A variável denominada x_{limite} demarca o cilindro de terra ionizado pelo surto. Este limite é dado pela Equação (3.3).

$$x_{limite}^2 + Lx_{limite} = \frac{\rho I_{surto}}{2\pi E_i} \quad (3.3)$$

Sendo I_{surto} o valor da corrente de surto [A] no instante de tempo equivalente, E_i o gradiente de ionização $\left[\frac{V}{m}\right]$, L o comprimento da haste [m], e ρ resistividade do solo [$\Omega \cdot m$].

Após o cálculo da distância ou comprimento de ionização do solo, é então obtido o valor da resistência do sistema de aterramento (R_{surto}) em função das características da corrente de surto, das dimensões da haste e dos parâmetros do solo, empregando a Equação (3.4):

$$R_{surto} = \frac{\rho}{2\pi(L + x_{limite})} \ln \left[\frac{4(L + x_{limite})}{2x_{limite}} \right] \quad (3.4)$$

Para representação da resistência de aterramento deste modelo foi criado um *model* denominado *ATERRAM3* em que o usuário fornece os valores das variáveis presentes nas Equações (3.3) e (3.4) relacionadas às características do solo e da haste aterrada, como dados de entrada conforme interface mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Layout da interface do *model* ATERRAM3 para cálculo da resistência de aterramento proposto por Kindermann (1995).

The screenshot shows the 'MODEL: ATERRAM3' window with the following data:

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
L	2.4	RATER1	1	TERA1
RO	1000	RATER2	1	TERA2
D	0.01905	RATER3	1	TERA3
EO	1064.18	ITORR1	1	ITORR1
		ITORR2	1	ITORR2
		ITORR3	1	ITORR3

Additional interface elements include: Order: 0, Label: (empty), Comment: (empty), Model file: D:\FMG\TCC_Luiz\Simulaçã..., Use As: ATERRAM3, and buttons for OK, Cancel, and Help.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Para o cálculo da resistência de aterramento instantânea utilizando o modelo proposto por Kindermann (1995), são necessários os dados relativos às características do solo e da haste de aterramento, além da forma de onda da corrente de surto. O valor instantâneo da corrente de surto é obtido pelo *model* automaticamente por meio das declarações de entrada (*Inputs*). Inicialmente o *model* processa as distâncias de ionização para cada torre (X_{limite} na Equação 3.3). Em seguida são calculados os módulos dos campos elétricos gerados pela ionização do solo. Posteriormente o *model* ATERRAM3 faz a comparação do módulo do campo elétrico calculado com o gradiente de ionização do solo informado pelo usuário. Caso o campo elétrico exceda o gradiente de ionização, um novo valor de resistência elétrica é atribuído à resistência de aterramento da torre de transmissão utilizando a Equação (3.4).

É necessário ressaltar uma leve discordância entre a Matemática e a Física que precisou ser resolvida para funcionamento do algoritmo do *model* criado. Este caso foi detectado na situação onde a corrente impulsivas tenha polaridade negativa. Neste caso ocorreu um erro de

processamento do model utilizado. Tal erro de processamento encontrava-se no processamento da função $\ln()$ presente na Equação (3.4) a qual passava a ser submetida a parâmetros negativos. Devido a essa inconsistência matemática de um fenômeno físico real, que são as descargas atmosféricas com polaridades negativas, a solução foi utilizar o módulo da corrente de descarga no algoritmo de processamento do *model*.

3.3.2. Modelo haste única proposto por Martinez

Como apresentado anteriormente, a modelagem da resistência de aterramento é um aspecto crítico para estudos de desempenho elétrico de LT's. Uma representação por modelo não linear dependente da frequência é necessária para obter uma simulação precisa. Como a informação necessária para derivar tal modelo nem sempre está disponível, uma resistência não linear concentrada é geralmente escolhida para representar a impedância da base, embora não seja sempre adequada, como no caso de correntes com altas frequências. Um modelo de resistência de aterramento dependente da frequência foi proposto por MARTINEZ (2008) onde o valor dessa resistência pode ser calculado de maneira aproximada pelo emprego da Equação (3.5), a qual está susceptível às interferências proporcionadas pela variação da frequência, onde tais características são relacionadas com a corrente de surto representadas pela variável (I).

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + I/I_g}} \quad (3.5)$$

Sendo R_0 a resistência de pé de torre em baixa corrente e baixa frequência, adquirida através da Equação (3.2), I_g a corrente limitante suficiente para iniciar a ionização do solo em [A], I a corrente de descarga através da resistência dada em [A]. A corrente limitante, é calculada por meio da Equação (3.6):

$$I_g = \frac{E_i \rho}{2\pi R_0^2} \quad (3.6)$$

Onde ρ é a resistividade do solo em $[\Omega \cdot m]$ e E_i é o gradiente de ionização do solo em $[\frac{V}{m}]$.

Para este modelo de aterramento foi desenvolvido um *model* que recebe como dados de entrada os valores das variáveis E_0 , R_0 e de ρ presentes nas Equações (3.5) e (3.6). Após receber estes valores dos dados de entrada informados pelo usuário, o *model* realiza o cálculo da corrente limitante, para em seguida, calcular o valor da resistência de surto. A Figura 16 apresenta a interface gráfica do *model* denominado ATERRAM criado para representar este modelo de resistência de aterramento.

Figura 16 - Layout da *model* ATERRAM criado para representar o modelo proposto por MARTINEZ (2008) para representação da resistência de aterramento.

The screenshot shows a software window titled "MODEL: ATERRAM" with a close button in the top right corner. The window is divided into several sections:

- Attributes:** A table with two columns: "DATA" and "VALUE".

DATA	VALUE
EZERO	1064.18
RZERO	412.64
R0	1000
- Nodes:** A table with three columns: "NODE", "PHASE", and "NAME".

NODE	PHASE	NAME
RATER1	1	TERA1
RATER2	1	TERA2
RATER3	1	TERA3
ITORR1	1	ITORR1
ITORR2	1	ITORR2
ITORR3	1	ITORR3
- Order:** A text input field containing the value "0".
- Label:** An empty text input field.
- Comment:** An empty text input field.
- Models:** A section containing a "Model file:" label, a text input field with the path "C:\ATP\project\Mod\ATERR", a "Browse..." button, and a "Use As:" label with the value "ATERRAM".
- Options:** Two checkboxes labeled "Hide" and "Lock", both of which are currently unchecked.
- Buttons:** At the bottom of the window are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

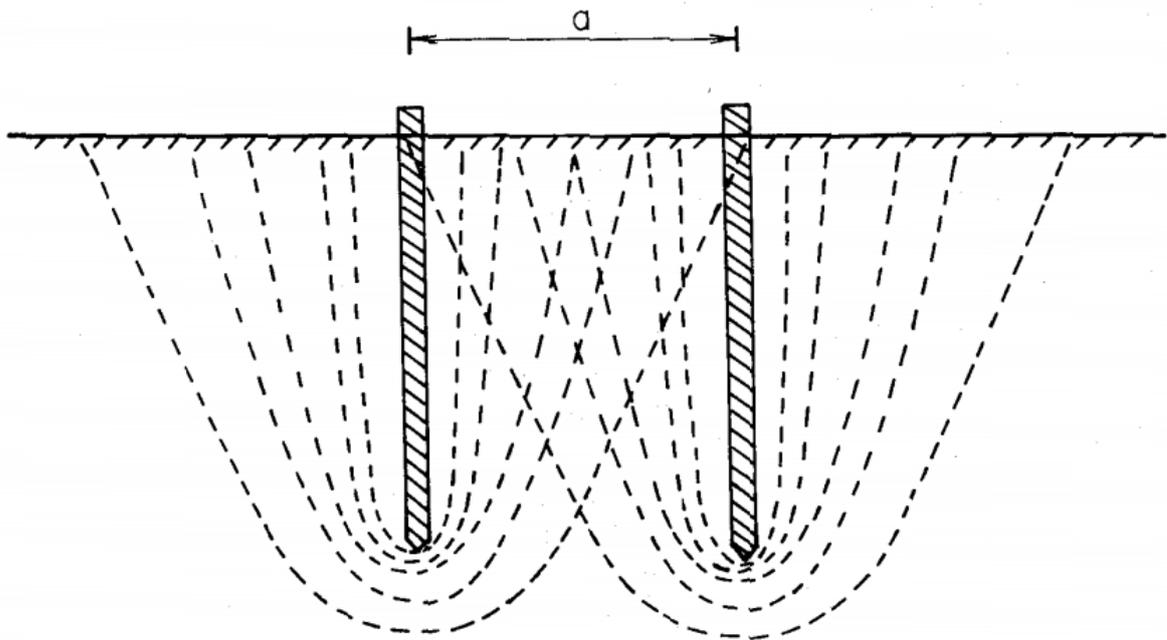
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

3.3.3. Modelo de aterramento formado por múltiplas hastes associadas em paralelo

O terceiro modelo para cálculo da resistência de aterramento consiste em uma malha de aterramento considerada como sendo composta por uma interligação de hastes em paralelo no intuito de se obter um menor valor de resistência de aterramento. O cálculo relacionado a esse modelo não segue a lei simples do paralelismo de resistências elétricas, devido aos efeitos de hastes associadas em paralelo no valor da resistência de aterramento, nas zonas de atuação das

superfícies equipotenciais (KINDERMANN, 1995). A Figura 17 ilustra a zona de interferência das linhas equipotenciais de cada haste, essa zona de interferência causa uma área de bloqueio do fluxo de corrente, o que por sua vez resulta em uma maior resistência de aterramento de cada haste individualmente o que atribui caráter não linear ao valor da resistência de aterramento resultante da interligação de várias hastes em paralelo.

Figura 17 - Zonas de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.



Fonte: Extraído de Kindermann (1995).

Ao se realizar o cálculo da resistência de aterramento resultante de uma associação de várias hastes em paralelo é imprescindível incluir a parcela da resistência total devida à interferência proporcionada por hastes vizinhas. Esta parcela é representada pelo termo R_{hm} , conforme observado na Equação (3.7).

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm} \quad (3.7)$$

Onde:

R_h : resistência apresentada pela haste “**h**”, considerando as influências das demais hastes;

R_{hh} : resistência apresentada pela haste “**h**” calculada através da Equação (3.2);

R_{hm} : resistência apresentada pela interferência da haste “m” sobre a haste “h”, obtida por emprego da Equação (3.8);

n : número de hastes presentes na malha de aterramento.

O cômputo da resistência R_{hm} se dá através da Equação (3.8) com parâmetros geométricos da malha de aterramento com parâmetros definidos conforme a Figura 18.

$$R_{hm} = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (3.8)$$

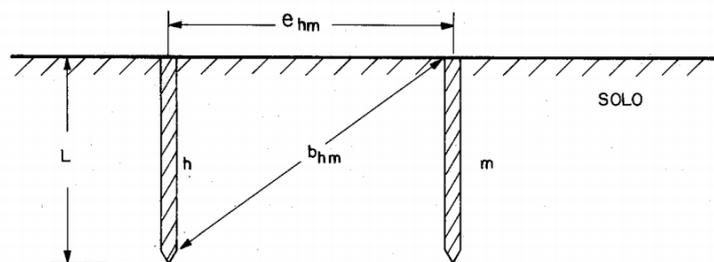
Onde:

e_{hm} : é a distância de fixação entre as hastes “h” e “m”, [m];

L : é o comprimento da haste, [m].

b_{hm} : é a distância entre o extremo de uma haste ao extremo oposto de uma segunda haste em paralela à primeira, [m].

Figura 18 - Ilustração com configuração geométrica das hastes "h" e "m", e seus parâmetros mútuos para cálculo da resistência de aterramento resultante da associação de hastes em paralelo.



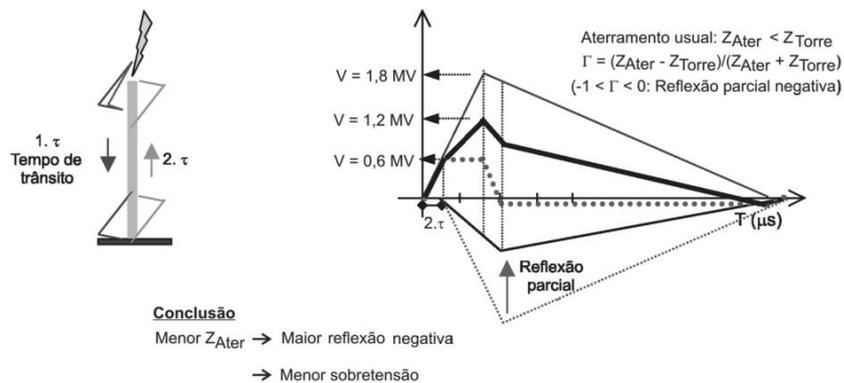
Fonte: Extraído de Kindermann (1995).

Após calcular os valores para todas as hastes da malha de aterramento empregando a Equação (3.7), é então realizado o cálculo de resistências elétricas em paralelo, determinando então a resistência equivalente da malha de aterramento. Vale ressaltar que é comumente adotado como parâmetro de projeto de linhas de transmissão um valor de resistência elétrica de aterramento para torres igual ou inferior a $30[\Omega]$, conforme publicações técnicas tais como VISACRO (2005), assim como publicações científicas citando recomendações de companhias de transmissão de energia elétrica (CUNHA, 2010).

A sobretensão imposta sobre a cadeia de isoladores está ligada à impedância de aterramento e a impedância de surto da torre. Ao se considerar uma impedância de aterramento

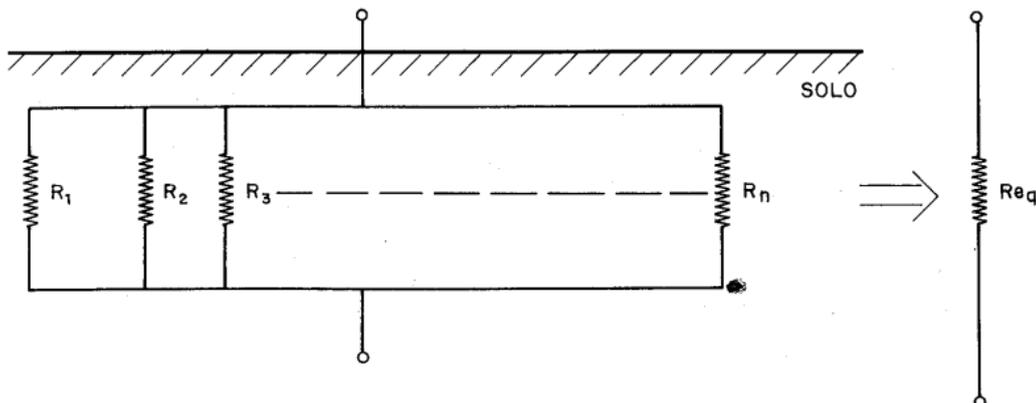
menor que a impedância de surto da torre, quando a onda de tensão alcança a região do solo, ocorre uma descontinuidade de impedância causando então uma reflexão negativa da onda de tensão em direção ao topo da torre, proporcionando uma tensão resultante no topo da torre menor que a onda incidente devido a sobreposição das ondas conforme mecanismo de propagação de ondas viajantes representado na Figura 19. Usualmente são empregados valores de impedância de aterramento entre 5 e 30 [Ω], dependendo da resistividade do solo. Assim o efeito da sobretensão imposta devido a onda refletida é atenuado em relação ao caso em que se tenha uma impedância de aterramento nula, pois nos casos ideais em que se tem uma impedância igual a zero toda a onda incidente no solo é refletida em direção ao topo da torre proporcionando uma menor sobretensão, (VISACRO, 2005).

Figura 19 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $0 < Z_{ater} < Z_{torre}$).



Fonte: Extraído de Visacro (2005).

Figura 20 - Paralelismo das resistências devido ao modelo de aterramento com hastes associadas em paralelo.



Fonte: Extraído de Kindermann (1995).

Após o *model* calcular o valor da resistência elétrica resultante, esse valor de resistência de pé de torre é atribuído a um resistor fixo conectado no aterramento das torres do sistema de transmissão sob investigação.

Para este modelo serão considerados os parâmetros apresentados nas Tabela 10 e Tabela 11, onde a resistência em baixa corrente elétrica de uma única haste aterrada é igual a 412,64[Ω]. Como mencionado por Cunha (2010), é desejável que o modelo de aterramento a ser utilizado em estudos com LT's tenha valor de resistência de surto igual ou inferior a 30 [Ω].

Portanto, dispondo-se do equacionamento clássico para associação de resistências em paralelo, é calculada a quantidade mínima de hastes necessárias para obtenção de um valor de resistência elétrica abaixo de 30 [Ω], conforme (3.9).

$$N_{hastes} = \frac{412,64}{30} = 13,76 \text{ Hastes} \quad (3.9)$$

Assim sendo, conclui-se que para obtenção de um valor de resistência elétrica abaixo de 30[Ω], é necessário empregar a quantidade mínima de 14 hastes de aterramento instaladas verticalmente no solo e conectadas em paralelo. Porém, como apresentado anteriormente, temos o efeito acoplamento entre as hastes devido ao efeito de ionização do solo, originando assim uma resistência mútua entre elas.

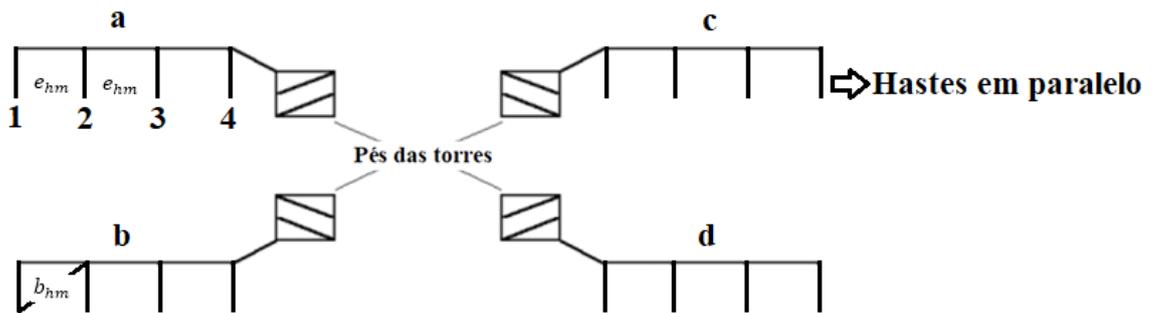
Para o cálculo da resistência mútua é necessário pré-estabelecer alguns parâmetros da configuração da malha de aterramento, tais como, distância entre as hastes e quantidade de hastes. O modelo de aterramento com hastes em paralelo, será composto por 16 hastes com distanciamento de 5 metros, a fim de se obter uma configuração geométrica mais eficiente entre hastes adjacentes (Hileman, 1999), como representado na Figura 21. Os parâmetros geométricos do arranjo de hastes estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros da configuração da malha de aterramento utilizando hastes em paralelo.

Parâmetros	Valor
e_{hm} [m]	5
b_{hm} [m]	5,546
Quantidade	16

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 21 - Representação da malha de aterramento constituída por 16 hastes em paralelo.



Fonte: Adaptada de Berardo (2012).

De posse das informações acerca das características da malha de aterramento e dispondo-se da Equação (3.8), são calculados os valores de resistências mútuas proporcionadas por cada haste de aterramento e em seguida são realizados os cálculos da resistência equivalente proporcionada por cada haste, através da Equação (3.7).

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}$$

Onde R_{11} é a resistência da haste de aterramento, e as demais são as resistências mútuas inerentes das interferências sofridas pela haste “1”.

Os valores calculados para as resistências mútuas estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores das resistências mútuas sofridas pela haste "1".

$R_{hm}(e_{hm}; b_{hm})$ [Ω]	Valores
$R_{12}(5; 5,546)$ [Ω]	30,720
$R_{13}(10; 10,284)$ [Ω]	15,766
$R_{14}(15; 15,191)$ [Ω]	10,565

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Portanto a resistência equivalente entregue ao sistema pela haste “1” é:

$$R_1 = 412,64 + 30,720 + 15,766 + 10,565 = 469,691 \text{ } [\Omega]$$

Da mesma forma foram realizados os cálculos das demais resistências presentes na malha de aterramento, sendo tais valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Módulos das resistências entregue por cada haste de aterramento presente no braço "a" da malha de aterramento.

Resistência	Valores
R_2 [Ω]	489,846
R_3 [Ω]	489,846
R_4 [Ω]	469,691

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Uma vez calculados os valores das resistências elétricas devidas a cada haste de aterramento presente no braço "a" da malha de aterramento e utilizando-se dos conceitos matemáticos destinados à configuração de resistências em paralelo, é então calculada a resistência equivalente do braço "a" da malha de aterramento.

$$R_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}\right) + \left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right) + \left(\frac{1}{R_4}\right)}$$

$$R_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{469,691}\right) + \left(\frac{1}{489,846}\right) + \left(\frac{1}{489,846}\right) + \left(\frac{1}{469,691}\right)}$$

$$R_a = 119,889 \text{ } [\Omega]$$

Com a resistência de aterramento equivalente do braço "a" da malha, considerando que os demais braços possuem as mesmas características, tais como distanciamento entre hastes e número de hastes, é então calculado a resistência, equivalente, de aterramento da torre.

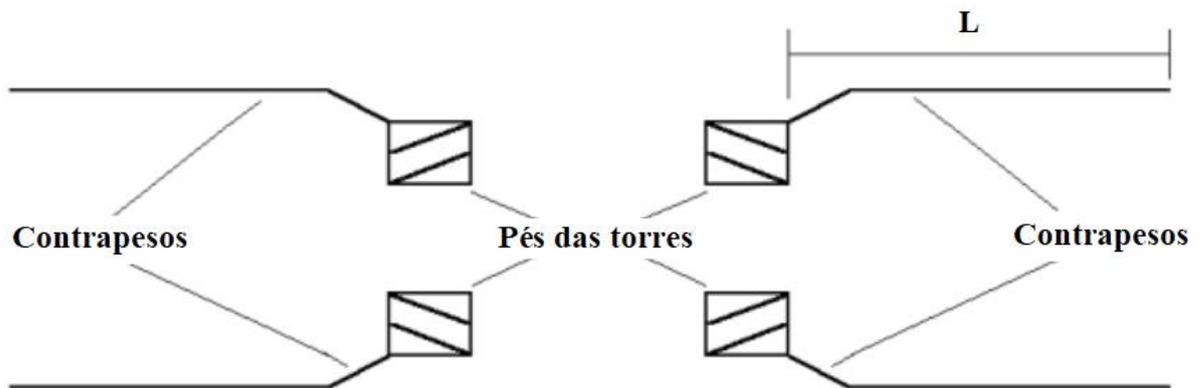
$$R_{p\acute{e} \text{ de torre}} = \frac{R_a}{4} = \frac{119,889}{4} = 29,972 \text{ } [\Omega]$$

Uma vez obtido um resultado com valor de resistência de aterramento inferior a 30[Ω], tal valor é utilizado então como uma resistência de aterramento fixa para cada torre da linha de transmissão nas simulações realizadas.

3.3.4. Modelo de aterramento empregando cabos contrapesos

O modelo de aterramento de torres de linhas de transmissão empregando cabos contrapesos mostrados na Figura 22, consiste em arranjo com condutores enterrados no solo ao longo da faixa de segurança das linhas, a fim de reduzir a resistência de aterramento das torres para valores aceitáveis e que assegurem um bom desempenho da linha de transmissão ao ser acometida por fenômenos eletromagnéticos transitórios, tais como surtos de manobras, curtos-circuitos e descargas atmosféricas.

Figura 22 - Modelo de aterramento utilizando cabos contrapesos.



Fonte: Extraído de Berardo (2012).

O cálculo da resistência de aterramento equivalente do modelo constituído por cabos contrapesos é baseado no cômputo da resistência elétrica de cada eletrodo enterrado horizontalmente no solo utilizando a Equação (3.10) e considerando o arranjo ilustrado na Figura 23.

$$R_{elet} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{r \cdot p} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] [\Omega] \quad (3.10)$$

Onde:

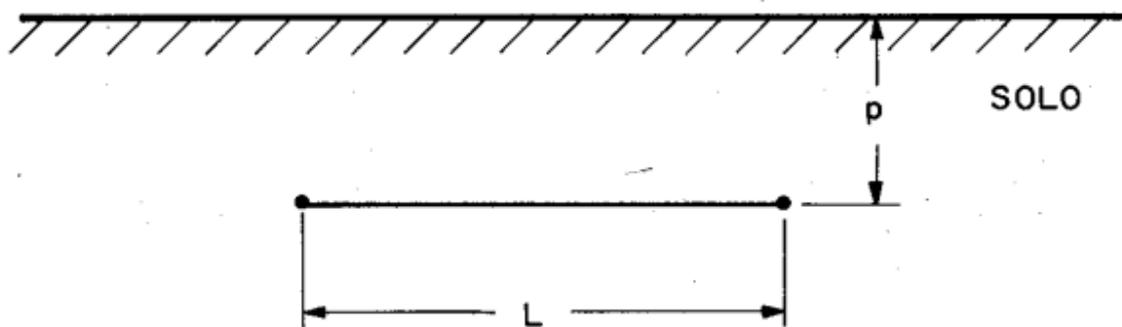
p : é a profundidade vertical do cabo [m];

L : é o comprimento horizontal do eletrodo [m];

r : é o raio do eletrodo enterrado [m];

ρ : resistividade do solo [$\Omega \cdot m$].

Figura 23 - Eletrodo enterrado horizontalmente no solo.



Fonte: Extraído de Kindermann (1995).

Quando dois ou mais eletrodos são aterrados próximos no solo ocorre uma interação devido a formação de uma região de interferência provocada pela mútua ionização do solo. Este efeito influencia diretamente na capacidade do sistema de aterramento quanto à dispersão da corrente proveniente de surtos. Esta interferência pode ser interpretada considerando-se a existência de uma resistência mútua, (R_m), que pode ser definida como a elevação de potencial de um eletrodo, devido ao fluxo de corrente unitária no outro eletrodo adjacente (FILHO, 2002).

Com isso a resistência de aterramento para cada eletrodo, considerando a resistência mútua, pode ser calculada empregando-se a equação (3.11).

$$R_e = R_m + R_{elet} \quad (3.11)$$

Onde:

R_m : é a resistência mútua;

R_{elet} : é a resistência do eletrodo de aterramento calculada pela Equação (3.10).

Como abordado anteriormente, o modelo de aterramento por cabos contrapesos utilizou quatro cabos contrapesos distribuídos conforme mostrado na Figura 22. Desta forma a resistência elétrica resultante para este arranjo do sistema de aterramento pode ser calculada dividindo-se a resistência de cada eletrodo (R_e) por 4, uma vez que os cabos contrapesos estão associados em paralelo, conforme Equação (3.12).

$$R_{ater} = \frac{R_e}{4} \quad (3.12)$$

Substituindo as Equações (3.10) e (3.11) em (3.12), tem-se a Equação (3.13) abaixo.

$$R_{ater} = \frac{R_m}{4} + \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{r \cdot p} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad (3.13)$$

A disposição de cabos contrapesos considerados neste trabalho com configuração apresentada na Figura 22, a qual está comumente presente em aterramento rural, possui uma distância entre eletrodos de aproximadamente 10 metros que está em concordância com as recomendações contidas em HILEMAN (1999). Para esta configuração a parcela devido à resistência mútua pode ser desconsiderada para o cômputo da resistência equivalente de aterramento, uma vez que possuem baixa magnitude (Mayer, 2018).

Para representação deste sistema de aterramento foi desenvolvido e implementado um *model* denominado ATERRAM4 em que o usuário fornece como dados de entrada as informações a respeito das características do solo e do cabo contrapeso utilizado por meio da interface apresentada na Figura 24. Nesta figura, o parâmetro P_SOLO representa a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$), L é o comprimento do cabo contrapeso (m), RAI0 é o raio do cabo contrapeso (m), N é o número de cabos contrapesos que compõem a malha de aterramento e PROFUN é a profundidade à qual o cabo foi enterrado.

Figura 24 - Layout do modelo de aterramento ATERRAM4 implementado para modelo de aterramento por cabos contrapesos.

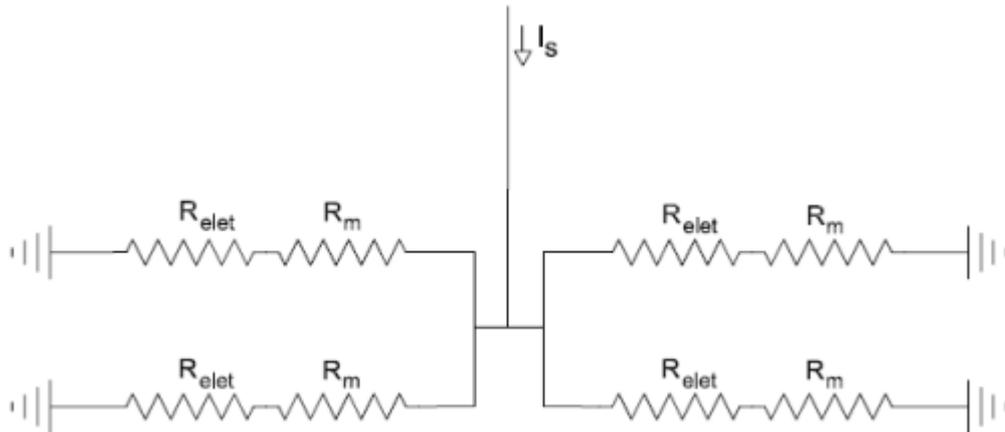
DATA	VALUE
P_SOLO	1000
L	70
RAI0	0.003
N	4
PROFUN	0.6

NODE	PHASE	NAME
RATER1	1	TERA1
RATER2	1	TERA2
RATER3	1	TERA3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 25 ilustra o circuito equivalente do modelo de aterramento composto por cabos contrapesos.

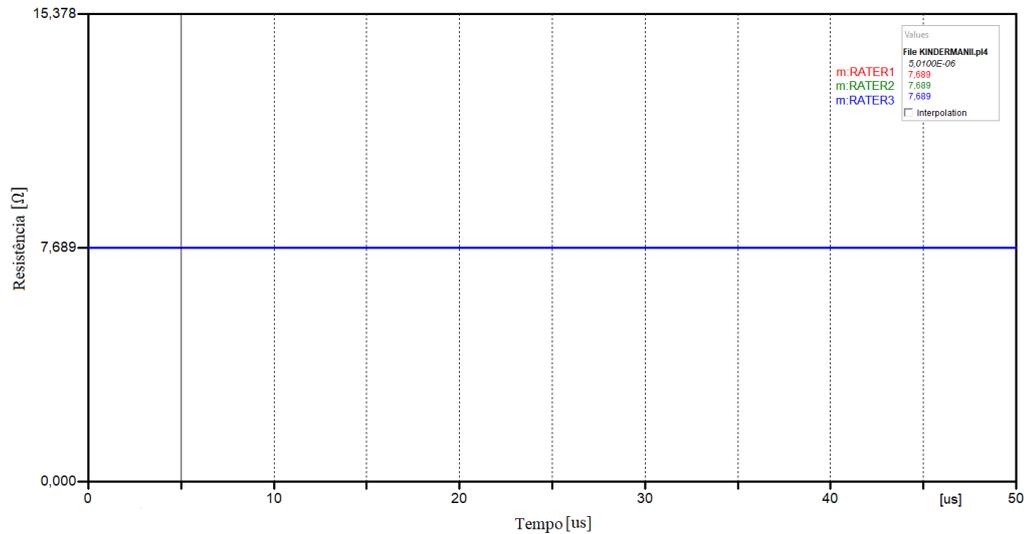
Figura 25 - Circuito equivalente do sistema de aterramento por cabos contrapesos.



Fonte: Extraída de Mayer. (2018).

O emprego do model que representa o sistema de aterramento com cabos contrapesos, empregando-se tais valores para os dados de entrada do *model* representados na Figura 24 resultou em um valor de resistência elétrica constante e igual a 7,689 [Ω], como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Resistência de aterramento obtidas para as três torres que constituem o trecho do sistema de transmissão modelado, proporcionada pela malha de aterramento constituída por cabos contrapesos 4BWG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Mayer (2018), realizou um estudo de caso, no qual analisou uma LT composta por 53 torres, sendo a malha de aterramento composta por cabos contrapesos. As configurações da malha apresentada por Mayer (2018) foram utilizadas para o nosso estudo a fim de se realizar uma validação quanto ao modelo matemático computacional desenvolvido neste trabalho.

A Tabela 6, apresenta os resultados das resistências de aterramento de cada uma das torres presentes na LT estudada por Mayer (2018).

Tabela 6 - Resistências de aterramento das torres presentes na Linha de Transmissão.

Estrutura N°	Resistência Medida [Ω]	Estrutura N°	Resistência Medida [Ω]
1	5,3	28	10
2	10	29	15
3	5	30	8
4	8	31	13
5	8,3	32	13
6	3	33	12
7	6	34	14
8	6	35	4
9	9	36	4
10	14,2	37	15
11	12	38	8
12	7	39	11

13	14	40	9
14	9	41	4
15	9	42	3
16	11	43	3
17	11	44	5
18	15	45	4
19	8	46	6
20	15	46 A	2
21	5	47	0
22	8	48	1
23	11	49	4
24	11	50	5
25	14	51	6
26	13	52	6
27	15	53	10

Fonte: Adaptada de Mayer (2018).

Ao se realizar uma média das resistências de aterramento apresentadas na Tabela 6 obtém-se um valor de aproximadamente 8,477 [Ω]. Comparando o valor obtido pelo *model*, utilizando informações provenientes de Mayer (2018), e a média encontrada, tem-se uma variação de 9,29% em relação à resistência de aterramento.

Com isso pode-se dizer que o *model* criado é capaz de representar com precisão os modelos reais de sistemas de aterramentos de linhas de transmissão.

3.3.5. Considerações e análise comparativa acerca dos modelos de aterramento formados por hastes em paralelo e também por cabos contrapesos

Observa-se que ambos os modelos de aterramento descritos nos itens 3.3.3 e 3.3.4 são apropriados para estudos de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão uma vez que resultam em valor de resistência de aterramento dentro da faixa comumente medida em sistemas de transmissão reais (CUNHA, 2010). Porém, é importante analisar a elevada diferença no valor da resistência elétrica proporcionada por cada um dos modelos. Enquanto o modelo constituído por hastes aterradas em paralelo resulta em uma resistência de aterramento de 29,972 [Ω], o modelo constituído por cabos contrapesos entrega uma resistência equivalente com valor muito inferior, de 7,689 [Ω].

Para a obtenção de uma resistência de aterramento com valor de $8 [\Omega]$ utilizando o modelo de aterramento com hastes em paralelo, seriam necessárias ao menos 14 hastes aterradas em cada um dos quatro braços da malha de aterramento conectada aos pés da torre, ou seja, exigindo um total de 56 hastes aterradas. Tal modelo foi considerado nos estudos computacionais realizados uma vez que constitui um arranjo largamente empregado em sistemas elétricos, principalmente em níveis de distribuição de energia elétrica, sendo importante analisar sua resposta em estudos de desempenho de linhas de transmissão de energia elétrica comparativamente aos demais modelos de aterramento aqui considerados.

3.3.6. Resistência concentrada

Apesar da existência dos diversos modelos citados anteriormente e que foram desenvolvidos com objetivo de proporcionar uma representação real e precisa de uma grandeza tão complexa quanto a resistência de aterramento, a grande maioria dos estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão emprega apenas um resistor concentrado simples para representar a resistência elétrica do conjunto solo e eletrodos. Embora comumente empregado, este modelo é o mais simples dentre aqueles supracitados. Portanto é notória a necessidade de incluir tal modelo, apesar de suas limitações, neste estudo que se propõe a investigar a influência do modelo de aterramento na suportabilidade elétrica dos sistemas de transmissão solicitados por sobretensões atmosféricas. Portanto o último modelo de resistência de aterramento de pé de torre consiste de um simples resistor concentrado com valor de resistência elétrica constante e igual a $30[\Omega]$, o qual é frequentemente empregado em estudos de coordenação de isolamento e de desempenho elétrico de linhas de transmissão, e considerando ainda as recomendações práticas das companhias de energia elétrica e de livros (VISACRO, 2005), além de diversos trabalhos científicos, dissertações, teses e artigos nacionais e internacionais (CUNHA, 2010), (VISACRO e ROSADO, 2008), (SOARES Jr, 1996).

3.4. Correntes de descarga de retorno

As formas de onda das correntes de descarga de retorno apresentam grandes variações relacionadas aos seus parâmetros característicos de tempos de frente e de cauda, derivada máxima, amplitude, além da ocorrência de um ou mais picos (RODRIGUES, 2017). Tais parâmetros característicos têm grande relevância em estudos relacionados à suportabilidade elétrica dos sistemas isolantes de linhas de transmissão solicitados por sobretensões de natureza atmosférica. Assim é de suma importância a utilização de modelos matemáticos e computacionais capazes de representar de maneira eficaz e com a maior fidelidade possível, os diferentes tipos de formas de onda de correntes de descargas atmosféricas reais registrados em medições realizadas por estudos investigativos (VISCACRO, 2004), (DE CONTI; VISACRO, 2007); (BERGER et al., 1975); (HEIDLER,1999); além daquelas recomendadas pelos principais órgãos mundiais (CIGRÈ, 1991), (IEEE, 1994), (IEEE, 1997).

Diante do exposto acima, este trabalho considerou os três principais modelos empregados para representação da forma de onda da corrente de descarga de retorno, a saber:

- Corrente de descarga do tipo dupla exponencial;
- Corrente de descarga do tipo pico duplo;
- Corrente de descarga recomendada pelo CIGRÈ.

Tais modelos foram selecionados devido a sua frequente utilização, sendo que as formas de onda do tipo dupla exponencial e CIGRÈ são recomendadas pelo IEEE e obviamente pelo CIGRÈ, respectivamente. Já a forma de onda do tipo pico duplo é capaz de reproduzir com precisão os parâmetros característicos das correntes de descargas reais obtidos com base em registros em medição. Os modelos computacionais utilizados neste estudo para representação da forma de onda das correntes de descarga de retorno foram desenvolvidos por Rodrigues (2017).

3.4.1. Corrente de descarga do tipo dupla exponencial

O primeiro modelo computacional utilizado representa a corrente de descarga como uma forma de onda do tipo biexponencial, onde o usuário entra com os valores de tempo de frente e

tempo de cauda em [μs]; e o valor de crista da corrente elétrica em Ampères [A]. A Figura 27 apresenta o ícone gráfico do modelo e a interface do usuário.

Figura 27 - *Model* que representa a fonte de corrente elétrica com forma de onda do tipo dupla exponencial.

Fonte: Extraído de (RODRIGUES, 2017).

Uma função matemática do tipo dupla exponencial pode ser representada pela função contida na Equação (3.23). Com os dados informados pelo usuário, o *model* denominado DuplaExp calcula os valores das constantes de tempo (α_1 e α_2) em função dos tempos de frente e de cauda informados. Aplicando as Equações (3.14), (3.15) e (3.16).

$$x = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (3.14)$$

$$\alpha_1 = \frac{\ln\left(2 \cdot \frac{1}{(1-x)}\right)}{TFRENT - TCAUDA} \quad (3.15)$$

$$\alpha_2 = \frac{\ln(x)}{TFRENTE} + \alpha_1 \quad (3.16)$$

Onde α_1 e α_2 são constantes de tempo; x é a razão entre as constantes de tempo; $TFRENT$ e $TCAUDA$ são o tempo de frente de onda e o tempo de cauda em $[\mu s]$, respectivamente.

Em seguida é calculado o fator de correção da amplitude da corrente elétrica, utilizando a Equação (3.17).

$$A_0 = \frac{VCR}{\exp(\alpha_1 \cdot TFRENT) - \exp(\alpha_2 \cdot TFRENT)} \quad (3.17)$$

Onde A_0 é o valor inicial do fator de correção do valor de crista da corrente elétrica; VCR é o valor de crista da forma de onda da corrente.

Em seguida o *model* calcula os instantes de tempo em que a amplitude da corrente elétrica atinge 30% (variável $X30$) e 90% (variável $X90$) do valor de crista da corrente, sendo os respectivos instantes de tempo dados por $T30$ e $T90$, respectivamente.

$$X30 = \exp(\alpha_1 \cdot T30) \quad (3.18)$$

$$X90 = \exp(\alpha_1 \cdot T90) \quad (3.19)$$

$$T30 = \frac{\ln\left(X30 - 0,3 \cdot \frac{VCR}{A_0}\right)}{\alpha_2} \quad (3.20)$$

$$T90 = \frac{\ln\left(X90 - 0,9 \cdot \frac{VCR}{A_0}\right)}{\alpha_2} \quad (3.21)$$

Onde $X30$ e $X90$ correspondem aos valores de 30% e 90% do valor de crista da corrente elétrica; $T30$ e $T90$ correspondem aos instantes de tempo de ocorrência dos valores de 30% e de 90% do valor de crista da corrente elétrica.

Em seguida é realizado um novo cálculo do $TFRENT$, agora levando em consideração os parâmetros $T30$ e $T90$, encontrados anteriormente.

$$TFRENT = TFRENT + (0,6 \cdot TFRENT \cdot (1E - 6) - (T90 - T30)) \quad (3.22)$$

Após ser obtido um novo valor de $TFRENT$ é então calculado um novo valor do fator de correção da amplitude (A_1), utilizando-se a Equação (3.17). Por fim, para obter a corrente de descarga com forma de onda do tipo dupla exponencial, é utilizada a Equação (3.23).

$$FSURTO = f(t) = A_1 \cdot (\exp(\alpha_1 \cdot t) - \exp(\alpha_2 \cdot t)) \quad (3.23)$$

Onde $FSURTO$ é a amplitude instantânea corrente de descarga com a forma de onda do tipo dupla exponencial e A_1 é o fator de correção do valor de crista da corrente elétrica.

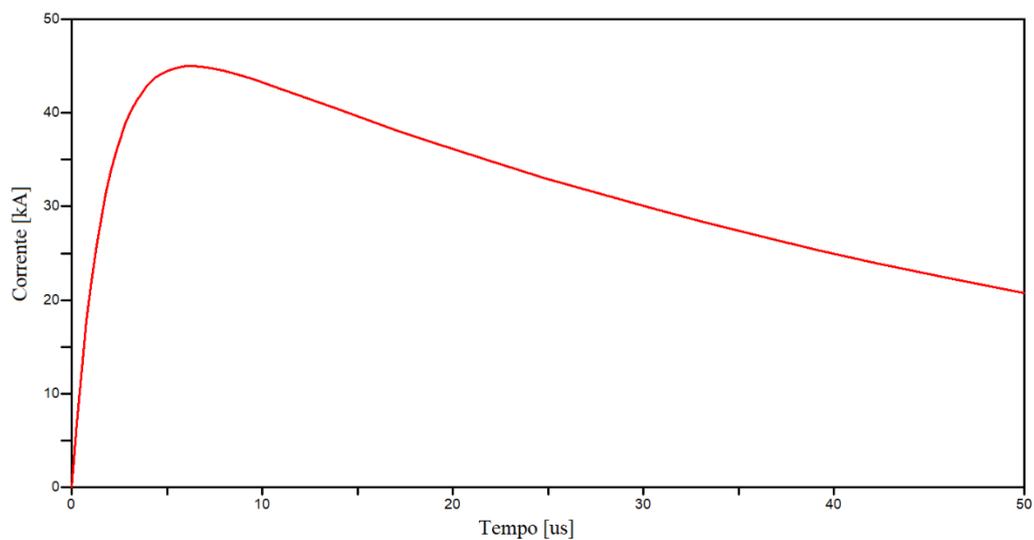
A Figura 28 apresenta uma forma de onda do tipo dupla exponencial, com os parâmetros característicos informados pelo usuário conforme valores na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para a simulação da descarga atmosférica do tipo dupla exponencial.

Parâmetros	Valor
$TFRENT$ [μs]	4,37
$TCAUDA$ [μs]	45,65
VCR [kA]	45

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 28 - Representação da onda biexponencial, obtida no *ATPDraw* e utilizada para representação da corrente de descarga de retorno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.4.2. Corrente de descarga do tipo pico duplo

O segundo modelo computacional utilizado representa a corrente de descarga como uma forma de onda do tipo pico duplo, sendo esse perfil de corrente elétrica comumente registrado em medições realizadas com descargas reais. Dispondo-se da função de *Heidler* descrita na Equação (3.24), é possível reproduzir tais formas de onda de correntes de descargas, obtendo-se a precisão necessária quanto aos seus parâmetros característicos tais como derivada máxima na frente de onda, declividade após a ocorrência do pico e a natureza côncava da onda (RODRIGUES, 2017).

$$F(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}} e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (3.24)$$

Onde I_0 é a amplitude da corrente na base do canal [kA]; τ_1 é a constante de tempo relacionada ao tempo de frente da onda de corrente [μ s]; τ_2 é a constante de tempo relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente [μ s]; n é o expoente de ajuste da função de *Heidler*; η é um fator de correção de amplitude calculada pela Equação (3.25);

$$\eta = e^{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}} \quad (3.25)$$

Para obtenção da forma de onda do tipo pico duplo, a corrente de descarga foi representada pela soma de sete funções de *Heidler* sendo os parâmetros destas funções estão apresentados na Tabela 8 (DE CONTI; VISACRO, 2007).

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na modelagem da fonte de corrente com pico duplo utilizando a função de *Heidler*.

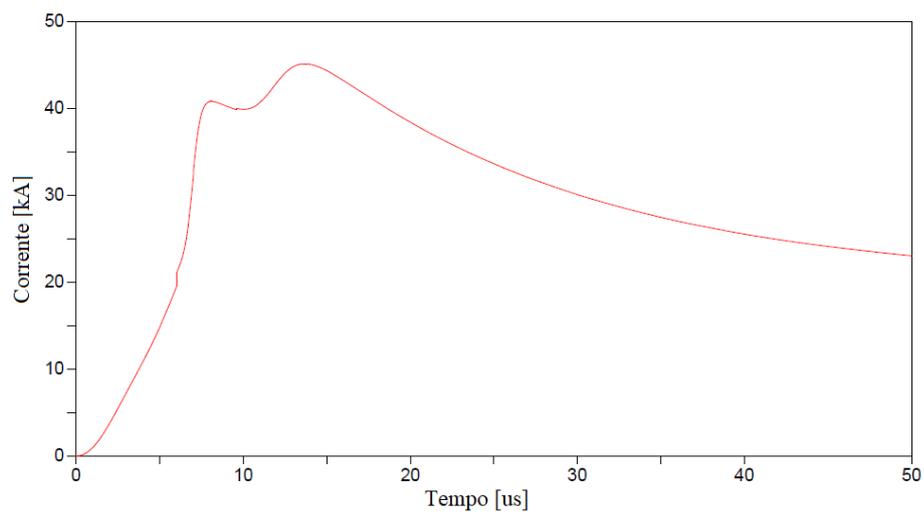
K	I_{0K} [kA]	η_k	τ_{1k} [μ s]	τ_{2k} [μ s]
1	5,934	2	3	76
2	4,945	3	3,5	10
3	4,945	5	4,8	30
4	7,912	9	6	26

5	16,319	30	7	23,2
6	16,813	2	70	200
7	11,868	14	12	26

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

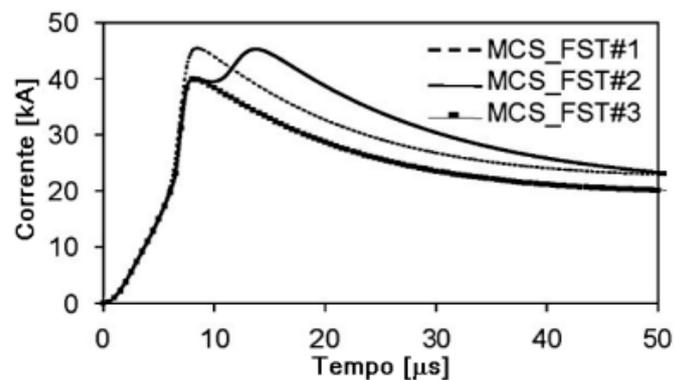
A soma de sete funções de Heidler com os parâmetros apresentados na Tabela 8, permite a reprodução de uma corrente de descarga atmosférica com forma de onda de pico duplo, com perfil mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Representação da onda do tipo pico duplo, obtida no *ATPDraw*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

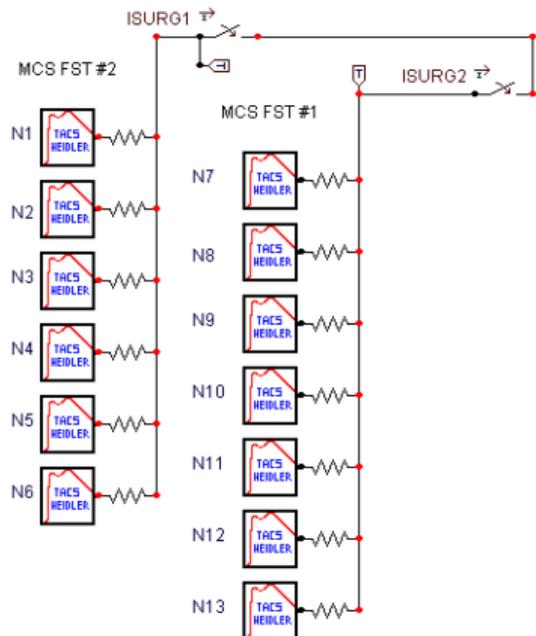
Figura 30 - Correntes de descarga reais obtidas através de medições.



Fonte: Extraída de Rodrigues (2017).

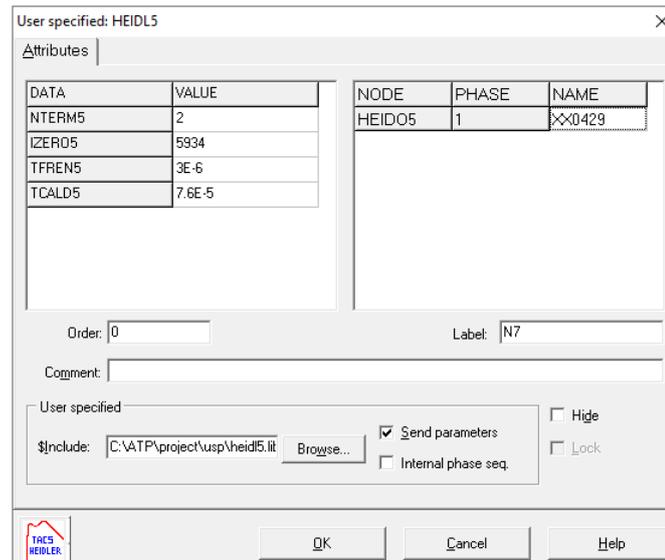
Através de uma comparação por observação entre as Figura 29 e Figura 30 é possível constatar que o modelo computacional desenvolvido por Rodrigues (2017) é capaz de reproduzir a forma de onda do tipo pico duplo satisfatoriamente. A forma de onda da Figura 29 foi obtida utilizando os recursos da rotina *DBM (Data Base Modularization)* do *ATPDraw*. Os módulos utilizados e suas ligações são apresentados na Figura 31, onde a fonte identificada com MCS FST#2 (N1 - N6) representa a fonte de corrente de descarga do tipo pico único e a MCS FST#1 (N7- N13) representa a fonte de descarga do tipo pico duplo (RODRIGUES, 2017).

Figura 31 - Módulos *DBM (Data Base Modularization)* atuantes como fontes de corrente seguindo a função matemática de *Heidler*.



Fonte: Extraída de Rodrigues (2017).

Figura 32 - Módulo *DBM* que constitui a fonte de corrente do tipo pico duplo.



Fonte: Adaptada de Rodrigues (2017).

A Figura 32 apresenta a interface de um dos módulos presentes na fonte de descarga de corrente atmosférica do tipo duplo pico, Figura 31, onde os parâmetros apresentados na imagem são retirados da primeira linha da Tabela 8.

3.4.3. Corrente de descarga recomendada pelo CIGRÈ

O terceiro modelo utilizado para descrever a forma de onda de uma corrente de descarga atmosférica foi recomendado pelo CIGRÈ (1991), conforme representado na Figura 33. Tal modelo proporciona uma melhor representação dos parâmetros característicos observados nas formas de onda de correntes de descargas reais, tais como: derivada máxima na frente de onda. Enquanto que a forma de onda de corrente do tipo dupla exponencial recomendada pelo IEEE possui derivada máxima no início a corrente de descarga do tipo CIGRÈ possui derivada máxima próxima ao pico. Entretanto a corrente de descarga do CIGRÈ possui apenas um pico não conseguindo reproduzir a ocorrência de dois picos de corrente observada em correntes de descargas reais tal como a corrente do tipo pico duplo.

Para a simulação adequada deste perfil de corrente de descarga são necessários três requisitos fundamentais:

- A amplitude correta da corrente;

- A máxima derivada que ocorre próxima na região próxima ao pico de corrente, considerando o tempo de frente calculado utilizando o valor de I90%;
- Para primeiras correntes de descarga, o valor médio correto da máxima derivada é expresso em função do tempo de frente definido pelos valores de 30% e 90% da corrente, tal como definido para a corrente do tipo pico duplo. O tempo de frente deve ser maior do que a amplitude de corrente dividida pela máxima derivada, resultando na forma de onda côncava desejada (RODRIGUES, 2017).

Para a representação deste modelo são necessárias duas expressões diferentes, sendo uma referente à frente de onda da corrente e outra para a cauda. A Equação (3.26) descreve a frente de onda da corrente até o ponto equivalente a 90% do valor de pico (RODRIGUES, 2017).

$$I = At + Bt^n \quad (3.26)$$

Onde:

I : é a amplitude de corrente [kA];

n : é o expoente de ajuste do tempo de ocorrência da máxima derivada no ponto de 90% da amplitude máxima da corrente elétrica;

A e B : são constantes expressas em [kA/μs] e calculadas pelas Equações (3.27) e (3.28):

$$A = \frac{1}{n-1} \left[0,9 \cdot \frac{I}{t_n^n} \cdot n - S_m \right] \quad (3.27)$$

$$B = \frac{1}{t_n^n \cdot (n-1)} [S_m \cdot t_n - 0,9 \cdot I] \quad (3.28)$$

Os valores de n e t_n presentes nas equações acima, podem ser calculados pelas equações (3.29) e (3.30):

$$n = 1 + 2(S_N - 1) \cdot \left(2 + \frac{1}{S_N} \right) \quad (3.29)$$

$$t_n = 0,6 \cdot t_f \left[\frac{3S_N^2}{1 + S_N^2} \right] \quad (3.30)$$

O valor de S_N , representado pela equação (3.31), depende da derivada máxima (S_m) [kA/μs], da amplitude da corrente (I) e do tempo de frente (t_f) [μs].

$$S_N = S_m \cdot \frac{t_f}{I} \quad (3.31)$$

Para simbolizar o decaimento da onda após a ocorrência do pico de corrente, conforme recomendado pelo CIGRÈ, dispôs-se das equações (3.32) à (3.36):

$$I = I_1 \cdot e^{-\frac{(t-t_n)}{t_1}} - I_2 \cdot e^{-\frac{(t-t_n)}{t_2}} \quad (3.32)$$

Na qual, I_1 , I_2 , t_1 e t_2 são constantes obtidas através das seguintes equações (3.33) à (3.36):

$$t_1 = \frac{(t_h - t_n)}{\ln 2} \quad (3.33)$$

$$t_2 = 0,1 \cdot \frac{I}{S_m} \quad (3.34)$$

$$I_1 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \left[\frac{S_m + 0,9 \cdot I}{t_2} \right] \quad (3.35)$$

$$I_2 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \cdot \left[\frac{S_m + 0,9 \cdot I}{t_1} \right] \quad (3.36)$$

Onde:

t_h : é o tempo relacionado ao meio valor na cauda da onda de corrente [μ s].

Dispondo-se do equacionamento anterior, e utilizando o *software ATPDraw* juntamente com a linguagem *Models*, foi utilizado o modelo desenvolvido por RODRIGUES (2017) que representa de forma eficaz uma corrente de descarga atmosférica com forma de onda do tipo CIGRÈ. A Figura 33 apresenta uma comparação entre a forma de onda obtida através do modelo computacional citado e a forma de onda recomendada pelo CIGRÈ (2011).

Figura 33 - Comparação entre as formas de onda recomendada pelo CIGRÈ (Figura 33-A) e a forma de onda gerada pelo modelo computacional (Figura 33-B).

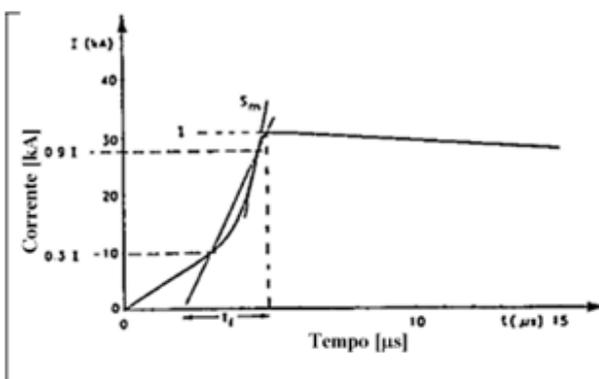


Figura 33-A

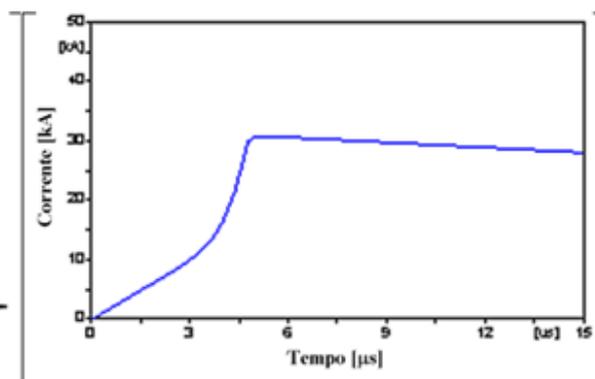
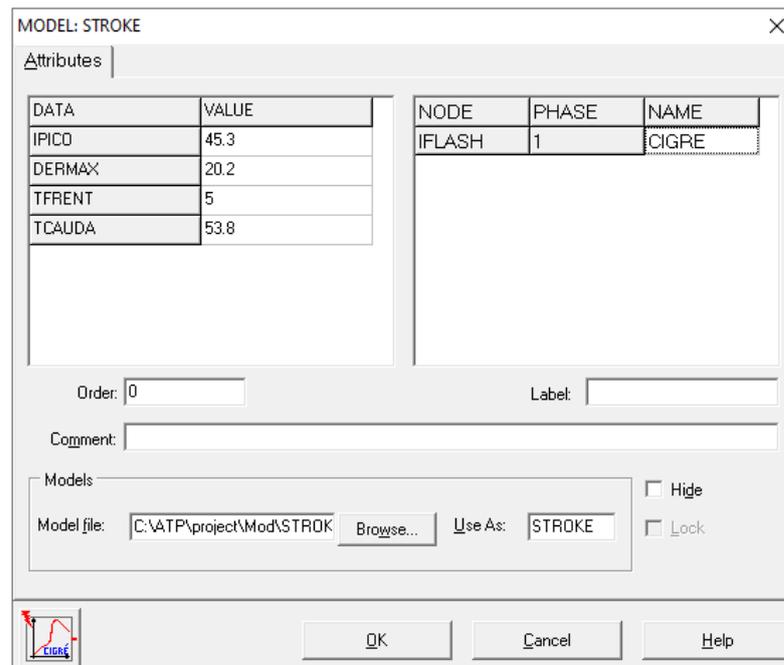


Figura 33-B

Fonte: Extraídas de Rodrigues, 2017.

Para a utilização da *model* referente à onda de descarga atmosférica recomendada pelo CIGRÈ, é necessário que o usuário entre com os valores da corrente de pico (IPICO), a derivada máxima da forma de onda (DERMAX), o tempo de frente e o tempo de cauda (TFRENT e TCAUDA), respectivamente, como mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Interface da model utilizada para representação da forma de onda da corrente de descarga atmosférica recomendada pelo CIGRÈ.



Fonte: Adaptada de Rodrigues (2017).

Após a validação do modelo computacional criado por inspeção de sua capacidade de reproduzir com exatidão a forma de onda da corrente proposta por CIGRÈ (2011), os parâmetros característicos foram alterados de forma a obter correntes com diferentes amplitudes para realização dos estudos. Para tanto, foi necessário criar uma rotina para alteração dos parâmetros característicos do *model* de forma a preservar a mesma forma de onda de corrente para diferentes amplitudes.

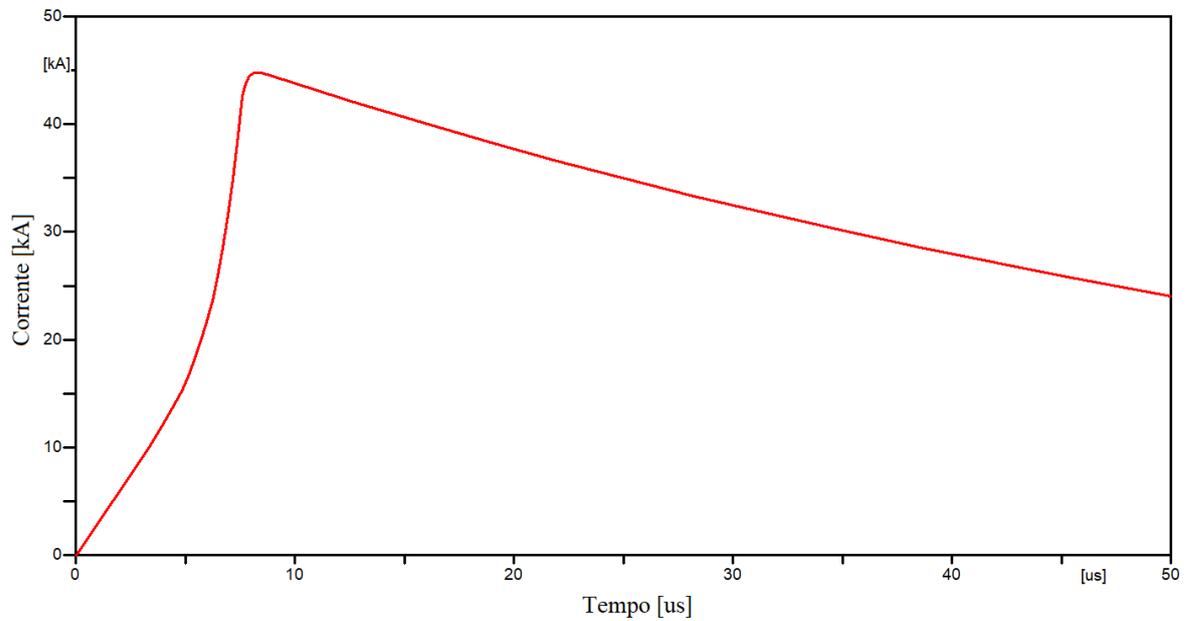
A Figura 35 apresenta a forma de onda de corrente de descarga do tipo CIGRÈ resultante obtida considerando os valores médios para os parâmetros característicos para correntes de descargas reais registradas na estação do Morro do Cachimbo em Minas Gerais. Tais parâmetros estão resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para simulação do modelo de descarga atmosférica sugerida por CIGRÈ.

Parâmetros	Valor
I [kA]	45,3
S_m $\left[\frac{kA}{\mu s}\right]$	20,2
t_{frente} [μs]	5
t_{cauda} [μs]	53,8

Fonte: Adaptada de Rodrigues (2017).

Figura 35 - Formato de onda da corrente de descarga proposta por CIGRÈ.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do estudo computacional acerca do desempenho elétrico do trecho de linha de transmissão apresentado e especificado no Capítulo 3.1, ao ser atingido por descargas atmosféricas responsáveis pela geração de sobretensões impulsivas sobre as cadeias de isoladores. O objetivo da investigação é avaliar a influência de cada um dos modelos de aterramento na amplitude das sobretensões que solicitam as cadeias de isoladores. Por meio deste estudo é possível calcular a corrente crítica de descarga para cada um dos modelos investigados e, conseqüentemente, identificar as vantagens e limitações de cada modelo de aterramento.

Para os casos em que se utilizam apenas uma haste, foram realizados estudos quanto ao comportamento da resistência de aterramento frente ao fenômeno de ionização do solo, causado pelo surto de corrente transitória aplicada aos modelos de aterramento. Para os demais casos, a resistência equivalente fora computada levando em consideração modelos capazes de reproduzir com maior precisão a resistência de malhas de aterramento reais. As análises dos resultados também consideraram o valor de resistência de aterramento tipicamente recomendado por concessionárias de energia elétrica.

Para todos os casos analisados a descarga atmosférica atinge a Torre 2, sendo essa a torre central do trecho de sistema de transmissão modelado.

A corrente de descarga atmosférica foi representada por três formas de onda distintas, sendo estas, do tipo Dupla Exponencial, Pico Duplo além da forma de onda de corrente de descarga recomendada pelo CIGRÉ. Tais modelos foram descritos em detalhes no subtópico 3.4.

Os resultados obtidos em relação à sobretensão estabelecida nas cadeias de isoladores, são referentes à fase externa A e a fase central B do sistema. A sobretensão aplicada à fase C é muito similar, tanto em forma de onda quanto em amplitude, àquela aplicada à fase A devido à simetria geométrica destes condutores na silhueta de torre de transmissão simulada.

4.1. Parâmetros característicos para modelagem dos sistemas de aterramento utilizados nos estudos computacionais

Os parâmetros necessários para modelagem dos sistemas de aterramento e que foram utilizados nos estudos computacionais são apresentados na Tabela 10. O valor do gradiente de ionização foi calculado com base no valor da resistividade elétrica do solo aplicada à Equação (2.3). Os valores de resistividade (ρ) e gradiente de ionização (E_o) foram selecionados com base no menor valor de resistividade para o solo do tipo calcário compacto (KINDERMANN, 1995).

Em relação à profundidade de aterramento, foi adotado um valor de 0,6 m, equivalente a áreas não cultiváveis, conforme Mayer (2018).

Tabela 10 - Parâmetros utilizados para a simulação de cada modelo de aterramento estudado.

Parâmetros	Modelo Martinez	Modelo Kindermann	Modelo hastes em paralelo	Modelo cabos contrapesos
$\rho \left[\frac{ohm}{m} \right]$	1000	1000	1000	1000
$E_o \left[\frac{kV}{m} \right]$	1064,18	1064,18	1064,18	1064,18
Nº de cabos	-	-	-	4
Profundidade [m]	-	-	-	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para as análises computacionais realizadas neste trabalho foi adotado o valor de resistividade do solo igual a 1000 [ohm/m], uma vez que representa um valor médio desta grandeza. Este valor é comumente adotado em estudos envolvendo linhas de transmissão embora no Brasil ocorra uma grande variedade de tipos de solo, havendo regiões com valores de resistividade muito superiores ao adotado, além de regiões com solo que apresentam valores inferiores para resistividade elétrica.

As especificações elétricas e mecânicas das hastes de aterramento e do cabo contrapeso utilizados para as simulações são apresentados nas Tabela 11 e 12, respectivamente. O valor da

resistência de baixa corrente para haste vertical na Tabela 11 foi calculado empregando-se a equação (3.2).

Tabela 11 – Especificações mecânicas e elétricas das hastes utilizadas para estudos de casos.

Grandezas	Valores dos Parâmetros
Comprimento (L [m])	2,4
Diâmetro (D [m])	0,01905
Resistência (R [Ω])	412,64

Fonte: Adaptada de Kindermann (1995).

Foi utilizado como eletrodo de aterramento, cabos de bitola 4BWG em aço galvanizado, devido ao fato de que este tipo de cabo provê maior segurança ao sistema de aterramento contra falhas devido à corrosão dos eletrodos durante a vida útil programada da LT, (MAYER, 2018).

Tabela 12 – Especificações mecânicas e elétricas dos cabos contrapeso modelo 4BWG utilizado nas simulações.

Grandezas	Valores dos Parâmetros
Diâmetro (D [mm])	6,05
Tolerância [mm]	$\pm 0,10$
Seção Nominal [mm^2]	28,75
Peso Nominal [kg/km]	225,0
Carga mínima de ruptura [N]	10.100,0

Fonte: Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/8168/37090/bb-148-13-folder%20eletrifica%C3%A7%C3%A3o-21x27cm-v7-low.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2021.

4.2. ESTUDO DE CASO 1: Análise do comportamento da resistência transitória dos modelos de aterramento compostos por apenas uma haste

Este estudo de caso tem por objetivo investigar a resposta transitória da resistência de aterramento dos modelos propostos por Martinez (2008) e Kindermann (1995) aplicados às torres de um trecho de sistema de transmissão atingido por descargas elétricas. Neste sentido

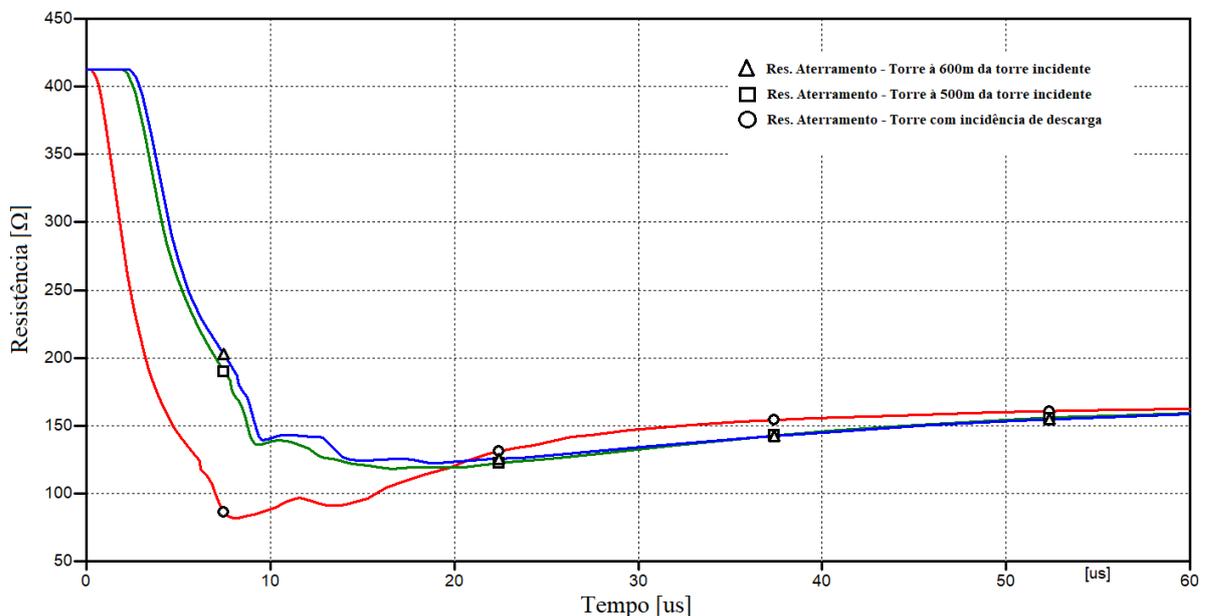
pretende-se identificar a influência do efeito de ionização do solo na redução do valor da resistência elétrica dos modelos de aterramento quando submetidos a correntes com formas de onda típicas para estudos de desempenho de linhas de transmissão.

4.2.1. Resultados do modelo de aterramento proposto por Martinez (2008).

Inicialmente foram realizadas simulações computacionais envolvendo o modelo de Martinez considerando os valores de parâmetros apresentados anteriormente. As Figuras 36, 37 e 38 apresentam as curvas com valores de resistência de aterramento para cada uma das torres do trecho de linha de transmissão considerado, ao ser atingido por correntes de descarga de retorno com formas de onda dos tipos duplo pico, dupla exponencial e CIGRÈ, respectivamente.

A resposta obtida pelo modelo Martinez excitado por corrente de descarga do tipo pico duplo, como mostrado pela Figura 36, apresentou-se satisfatória, onde se obteve uma redução de 80,128% da resistência de aterramento em relação à resistência em frequência de 60Hz, estabelecida em 412,64[Ω], atingindo seu menor valor, igual a 81,998[Ω], no instante de tempo igual 8,11 [μ s].

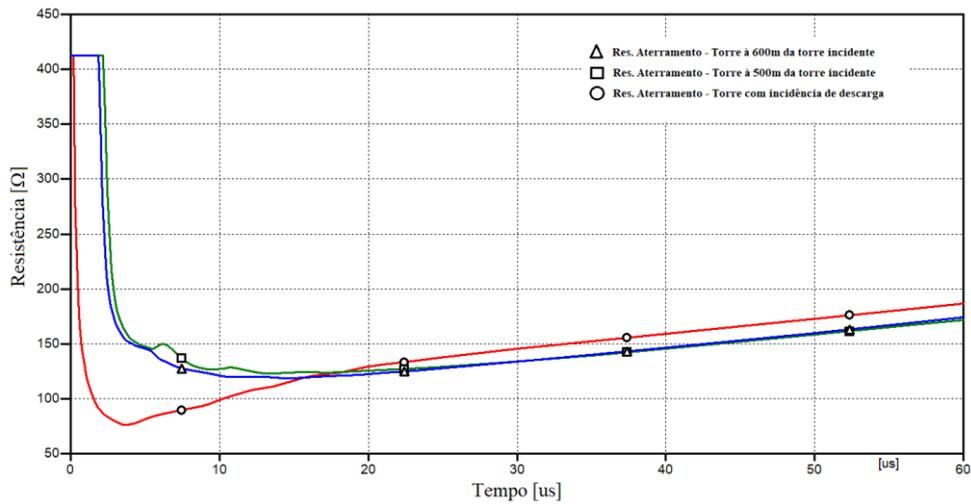
Figura 36 – Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Martinez, frente à descarga atmosférica do tipo pico duplo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quando submetida a uma descarga do tipo dupla exponencial, Figura 37, a resistência de aterramento sofreu uma queda de 81,49%, chegando a um valor de 76,378[Ω] no instante de tempo de 3,66[μs].

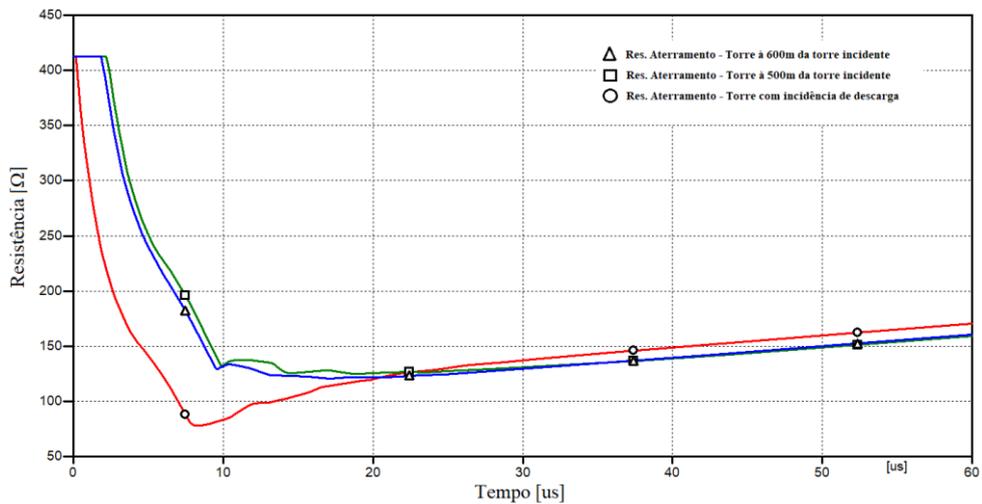
Figura 37 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Martinez, frente à descarga atmosférica do tipo dupla exponencial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Já para o modelo CIGRÈ, a queda da resistência de aterramento chegou a 81,077% no instante de tempo de 8,29[μs], obtendo seu menor valor igual a 78,08[Ω].

Figura 38 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Martinez, frente à descarga atmosférica proposta pelo modelo CIGRÈ.

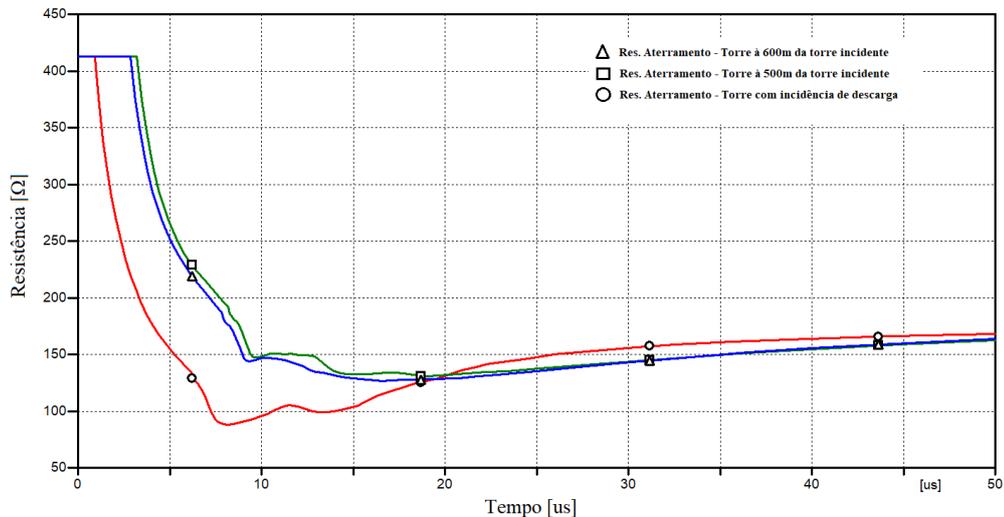


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.2.2. Resultados do modelo de aterramento proposto por Kindermann

Quando o *model* Kindermann foi empregado para representar o sistema de aterramento excitado por uma corrente de descarga de retorno do tipo pico duplo, o comportamento da resistência de aterramento é mostrado na Figura 39. Ocorreu uma queda de 78,635% da grandeza em questão, sendo o menor valor de 88,16[Ω] registrado no instante de tempo de 8,11[μ s].

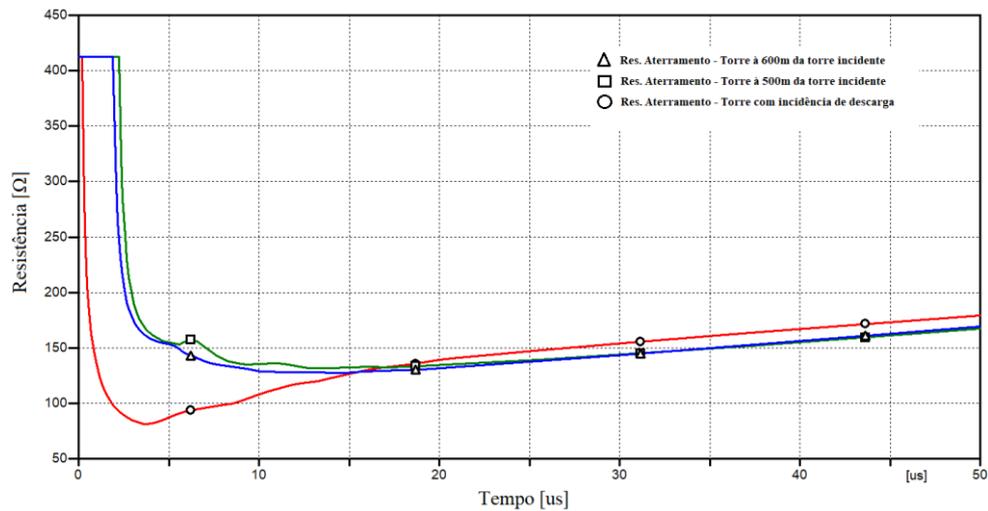
Figura 39 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Kindermann, frente à descarga atmosférica do tipo pico duplo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quando solicitado por uma descarga do tipo dupla exponencial, a resistência de aterramento da torre registrou uma queda máxima de 80,287%, quando a determinada grandeza teve seu menor valor, 81,341[Ω] no instante de tempo igual a 3,63[μ s], conforme pode ser observado na Figura 40.

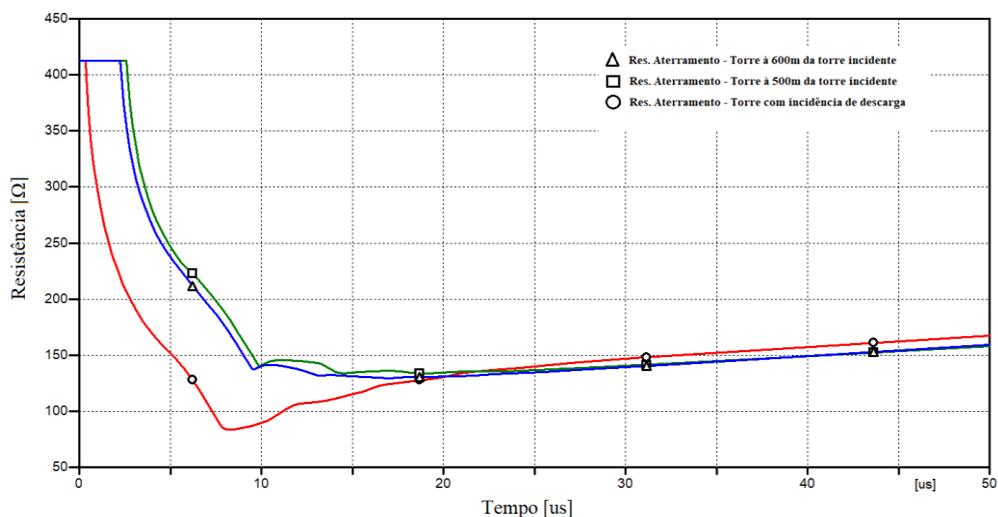
Figura 40 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Kindermann, frente à descarga atmosférica do tipo dupla exponencial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para a ocorrência de uma descarga atmosférica com forma de onda da corrente de descarga do tipo CIGRÉ, a amplitude da resistência de pé de torre sofreu uma queda de 79,753%, devido ao efeito ionizante do solo, atingindo um valor mínimo de 83,545[Ω] no instante de tempo de 8,3[μs]. Tal comportamento pode ser observado por inspeção da Figura 41.

Figura 41 - Comportamento dinâmico da resistência de aterramento, modelo Kindermann, frente à descarga atmosférica proposta pelo modelo CIGRÉ.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Dispondo-se do equacionamento proposto por Kindermann, como apresentado anteriormente, os resultados obtidos foram similares àqueles obtidos pelo modelo de Martinez, por análise comparativa das Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Resultados com valores da resistência de aterramento para modelo Martinez excitado por correntes de descarga dos tipos pico duplo, dupla exponencial e CIGRÈ.

Modelo MARTINEZ			
Grandezas	Corrente do tipo Pico Duplo	Corrente do tipo Dupla Exponencial	Corrente do tipo CIGRÈ
Valor inicial [Ω]	412,64	412,64	412,64
Valor mínimo da resistência de aterramento [Ω]	81,998	76,378	78,08
Redução percentual	80,128	81,49	81,077
Instante de tempo de resistência mínima [μ s]	8,11	3,66	8,29

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 14 - Resultados com valores da resistência de aterramento para modelo Martinez excitado por correntes de descarga dos tipos pico duplo, dupla exponencial e CIGRÈ.

Modelo KINDERMANN			
Grandezas	Corrente do tipo Pico Duplo	Corrente do tipo Dupla Exponencial	Corrente do tipo CIGRÈ
Valor inicial [Ω]	412,64	412,64	412,64
Valor mínimo da resistência de aterramento [Ω]	88,16	81,341	83,545
Redução percentual [%]	78,635	80,287	79,753
Instante de tempo de resistência mínima [μ s]	8,11	3,63	8,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.2.3. Constatações obtidas com base na análise dos resultados obtidos com o estudo de caso 1.

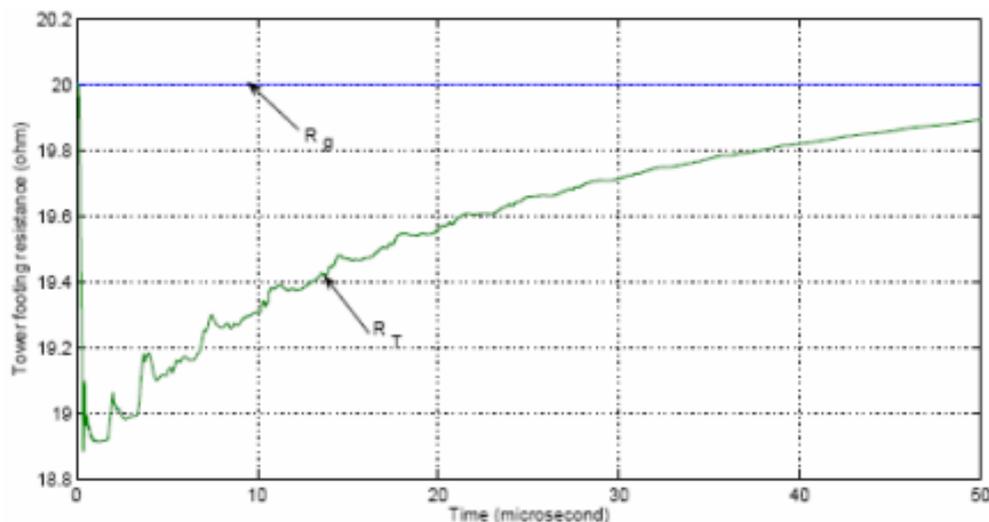
Através dos resultados apresentados nos itens 4.2.1 e 4.2.2, observa-se que a resistência de aterramento da torre que sofre a incidência de uma descarga atmosférica, tem um comportamento similar ao da forma de onda de corrente incidente. Este comportamento é esperado, uma vez que a análise do equacionamento matemático para os dois modelos de aterramento investigados comprova que estas duas grandezas são diretamente proporcionais. Nota-se também que para ambos os casos, a corrente impulsiva que proporcionou maior variação da resistência de aterramento foi a do tipo dupla exponencial.

A comparação dos parâmetros característicos, relacionados à variação da resistência de aterramento, com os parâmetros relacionados às correntes impulsivas, indica que a realização de estudos empregando a forma de onda de corrente de descarga do tipo dupla exponencial conduz a resultados com uma maior variação da resistência de aterramento, proporcionado pelo efeito ionizante.

Observando o comportamento da resistência de aterramento entre o modelo Martinez e Kindermann, concluímos que os resultados atribuídos ao modelo proposto por Kindermann são mais conservativos, uma vez que seu tratamento relacionado à ionização do solo chegou a uma menor variação da resistência de aterramento, conforme mostrado pelos resultados apresentados nos tópicos 4.2.1 e 4.2.2.

Ao observar os resultados obtidos pelos modelos matemáticos propostos por Martinez (2008) e Kindermann (1995) e a resposta da resistência de aterramento apresentada por Frasier (2009), Figura 42, é possível constatar que os modelos computacionais desenvolvidos são capazes de apresentar com uma boa exatidão o efeito de ionização do solo sobre a resistência de aterramento.

Figura 42 - Dependência da resistência de aterramento com a corrente de surto.



Fonte: Extraído de Frasier (2009).

Independente da forma de onda da corrente de descarga de retorno, o valor de resistência de aterramento obtido pelo modelo Martinez sempre resultou em valores ligeiramente inferiores àqueles obtidos pelo emprego do modelo Kindermann. A partir desta constatação, pode-se afirmar a consideração do efeito de ionização do solo representado no equacionamento matemático de cada modelo é equivalente, conduzindo a valores similares de resistência de aterramento para os mesmos parâmetros característicos do solo e eletrodo de aterramento formado por uma única haste de aterramento. Embora os sistemas reais de aterramento de torres de transmissão de energia elétrica não empreguem um arranjo formado por uma única haste de aterramento como considerado neste estudo, os resultados permitem realizar uma investigação do comportamento dinâmico da resistência de pé de torre considerando os diferentes tipos de formas de onda de corrente de descarga e suas implicações no efeito de ionização do solo.

Outra constatação diz respeito à forma de onda do valor instantâneo da resistência de aterramento em função do tipo de corrente de descarga de retorno considerada no estudo computacional. Os parâmetros característicos de tempo de frente e tempo de cauda, além da derivada máxima da corrente de descarga, determinam efeitos característicos específicos quanto à ionização do solo e, conseqüentemente, do valor mínimo da resistência de pé de torre, fato que influencia no desempenho elétrico da LT. A corrente de descarga do tipo dupla exponencial, que apresenta derivada máxima no início da frente de onda, resultou no menor valor de resistência de aterramento tanto para o modelo de Martinez quanto para o modelo de Kindermann. No outro extremo observa-se que a utilização da corrente de descarga do tipo pico duplo, com frente de onda mais lenta e também a atenuação na amplitude da corrente para o

intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo picos, resultou nos maiores valores de resistência de aterramento devido à uma menor ionização do solo. Já a utilização de corrente de descarga do tipo CIGRÈ levou a valores de resistência de aterramento intermediários entre as duas formas de onda de corrente de surto supracitadas.

Desta forma, considera-se que um estudo computacional de desempenho de linhas de transmissão empregando o modelo de resistência de aterramento de Kindermann e a corrente de descarga com forma de onda real do tipo CIGRÈ representa a condição mais severa de esforços elétricos na torre e que resultará nos maiores valores de sobretensões aplicadas à cadeia de isoladores e pior desempenho. Por outro lado, a escolha por corrente de descarga com forma de onda do tipo dupla exponencial associada com modelo de resistência de aterramento de Martinez representa a condição de menores amplitudes de sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores, e conseqüentemente, o melhor desempenho da linha de transmissão uma vez que suportará o maior valor de corrente crítica de descarga. O valor de resistência de aterramento para aquele caso é 7,36% superior ao valor encontrado neste.

4.3. ESTUDO DE CASO 2: Análise da influência do efeito de ionização do solo em modelos de aterramento quanto à amplitude das sobretensões originadas por descargas atmosféricas.

Neste estudo de caso são apresentados e analisados os resultados de investigação acerca da amplitude das sobretensões impulsivas estabelecidas sobre os arranjos isolantes para os modelos de aterramento compostos por uma haste simples, levando em consideração os equacionamentos propostos por Kindermann (1995) e Martinez (2008) para a avaliação do efeito de ionização do solo.

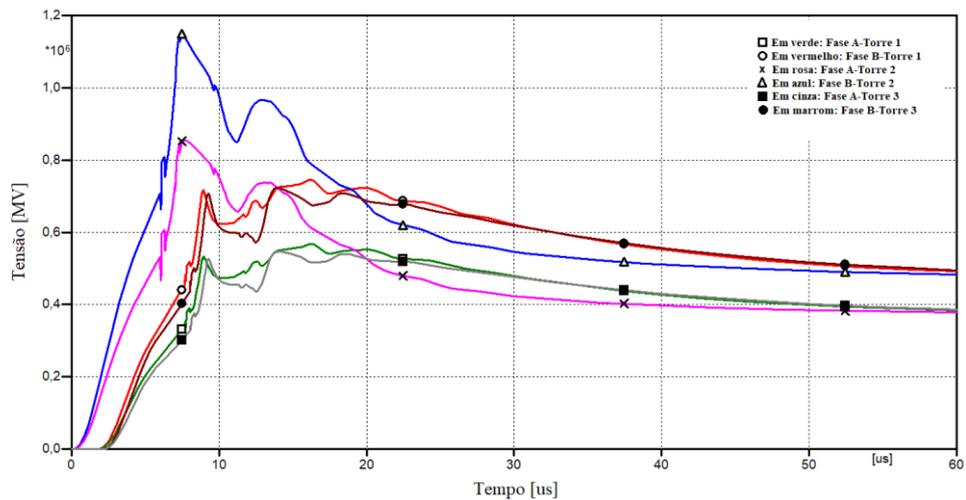
Com a finalidade de demonstrar a relevância em considerar o efeito de ionização do solo nos modelos de aterramento para cálculo das sobretensões estabelecidas nas linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas, os estudos consideraram além dos modelos de Kindermann e Martinez, um estudo de caso com sistema de aterramento representado de forma elementar por uma resistência concentrada.

Em todos os casos a máxima sobretensão imposta sobre os arranjos isolantes ocorreu na Torre 2, a qual sofre a incidência de descarga atmosférica, e nas cadeias de isoladores dos condutores da fase central (Fase B), devido à geometria do perfil de torre utilizado neste estudo.

4.3.1. Modelo proposto por Martinez

A sobretensão imposta às cadeias de isoladores da fase B, utilizando-se o modelo de aterramento proposto por Martinez, apresentado no item 3.3.2, quando solicitado por uma corrente impulsiva do tipo Pico Duplo, atingiu o valor máximo de 1,1494 [MV] no instante de tempo igual a 7,47 [μ s], como apresentado pela Figura 43.

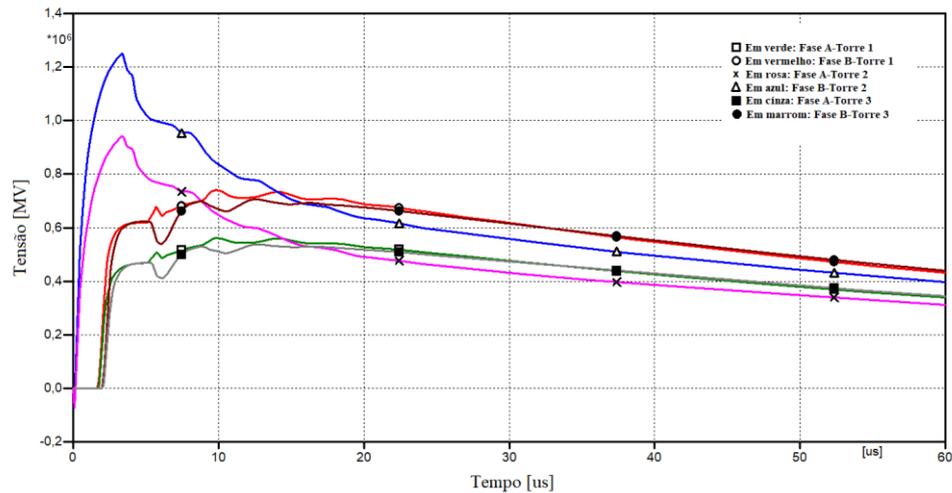
Figura 43 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Pico Duplo, para o modelo de aterramento proposto por Martinez.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para o caso no qual a corrente de retorno tem forma de onda do tipo Dupla Exponencial, o máximo valor de sobretensão ocorrido no instante de tempo igual a 3,34 [μ s] foi de 1,2495 [MV].

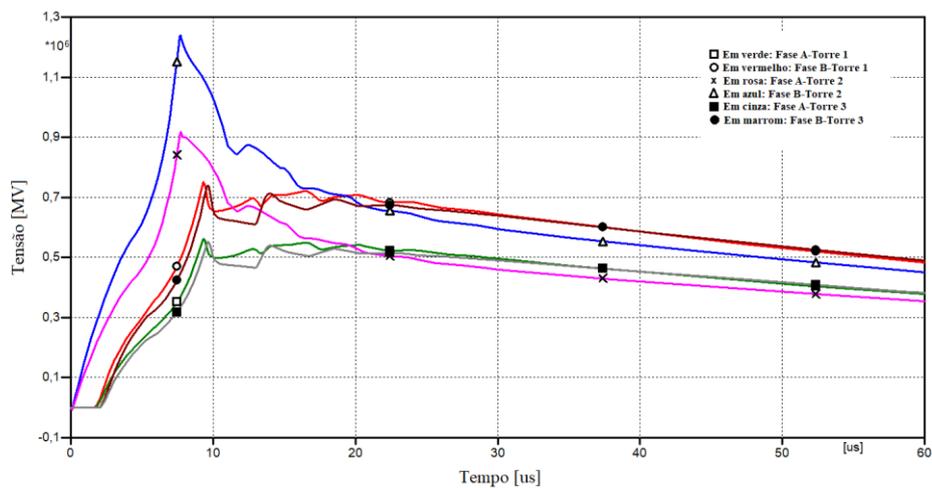
Figura 44 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Dupla Exponencial, para o modelo de aterramento proposto por Martinez.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Já para o caso no qual a corrente de retorno foi representada com as características recomendadas pelo CIGRÉ, a máxima sobretensão imposta às cadeias de isoladores foi de 1,2394 [MV] no instante de tempo igual a 7,69 [μ s].

Figura 45 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga recomendada pelo CIGRÉ, para o modelo de aterramento proposto por Martinez.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Com objetivo de permitir a realização de análises comparativas, a Tabela 15 resume os valores máximos de sobretensões atmosféricas e o tempo de ocorrências destas para cada tipo de corrente de retorno considerada.

Tabela 15 - Comparação das máximas sobretensões impostas, utilizando modelo de aterramento proposto por Martinez, para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.

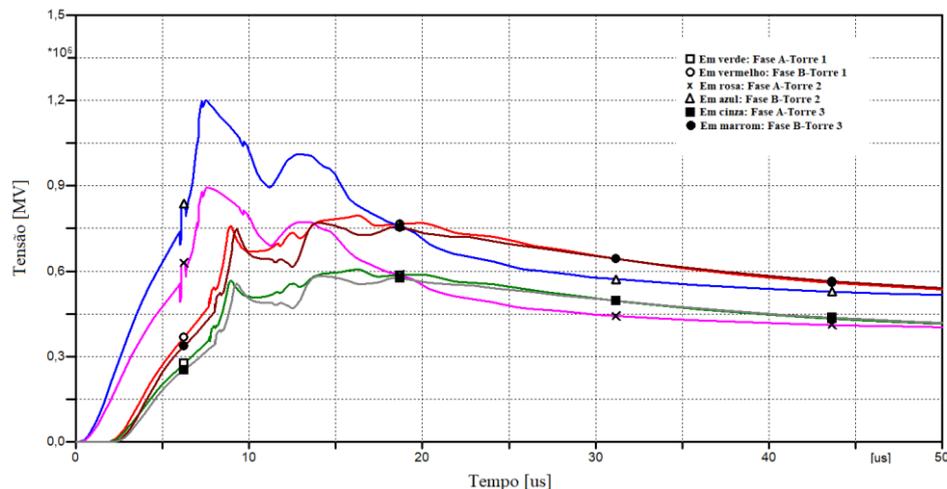
Parâmetros	Descarga do tipo Pico Duplo	Descarga do tipo Dupla Exponencial	Descarga recomendada pelo CIGRÉ
Máxima Sobretensão [MV]	1,1494	1,2495	1,2394
Tempo de máxima sobretensão [μs]	7,47	3,34	7,69

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.3.2. Modelo proposto por Kindermann

As sobretensões impostas às cadeias de isoladores, utilizando-se do modelo de aterramento proposto por Kindermann, apresentado no item 3.3.1, quando solicitado por uma corrente impulsiva do tipo Pico Duplo, atingiram o valor máximo de 1,2008 [MV] no instante de tempo igual a 7,47 [μs].

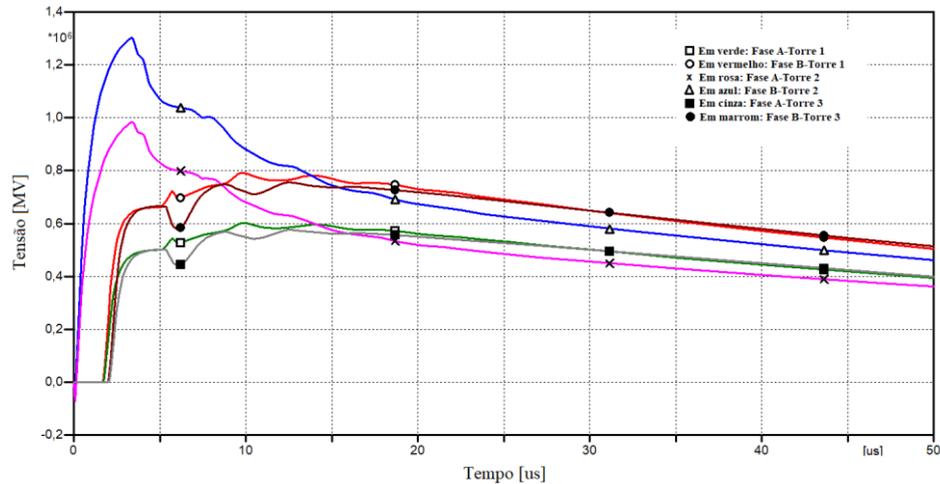
Figura 46 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Pico Duplo, para o modelo de aterramento proposto por Kindermann.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para corrente de descarga de retorno do tipo Dupla Exponencial, as sobretensões alcançaram seu máximo valor no instante de tempo igual a $3,36 \mu\text{s}$ chegando a $1,3033 \text{ [MV]}$.

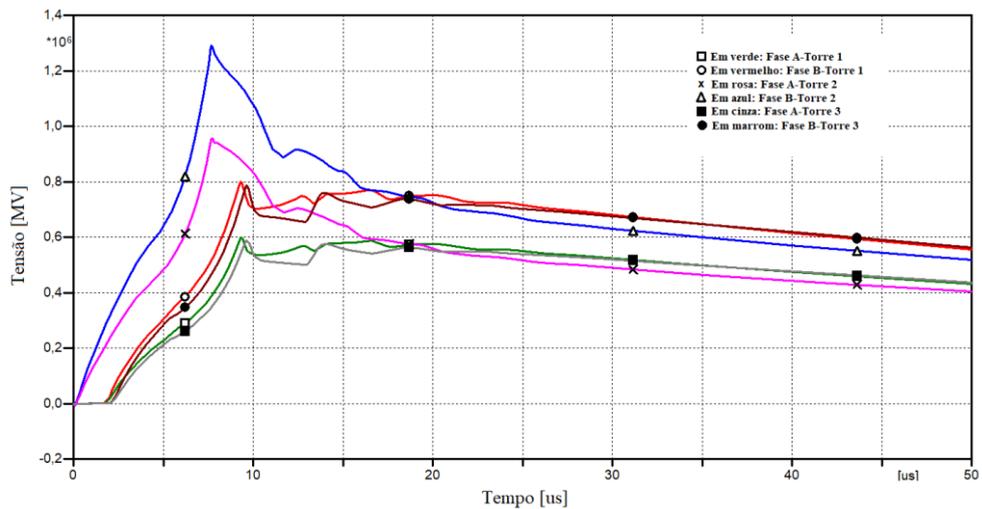
Figura 47 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga do tipo Dupla Exponencial, para o modelo de aterramento proposto por Kindermann.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A forma de onda da corrente de descarga do tipo CIGRÉ, resultou no valor máximo de $1,2904 \text{ [MV]}$ de sobretensão imposta às cadeias de isoladores no instante de tempo igual a $7,68 \mu\text{s}$.

Figura 48 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à descarga recomendada pelo CIGRÉ, para o modelo de aterramento proposto por Kindermann.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Tabela 16 apresenta as sobretensões máximas e o tempo de ocorrências destas para cada corrente forma de onda de corrente de descarga de retorno considerada neste trabalho.

Tabela 16 - Comparação das máximas sobretensões impostas, utilizando modelo de aterramento proposto por Kindermann, para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.

Parâmetros	Descarga do tipo Pico Duplo	Descarga do tipo Dupla Exponencial	Descarga recomendada pelo CIGRÉ
Máxima Sobretensão [MV]	1,2008	1,3033	1,2904
Tempo de máxima sobretensão [μs]	7,47	3,36	7,68

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

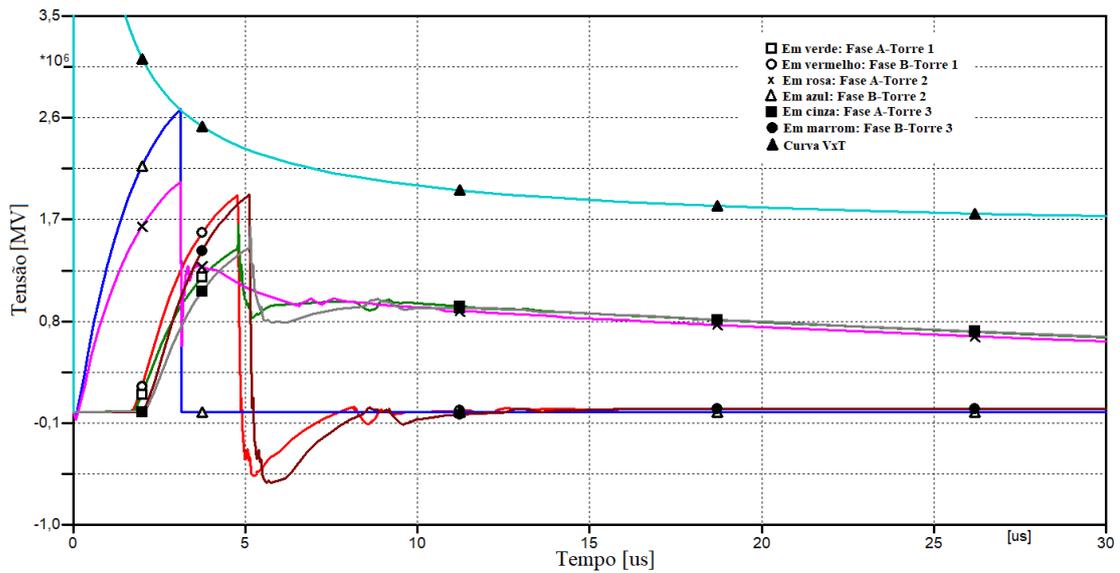
4.3.3. Modelo de aterramento com haste única, desconsiderando o efeito de ionização do solo

A ionização do solo é um fenômeno que na maioria das vezes traz benefícios para os sistemas de transmissão de energia elétrica, uma vez que quando solicitado por altas correntes elétricas e em curtos períodos, este incorre na redução considerável do valor da resistência de aterramento. Conseqüentemente os níveis de sobretensões impostas aos arranjos isolantes são proporcionalmente reduzidos e o desempenho elétrico da LT mostra-se melhorado.

Neste sentido, um estudo de caso foi então realizado, com intuito de se averiguar tal comportamento. Portanto, um sistema de aterramento contendo uma resistência concentrada, com valor igual à dos itens 4.3.1 e 4.3.2, foi considerado. A resistência de aterramento possui valor igual ao de uma única haste, apresentada na Tabela 11, a saber, 412,64 ohms.

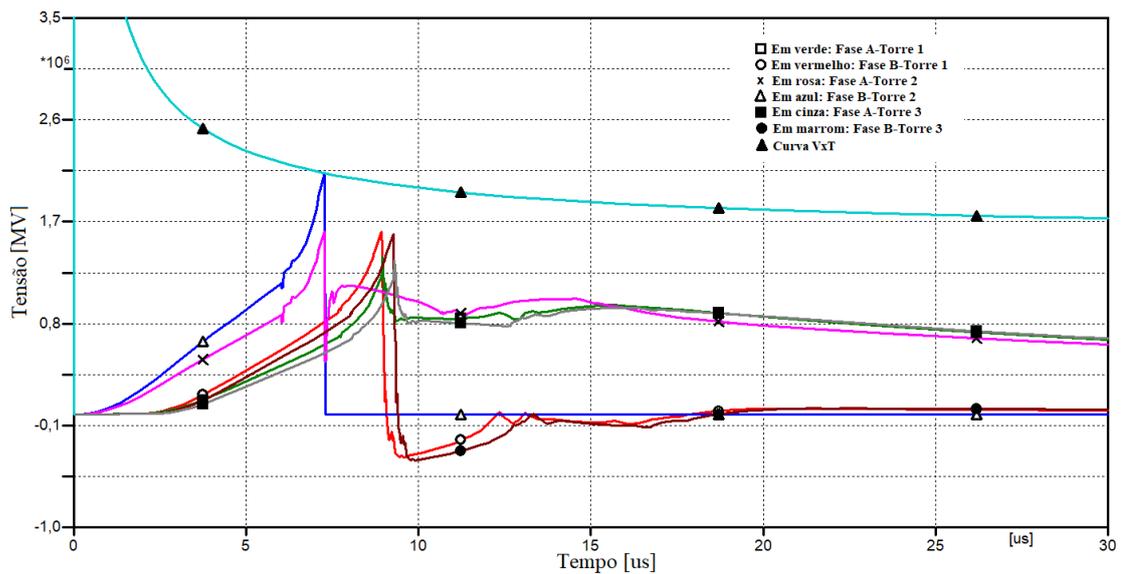
As Figuras 49, 50 e 51 apresentam as sobretensões impostas às cadeias de isoladores, quando disposto de um modelo de aterramento composto por apenas uma haste, na presença de correntes impulsivas do tipo Dupla Exponencial, Pico Duplo e CIGRÉ, respectivamente. Para estes casos, observa-se que os níveis de sobretensão impostos sobre as cadeias de isoladores, referentes à Fase B da Torre 2, reduzem a zero, uma vez a cadeia de isolador dessa fase se rompeu, caracterizando assim a existência de um curto circuito entre fase e terra.

Figura 49 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à corrente impulsiva do tipo Dupla Exponencial, para o modelo de aterramento formado por haste única.



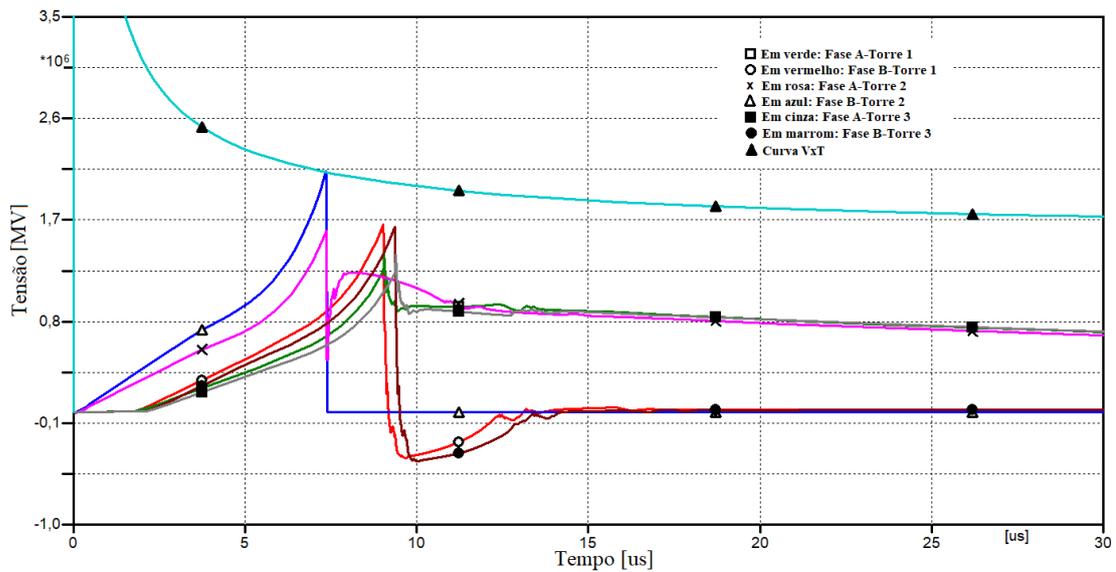
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 50 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à corrente impulsiva do tipo Pico Duplo, para o modelo de aterramento formado por haste única.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 51 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores devido à corrente impulsiva recomendada pelo CIGRÉ, para o modelo de aterramento formado por haste única.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os parâmetros característicos das sobretensões impostas às cadeias de isoladores obtidas para cada corrente impulsiva, são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Comparação das máximas sobretensões impostas, utilizando modelo de aterramento composto por apenas uma haste, para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.

Parâmetros	Descarga do tipo Pico Duplo	Descarga do tipo Dupla Exponencial	Descarga recomendada pelo CIGRÉ
Máxima Sobretensão [MV]	2,1302	2,6770	2,1315
Tempo de máxima sobretensão [μ s]	7,27	3,11	7,36

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.3.4. Constatações obtidas com base na análise dos resultados obtidos com o estudo de caso 2.

A análise das formas de onda das sobretensões obtidas nos resultados apresentados nos itens 4.3.1 e 4.3.2 denota similaridade nos perfis de sobretensões impulsivas impostas aos arranjos isolantes. Tal semelhança se reflete tanto nos valores máximos de sobretensão registrados quanto nos respectivos instantes de tempo de ocorrência destes valores máximos. Esta observação nos permite afirmar que os dois modelos de aterramentos de Kindermann e Martinez são modelos equivalentes quanto ao desempenho de linhas de transmissão no que se refere ao fenômeno de *backflashover*.

Entretanto, uma análise comparativa permite constatar que os valores de máximas sobretensões obtidas com emprego do modelo de aterramento proposto por Kindermann foram superiores àqueles obtidos com emprego do modelo proposto por Martinez, independentemente da forma de onda de corrente de descarga utilizada no estudo. Para o caso considerando a corrente de descarga do tipo dupla exponencial, a máxima sobretensão resultante do modelo de Kindermann apresentou-se 4,58% superior à sobretensão registrada com modelo de Martinez. Esta constatação significa que estudos de desempenho de linhas de transmissão empregando modelo de aterramento de Martinez conduzem a resultados ligeiramente mais conservativos, uma vez que as sobretensões resultantes possuem menores amplitudes do que quando utilizamos o modelo de aterramento de Kindermann. Maiores valores de sobretensão contribuirão para maior número de desligamentos para a mesma amplitude da corrente de descarga, exigindo assim, maior número de isoladores para compor a cadeia de isoladores. Assim, resultam em projetos de coordenação de isolamento mais caros.

A análise dos resultados apresentados no item 4.3.3 deixa claro a importância de se considerar os efeitos causados pela injeção de corrente impulsivas à terra através dos sistemas de aterramento quando realizados estudos a respeito do desempenho de linhas de transmissão. Uma vez que, quando ignorado o efeito de ionização do solo, ocorreram elevados níveis de sobretensão acometendo à disrupção das cadeias de isoladores por *backflashover*. Tal fato fundamenta a afirmação de que uma haste simples não é adequada para aterramento de sistemas de transmissão.

A análise dos resultados obtidos com os casos 4.3.1 e 4.3.2 permite afirmar que estudos de desempenho de linhas de transmissão empregando correntes dos tipo duplo Pico e CIGRÈ fornecem resultados equivalentes para modelo de aterramento com haste única considerando a

ionização do solo, uma vez que apresentam mesmos valores de tensão disruptiva e praticamente os mesmos instantes de tempo de disrupção. Portanto, para este caso a corrente de descarga do tipo CIGRÈ é capaz de representar com precisão os efeitos das correntes de descarga reais do tipo pico duplo. Tal afirmação pode ser também verificada com observação dos resultados dos estudos de casos anteriores obtidos nas tabelas 15 e 16, para os sistemas de aterramento com modelos de Martinez e Kindermann.

Outra constatação respeita ao fato de que estudos de desempenho de LT's envolvendo estes dois tipos de corrente de descarga de retorno fornecem resultados mais conservativos do que os resultados de estudos de desempenho da LT empregando corrente de descarga de retorno do tipo dupla exponencial, uma vez que este modelo requer maior valor de sobretensão para ocorrência da disrupção. O valor absoluto da diferença nas sobretensões é de 546,8 kV (2,6770 MV – 2,1302 MV). Esta diferença na magnitude da sobretensão disruptiva, representa a suportabilidade elétrica de cerca de 5 isoladores de disco de vidro. Portanto, estudos de desempenho de LT's empregando esta forma de onda dupla exponencial para representar a corrente de descarga de retorno e os modelos de aterramento com haste simples, pode levar a um subdimensionamento da quantidade de isoladores que compõe os arranjos isolantes.

4.4. ESTUDO DE CASO 3: Análise das sobretensões disruptivas para os modelos de aterramento convencionais

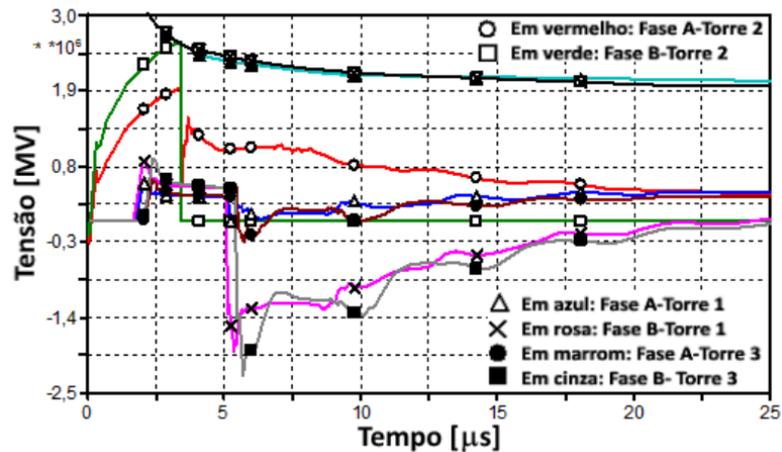
Neste item são apresentados os resultados dos estudos de *backflashover* na linha de transmissão ao ser atingida por descargas atmosféricas com forma de onda do tipo dupla exponencial. Neste estudo a suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes foram representadas pela curva $V \times T$.

Desta forma, este estudo tem por objetivo identificar os valores das sobretensões disruptivas, ou seja, que provocam a disrupção nas cadeias de isoladores. Também serão registrados os instantes de ocorrência da disrupção. Para que ocorra a disrupção, a amplitude da corrente de descarga foi gradativamente aumentada alterando-se proporcionalmente os seus parâmetros da função dupla exponencial de forma a preservar o tempo de frente, tempo de cauda e a derivada máxima.

A Figura 52 extraída de Rodrigues (2017) apresenta as sobretensões nas cadeias de isoladores nas três torres do sistema de transmissão sob investigação empregando um resistor

concentrado com resistência elétrica igual a 30 ohms. Este resultado foi considerando neste trabalho por representar o modelo de aterramento mais comumente encontrado na literatura científica. Portanto é muito relevante analisar os resultados de desempenho da LT obtidos com este modelo de aterramento com resistência concentrada comparando-os com os resultados obtidos empregando-se os modelos de aterramento convencionais em sistemas de transmissão.

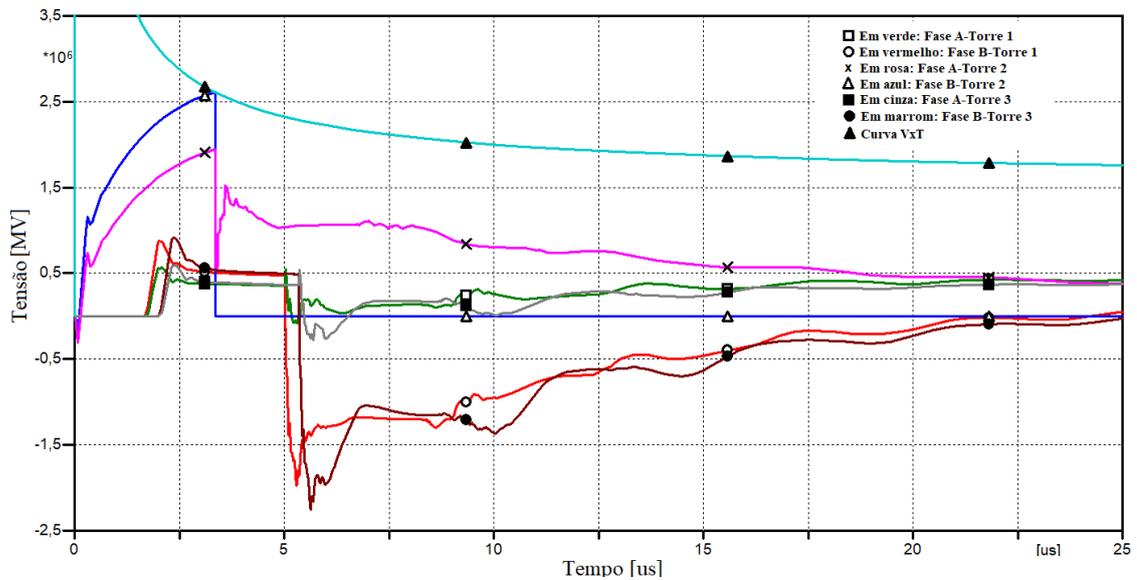
Figura 52 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores para o modelo resistência de aterramento igual a 30 ohms.



Fonte: Extraído de Rodrigues (2017).

Para o caso em que o modelo de aterramento é constituído por hastes em paralelo, como apresentado no item 3.3.3, a característica das sobretensões aplicadas às cadeias de isoladores é apresentada na Figura 53.

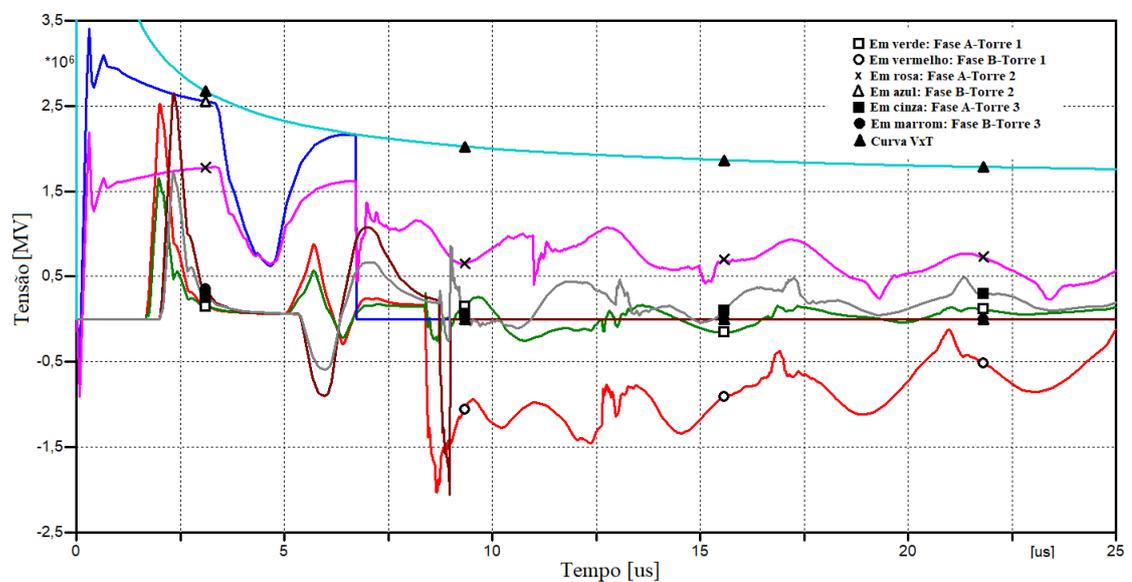
Figura 53 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores para o modelo de aterramento composto por hastes em paralelo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores utilizando o modelo de aterramento constituído por cabos contrapesos, descrito no item 3.3.4, são apresentadas na Figura 54.

Figura 54 - Sobretensões impostas às cadeias de isoladores para o modelo de aterramento composto por cabos contrapesos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Observa-se a que para todos os casos apenas a cadeia de isoladores da fase B da Torre 2 fora acometida por *backflashover*. Os parâmetros elétricos determinantes para a ocorrência de *backflashover*, para cada um dos casos, estão resumidos na Tabela 18.

Tabela 18 - Comparação dos parâmetros de desempenho elétrico da LT para os modelos de aterramento considerados neste estudo.

Parâmetros	Modelo composto por hastes em paralelo	Modelo composto por cabos contrapesos	Modelo com resistência igual a 30 [Ω].
Corrente de descarga [kA]	189,90	564,600	189,87
Tensão disruptiva [MV]	2,6063	2,1659	2,5969
Tempo de disrupção [μ s]	3,36	6,72	3,40
Máxima sobretensão [MV]	2,6111	3,4032	2,6070
Tempo de máxima sobretensão [μ s]	3,34	0,31	3,34

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A análise das Figuras 52, 53 e 54 juntamente com os resultados compilados na Tabela 18, deixa claro a elevada influência que a resistência de aterramento exerce no desempenho elétrico da LT's, uma vez que comprova o paradigma de que quanto menor o valor da resistência de aterramento melhor será o desempenho da LT perante sobretensões atmosféricas, exigindo elevados valores de correntes crítica de descarga para ocorrência da disrupção. Tomando a resistência de aterramento como critério de projeto de linhas de transmissão, é possível atingir níveis operacionais mais eficientes e seguros, melhorando os índices de continuidade no fornecimento, reduzindo assim, os altos prejuízos causados no setor elétrico por desligamentos desta ordem.

A análise mais relevante trata da amplitude da corrente crítica de descarga. O emprego do modelo de aterramento composto por cabos contrapesos resultou em amplitude de corrente crítica de descarga superior em 197,31% ao valor obtido pelo modelo composto por hastes em paralelo e também pelo modelo de aterramento com resistência elétrica concentrada e igual a 30 [Ω].

Outro fato importante observado no caso de modelo de aterramento por cabos contrapesos é que a máxima sobretensão imposta às cadeias de isoladores superou em 30% os

níveis estabelecidos pelos outros modelos, não ocorrendo a disrupção. Para os outros dois modelos de aterramento, a tensão disruptiva (2,6 MV) foi muito inferior ao valor da máxima sobretensão registrada para o modelo de aterramento com cabos contrapesos (3,4032 MV). Tal fato pode ser compreendido por entendimento de que além de apresentar reduzido valor de resistência elétrica, o modelo de aterramento por cabos contrapesos proporciona uma forma de onda da sobretensão que sofre uma elevação em intervalo de tempo muito baixo, menor do que 0,31 [μ s]. Esta derivada máxima da sobretensão em intervalo de tempo muito pequeno permite que o pico de sobretensão ocorra em intervalo de tempo no qual a curva V_xT também possui elevado valor de suportabilidade elétrica. Esse fato contribui para que não ocorra a disrupção mesmo para valores de pico de sobretensão muito superiores aos valores de tensão disruptiva para os demais modelos de aterramento. Basta observar como a frente de onda da sobretensão para os modelos de aterramento com múltiplas hastes e também com resistência concentrada é mais lenta originando valores máximos de sobretensão em instantes de tempo nos quais a curva de suportabilidade elétrica possui menor amplitude.

Comparando o modelo de aterramento composto por hastes em paralelo com o modelo assumindo resistência igual a 30 [Ω], observa-se a estes modelos são equivalentes e conduzem a resultados de desempenho elétrico de LT's muito similares. Neste caso, justifica-se empregar modelo de aterramento representado por resistência elétrica concentrada que possui implementação elementar comparado ao modelo de aterramento com hastes múltiplas em paralelo.

Desta forma, pode-se afirmar que, para os casos analisados, o modelo de aterramento representado por cabos contrapesos é capaz de representar com precisão sistemas de aterramento reais e proporciona os melhores resultados de desempenho elétrico de LT's perante sobretensões atmosféricas.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação comparativa dos métodos de avaliação dos sistemas de aterramento tipicamente utilizados em torres de linhas de transmissão, quando submetidos a correntes impulsivas de natureza atmosférica. Junto a isso foram empregados modelos representativos quanto aos efeitos ionizantes do solo proporcionados pelo campo elétrico durante o escoamento da corrente de descarga à terra.

Visto a significativa influência exercida pelos modelos de aterramento sobre o desempenho das linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas, torna-se imprescindível que se adote modelos computacionais viáveis e capazes de reproduzir com precisão os fenômenos reais para a realização de análises quanto às suas limitações quando na ocorrência desses fenômenos.

Os modelos matemáticos baseados na determinação do sistema de aterramento levando em consideração os arranjos que os compõem e as características físicas do solo, podem ser utilizados para o modelamento de malhas tanto para aterramentos rurais quanto para aterramentos urbanos, uma vez respeitadas as diretrizes relacionadas às faixas de segurança.

Desta forma o estudo dos diferentes modelos de representação da resistência de aterramento e de suas consequências quanto ao desempenho elétrico das linhas de transmissão constitui uma ferramenta auxiliar para o projeto de coordenação de isolamento. Ao identificar os problemas relacionados ao mal dimensionamento das cadeias de isoladores de linhas de transmissão, por parte de análises, falhas, relacionadas à impedância de aterramento, um estudo pode ser apresentado, no intuito de instruir alguns métodos relacionados à interpretação do comportamento da impedância de aterramento. Dessa forma, é permitido que o analista possa tomar parâmetros, próximos dos valores reais, para a realização de estudos e elaboração de projetos de LT's.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para possíveis trabalhos futuros, é de grande valia o desenvolvimento de um modelo matemático computacional que represente as alterações nos níveis de sobretensão provocados pela ionização do solo quando empregados modelos de aterramento compostos por malhas ou hastes em paralelo.

Nota-se que um estudo voltado a análise de custo benefício referentes à implantação de cada um dos modelos de aterramento tem sua importância, uma vez que tal fator influencia diretamente no desempenho das linhas de transmissão.

7. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5422 - **Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**, 1985. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~joao/CE/Trabalho/Trabalho2013/NBR5422.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2021.

ALIPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência**. Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG. [S.l.]. 2008.

ALÍPIO, R. S. et al. **Cálculo de resistência de aterramento de malhas de aterramento em baixas frequências**. I Jornada Nacional de Iniciação Científica, Brasília, 2006.

ANJOS, Luiz Guilherme Ferreira da Cunha dos; SANTOS, Natannie Lima dos. **MÉTODO UTILIZADO PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2013. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica., Centro Universitário de Belo Horizonte, Belo Horizonte, 2013.

ATMOSFÉRICA, Grupo de Eletricidade. **Notícias ELAT N° 38. 2017**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/informativo/index.php?informativo=38>>. Acesso em: 25 maio 2019.

ARAMES, Belgo Bekaert. **Fios e cordoalhas de aço zincados para Eletrificação e Telefonia**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/8168/37090/bb-148-13-folder%20eletrifica%C3%A7%C3%A3o-21x27cm-v7-low.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2021.

BERGER K.; ANDERSON, R. B.; KRONINGER, H. **Parameter of lightning flashes**. Revista Electra. v.41, pp. 23-37. 1975.

BERARDO, Benício Luiz. **ESTUDO DO ATERRAMENTO DOS PÉS DE TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. 2012. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista., Bauru, 2012.

BRITO, Guilherme. **Descargas Atmosféricas – O que são, quando e como ocorrem, e como se proteger?** Disponível em: <Descargas Atmosféricas – O que são, quando e como ocorrem, e como se proteger?>. Acesso em: 7 dez. 2017.

CIGRÈ - INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS. STUDY COMMITTEE 33 (OVERVOLTAGES AND INSULATION

COORDINATION). WORKING GROUP 01 (LIGHTNING). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. Paris: CIGRÉ, Brochure nº 63, 1991.

CUNHA, L. V. **Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Julho 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8MCHLM>

DE CONTI, A.; VISACRO, S. **Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms**. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 49, n. 2, pp. 448-457. May, 2007. DOI: 10.1109/TEMC.2007.897153

E.E. Oettle. **A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes**. IEEE Paper, July, 1987. n.87 SM567-1, pp.12-17.

ELAT. **Sistema Elétrico**. 2019. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>. Acesso em: 02 jan. 2021.

FILHO, S. V.; **“Aterramentos Elétricos”**. Artilber Editora, São-Paulo, 2002.

FRASIER, Jason, L. Surge Phenomena in Electric Power Engineering **EPOW-6860 : Surge Phenomena in Electric Power Engineering**. IPST – International Conference on Power System Transients. 2009

GATTA, F.M.; GERI, A.; LAURIA S. **Backflashover simulation of HV transmission lines with concentrated tower grounding**, *Electric Power Systems Research*. v. 73, n.3, pp. 373–381, March 2005. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.08.011>

GATTA, F. M.; GERI, A.; LAURIA, S.; MACCIONI, M.; SANTARPIA, A. **An ATP-EMTP Monte Carlo procedure for backflashover rate evaluation: A comparison with the CIGRE method**. *Electric Power Systems Research*, v. 113, pp. 134-140, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.031>

GRCEV, L. **Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements**. *Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on*, Munich, Germany, 24-28 Sept. 2007. p.325,328.

HEIDLER, F.; CVETIC, J. M.; STANIC, B. V. **Calculation of lightning current parameters**. *IEEE Transactions on Power Delivery*. v. 14. n. 2, April. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.754080>

HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. New York: Basel, 1999. pp. 767 ISBN:0-8247-9957-7. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420052015>

IEEE - THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, **Guide for improving the lightning performance of transmission lines**. IEEE Std. 1243-1997, New York, United States of America, June 1997. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1997.84660>

IEEE - THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE STANDARD 4-1995. **Standard Techniques for High-Voltage Testing.**, April. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6515981>

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra - D.c. Luzzato, 1995.

LAFORST, J. J. **Transmission-line reference book. 345 kV and above**. General Electric Co., Pittsfield, MA (USA). Large Transformer Div.; General Electric Co., Schenectady, NY (USA). Electric Utility Systems Engineering Dept., 1981.

LIMA, Alexander Barros. **MÉTODO PARA CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE MALHAS DE ATERRAMENTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MARTINEZ, Juan A.; CASTRO, Farley. **EMTP IMPLEMENTATION OF A MONTE CARLO METHOD FOR LIGHTNING PERFORMANCE ANALYSIS OF TRANSMISSION LINES: IMPLANTACIÓN EN EMTP DE UN PROCEDIMIENTO BASADO EN EL MÉTODO DE MONTE CARLO PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE AL RAYO**. Revista Chilena de Ingeniería, Chile, v. 16, n. 1, p.169-180, jan. 2008.

MARTINEZ, Juan A.; CASTRO, Farley. **“Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP,”** IEEE Transactions on Power Delivery. Volume 20. Issue 3. July 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848454>

MAYER, Elton Anthony Novais. **ATERRAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO 138kV EM AMBIENTE SEMIÁRIDO – ESTUDO DE CASO**. 2018. 82 f. Tese (Doutorado) - Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

MOTA, P. C. A. **Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14468>.

PASSOS JÚNIOR, Alexandre Marmelo dos. **UTILIZAÇÃO DE CABO GUARDA EXTRA PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ROCHA, L. C. **Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UHT frente a descargas atmosféricas: Influência da ruptura a meio de vão**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/331M.PDF>

RODRIGUES, André Roger. **Influência da corrente de descarga atmosférica e dos modelos para caracterização da suportabilidade de isoladores no fenômeno de backflashover**. 2017. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

Rondon, D., Vargas, M., Herrera, J., Montana, J., Torres, H., Camargo, M., Jimenez, D. Delgadillo, A. (2005). **Influence of grounding system modeling on Transient analysis of transmission lines due to direct lightning strike**. IEEE Russia Power Tech. June 2005. Petersburg, Russia. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524515>

ROSADO, G. C., “**Investigação teórico-experimental sobre a resposta de Aterramentos Elétricos frente a correntes de Descargas Atmosféricas**”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2008.

SALARI FILHO, J.C. **Efeito das descargas atmosféricas no desempenho de linhas de transmissão – modelagens no domínio do tempo e da frequência**. Tese de doutorado, Coordenação de Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), UFRJ, 2006.

SILVA, A. P. **MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES E ANÁLISE DE CASOS**. 2007. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SHARIATINASAB, Reza; GHOLINEZHAD, Javad. **The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines**. Journal Of Applied Research And Technology, volume 15, issue 6, p.545-554, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.06.003>.

SOARES Jr. A., “**Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas**”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 1996.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos**. São Paulo: Artliber, 2002.

VISACRO, S. **A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke**. Journal of Geophysical Research, vol. 31, n. 7, April, 2004. DOI <https://doi.org/10.1029/2004GL019642>

VISACRO FILHO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

YAMADA T.; MOCHIZUKI, A.; SAWADA, J.; ZAIMA, E.; KAWAMURA, T.; AMETANI, A.; ISHII, M.; KATO, S. **Experimental evaluation of UHV tower model for lightning surge analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, pp. 392–402, Jan. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.368374>

8. APÊNDICE

Comprovante de assinatura da folha de aprovação do presente trabalho de conclusão de curso, a folha foi assinada eletronicamente utilizando o Contraktor conforme apresentado a seguir.

 **Comprovante de Assinatura Eletrônica**




Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)
Certificado de assinatura gerado em 17/01/2022 às 20:49:57 (GMT -3:00)

05-Folha-de-Aprovacao-TCC_LuizFernando.docx

ID única do documento: #d1076498-a0f8-461b-a6f9-c6390a4b0692

Hash do documento original (SHA256): fc90be78cd958e52043d9e2fe7250bf54c90874e8d4488789648de0acc0100c3c

Este Log é exclusivo ao documento número #d1076498-a0f8-461b-a6f9-c6390a4b0692 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

Assinaturas (3)

- ✓
Carlos Renato Borges dos Santos (Participante)
 Assinou em 17/01/2022 às 20:56:52 (GMT -3:00)
- ✓
Marco Antônio Silva Pereira (Participante)
 Assinou em 17/01/2022 às 22:15:07 (GMT -3:00)
- ✓
André Roger Rodrigues (Participante)
 Assinou em 17/01/2022 às 23:43:50 (GMT -3:00)

Histórico completo

Data e hora	Evento
17/01/2022 às 20:49:58 (GMT -3:00)	André Roger Rodrigues solicitou as assinaturas.
17/01/2022 às 20:56:52 (GMT -3:00)	Carlos Renato Borges dos Santos [Autenticação: e-mail carlosrenato@iftm.edu.br; IP: 189.5.179.90] assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em https://verificador.contraktor.com.br . Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

Data e hora	Evento
17/01/2022 às 23:43:50 (GMT -3:00)	André Roger Rodrigues (Autenticação: e-mail andre.roger@ifmg.edu.br; IP: 189.41.73.226) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em https://verificador.contraktor.com.br . Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10º, §2.
17/01/2022 às 22:15:07 (GMT -3:00)	Marco Antônio Silva Pereira (Autenticação: e-mail marco.silva@ifmg.edu.br; IP: 143.137.240.3) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em https://verificador.contraktor.com.br . Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10º, §2.
17/01/2022 às 23:43:51 (GMT -3:00)	Documento assinado por todos os participantes.