



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Avaliação e Dimensionamento de Sistemas
de Aterramento para Redução de
Desligamentos de Linhas de Transmissão por
*Backflashover***

FELIPE MENDES DE VASCONCELLOS

Salvador – Bahia - Brasil
©Felipe Mendes de Vasconcellos, julho de 2017.

de Vasconcellos, Felipe Mendes
Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para
Redução de Desligamentos de Linhas de Transmissão por
Backflashover / Felipe Mendes de Vasconcellos. -- Salvador,
2017.

110 f. : il

Orientador: Fernando Augusto Moreira.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal da Bahia, Escola
Politécnica, 2017.

1. Descargas Atmosféricas. 2. Desempenho de Linhas de
Transmissão. 3. Sistemas de Aterramento. 4. Backflashover. 5.
Alternative Transients Program (ATP). I. Moreira, Fernando
Augusto. II. Título.

Felipe Mendes de Vasconcellos

**Avaliação e Dimensionamento de Sistemas
de Aterramento para Redução de
Desligamentos de Linhas de Transmissão por
*Backflashover***

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal da Bahia, em cumprimento às exigências para a
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.*

Fernando Augusto Moreira, D.Sc.
Orientador

Salvador – Bahia
Julho de 2017

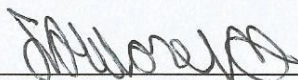
FELIPE MENDES DE VASCONCELLOS

Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de Linhas de Transmissão por Backflashover.

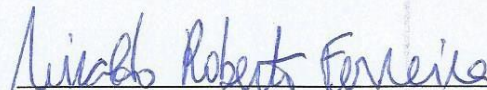
Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de *Mestre*.

APROVADA em: 17 de Julho de 2017.

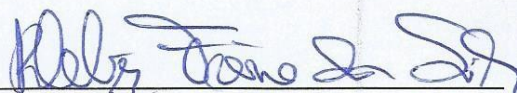
BANCA EXAMINADORA



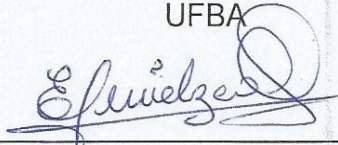
Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira
Orientador/UFBA



Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira
UFBA



Prof. Dr. Kleber Freire da Silva
UFBA



Prof. Dr. Milton Elvis Z. Alcahuaman
UFBA

Agradecimentos

Ao Prof. Fernando Augusto Moreira, meus sinceros agradecimentos por toda a orientação e apoio recebido.

A professora Ana Isabela Araújo Cunha e aos Professores Fabiano Fragoso Costa, Fernando Augusto Moreira e Nivaldo Roberto Ferreira, por tudo que nos ensinaram nas disciplinas cursadas.

Agradeço aos Professores Kleber Freire Silva e Nivaldo Roberto Ferreira por suas contribuições durante o exame de qualificação.

Não poderia deixar de agradecer aos ex-colegas de graduação e posteriormente colegas de mestrado Luiz Henrique Silva e Hugo Cotrim, pela inspiração e incentivo para ingressar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFBA, além de todas as contribuições durante as disciplinas.

Às Senhoritas Ingrid Lima e Ágatha Sampaio, assistentes na secretaria do PPGEE-UFBA, que sempre me atenderam com carinho e dedicação.

A todos os familiares e amigos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

As descargas atmosféricas são responsáveis pelas principais solicitações dos sistemas de aterramento e pela maior parte dos desligamentos não programados das linhas de transmissão. O conhecimento aprofundado do comportamento eletromagnético transitório do aterramento sob essas condições tem importância vital na determinação de práticas eficazes de proteção de sistemas elétricos contra as descargas atmosféricas. Tal comportamento pode ser estimado por meio de simulações computacionais compostas por modelos matemáticos que representem de forma consistente a resposta física do aterramento.

Este trabalho discorre sobre a modelagem de linhas de transmissão para análises e simulações no domínio do tempo de transitórios eletromagnéticos resultantes de descargas atmosféricas incidentes. São apreciados e apresentados os principais mecanismos associados à formação das descargas atmosféricas, os aspectos relevantes à incidência de descargas em linhas de transmissão e os seus mecanismos de propagação em relação ao ponto de incidência. Em seguida, são apresentados e analisados modelos da corrente de descarga atmosférica, torres de transmissão, linhas de transmissão e dos sistemas de aterramento disponíveis para uso no programa computacional Alternative Transients Program (ATP).

A partir destes modelos, foram concebidas simulações computacionais que reproduzem o fenômeno eletromagnético em questão. A sua aplicação a configurações básicas de aterramento permitiu análises diversas. Nestas análises, avalia-se a eficiência dos sistemas de aterramento sob algumas condições, que incluem diferentes configurações, valores de resistividade do solo e onda de corrente injetada.

A ferramenta desenvolvida pode auxiliar valorosamente no estudo, análise e projeto de sistemas de aterramento, especialmente quando é apreciado o desempenho e comportamento dos mesmos frente a descargas atmosféricas. Para todos os testes realizados, a resposta do modelo esteve de acordo com o comportamento esperado.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas, Desligamentos, Sistemas de Aterramento, Backflashover, ATP, Desempenho de Linhas de Transmissão, Sobreensões.

Abstract

Lightning strikes are the main cause of grounding solicitations and non-scheduled electrical systems outages. The accurate knowledge of grounding electromagnetic transient behavior under these conditions is of great importance in determination of lightning protection practices for electric system. Such behavior may be estimated by the establishment of a mathematical and computational physically consistent model which represents the grounding.

This work deals with the modeling of transmission lines for analysis and simulations in the time domain of electromagnetic transients resulting from lightning. The main mechanisms associated to the formation of lightning strikes, the relevant aspects to the incidence of lightning in transmission lines and their mechanisms of propagation in relation to the point of incidence are appreciated and presented. Then, the models of the lightning strike, transmission towers, transmission lines and the grounding systems available for use in the Alternative Transients Program (ATP) computer program are presented and analyzed.

From these models, a computational tool was designed to simulate the referred electromagnetic phenomenon. Its application to basic ground configurations has allowed for diverse analyzes. In these analyzes, the efficiency of grounding systems is evaluated under some conditions, which include different configurations, values of soil resistivity and injected current wave.

The tool developed can be valuable in the study, analysis and design of grounding systems, especially when it is appreciated their performance and behavior against lightning. For all the tests performed, the response of the model was in accordance with the expected behavior.

Key words: Lightning, Outages, Grounding Systems, *Backflashover*, ATP, Transmission Line Performance, Overvoltage.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Representação esquemática de uma descarga atmosférica	22
Figura 2 - Descargas atmosféricas atingindo direta e indiretamente a Linha de Transmissão	27
Figura 3 - Ruptura de isolamento por <i>flashover</i>	28
Figura 4 - Ruptura de isolamento por <i>backflashover</i>	30
Figura 5 - Componentes de corrente no solo e circuito equivalente do aterramento – adaptada de Visacro (2002).	33
Figura 6 - Exemplo de forma de onda utilizando a Fórmula de Heidler	38
Figura 7 - Modelo da torre de transmissão por linhas sem perdas, com a representação da impedância de surto por cada trecho. Adaptada de (ARAÚJO; KUROKAWA, 2016).	39
Figura 8 - (a) Situação física; (b) Circuito equivalente em baixas frequências; (c) Circuito equivalente em altas frequências.	41
Figura 9 - Modelo de uma célula do cabo contrapeso	43
Figura 10 - Representação generalizada do condutor contrapeso	44
Figura 11 - Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica. Situação com uma torre adjacente.	45
Figura 12 - Comportamento das correntes "mediana" e "crítica"	46
Figura 13 - Configuração da torre da linha de transmissão de 138kV, e circuito equivalente da torre.	47
Figura 14 - Modelo elétrico básico no ATPDraw para avaliações	48
Figura 15 - Modelo elétrico no ATPDraw com aterramento modelado apenas por uma haste de 3/4’’ x 1,5m	50
Figura 16 – Representação gráfica da topologia de aterramento com uma haste conectada diretamente ao pé da torre	50
Figura 17 - Tensões nos isoladores com uma haste de 3/4’’x1,5m	51
Figura 18 - Tensões nos isoladores com uma haste de 5/8’’x2,4m	52
Figura 19 - Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando haste de aterramento de 3/4’’x1,5m e 5/8’’x2,4m.	52

Figura 20 - Representação gráfica da topologia de aterramento com um cabo de aterramento e haste de aterramento associada.....	53
Figura 21 - Modelo elétrico no ATPDraw com aterramento modelado apenas por um cabo contrapeso de 1m associado a uma haste.....	54
Figura 22 - Tensões nos isoladores com 1m de cabo contrapeso e uma haste de 5/8’’x2,4m	54
Figura 23 - Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 1m com e sem haste de aterramento de 5/8’’x2,4m.	55
Figura 24 - Tensões nos isoladores com 10m de cabo contrapeso e haste de aterramento.	56
Figura 25 - Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 10m com e sem haste de aterramento de 5/8’’x2,4m.	56
Figura 26 - Representação gráfica da topologia de aterramento com um cabo contrapeso sem haste associada	57
Figura 27 - Tensões nos isoladores com 20m de cabo contrapeso.....	57
Figura 28 - Representação gráfica da topologia de aterramento com dois cabos de aterramento.....	58
Figura 29 - Tensões nos isoladores com dois cabos contrapeso de 10m.....	59
Figura 30 - Tensões nos isoladores com dois cabos contrapeso de 20m.....	59
Figura 31 - Comparação dos comportamentos das diversas topologias testadas para o Caso 1.....	60
Figura 32 - Representação gráfica da topologia de aterramento com quatro cabos de aterramento.....	61
Figura 33 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 10m no Caso 2... ..	62
Figura 34 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 20m no Caso 2... ..	62
Figura 35 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 2. .	63
Figura 36 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 10m no Caso 3... ..	64
Figura 37 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 20m no Caso 3... ..	64
Figura 38 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 3. .	65
Figura 39 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 30m no Caso 4... ..	66
Figura 40 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 40m no Caso 4... ..	66
Figura 41 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 4. .	67
Figura 42 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 35m no Caso 5... ..	68
Figura 43 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 45m no Caso 5... ..	68

Figura 44 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 5. .	69
Figura 45 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 60m no Caso 6. .	70
Figura 46 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 80m no Caso 6. .	70
Figura 47 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 100m no Caso 6. .	71
Figura 48 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 6. .	72
Figura 49 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para $\rho = 500\Omega\text{m}$	74
Figura 50 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para $\rho = 1000\Omega\text{m}$	75
Figura 51 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para $\rho = 2500\Omega\text{m}$	76
Figura 52 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para a Corrente Mediana.	77
Figura 53 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para a Corrente Crítica.	78
Figura 54 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $Z_{\text{ater}} = 0\Omega$)	80

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros das correntes de descarga utilizadas.....	46
Tabela 2 - Dados elétricos e mecânicos dos cabos.....	48
Tabela 3 - Resumo dos resultados para todos os casos estudados.....	73
Tabela 4 - Resumo da influência de diversos fatores na amplitude da sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores da linha.	79

Lista de Abreviaturas

A	Ampères
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transients Program
BRASILDAT	Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas atmosféricas
CC	Corrente contínua
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
kA	Quiloampères
km	Quilômetro
kV	Quilovolt
LT	Linha de Transmissão
m	Metro
µs	Microsegundo
MV	Megavolt
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBI	Nível Básico de Isolamento
V	Volt

Sumário

Agradecimentos	5
Resumo	6
Abstract.....	7
Lista de Ilustrações	8
Lista de Tabelas	11
Lista de Abreviaturas.....	12
Sumário.....	13
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA	16
1.2. OBJETIVO GERAL	18
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4. JUSTIFICATIVA.....	19
1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. A DESCARGA ATMOSFÉRICA	22
2.2. FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	23
2.3. PARÂMETROS RELACIONADOS À DESCARGA ATMOSFÉRICA	24
2.3.1. Parâmetros relativos à frequência de incidência geográfica	24
2.3.2. Parâmetros da corrente de descarga.....	25
2.4. CARACTERÍSTICAS DOS DESLIGAMENTOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	26
2.4.1. Incidência indireta.....	27
2.4.2. Incidência direta.....	28
2.5. SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	31
2.5.1. Aspectos gerais	31
2.5.2. Comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas.....	32

3.	MODELAGEM DOS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NO ESTUDO.....	36
3.1.	CORRENTE DA DESCARGA ATMOSFÉRICA	37
3.2.	TORRES DE TRANSMISSÃO	38
3.3.	LINHA DE TRANSMISSÃO.....	39
3.4.	SISTEMA DE ATERRAMENTO	40
3.4.1.	Modelo da haste de aterramento	41
3.4.1.	Modelo do cabo de aterramento ou contrapeso	42
4.	METODOLOGIA E PARÂMETROS UTILIZADOS	45
5.	RESULTADOS.....	49
5.1.	CASO 1: CORRENTE DE DESCARGA MEDIANA (Tabela 1) E $\rho = 500 \Omega \cdot m$	49
5.2.	CASO 2: CORRENTE DE DESCARGA CRÍTICA (Tabela 1) E $\rho = 500 \Omega \cdot m$.	61
5.3.	CASO 3: CORRENTE DE DESCARGA MEDIANA (Tabela 1) E $\rho = 1000 \Omega \cdot m$	63
5.4.	CASO 4: CORRENTE DE DESCARGA CRÍTICA (Tabela 1) E $\rho = 1000 \Omega \cdot m$	65
5.5.	CASO 5: CORRENTE DE DESCARGA MEDIANA (Tabela 1) E $\rho = 2500 \Omega \cdot m$	67
5.6.	CASO 6: CORRENTE DE DESCARGA CRÍTICA (Tabela 1) E $\rho = 2500 \Omega \cdot m$	69
5.7.	SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS	72
5.7.1.	Sumarização das curvas com iguais resistividades do solo	74
5.7.2.	Sumarização das curvas com iguais correntes de descarga	77
5.8.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
5.8.1.	Fatores de influência na amplitude da sobretensão resultante	80
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
6.1.	CONCLUSÕES.....	84
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	ANEXO A – DISPOSITIVOS, PARÂMETROS E CIRCUITOS UTILIZADOS NO ATP	93
I.	Fonte de tensão trifásica (138 kV AC).....	94
II.	Linha de Transmissão (Vão entre torres)	95
III.	Impedância de Surto do Trecho da Torre (Trecho Topo da Torre -> Fase A).....	96
IV.	Fonte de Corrente da Descarga Elétrica.....	97

V. Célula de Cabo Contrapeso (exemplo com $l = 1\text{m}$)	98
VI. Haste de Aterramento (exemplo $5/8'' \times 2,4\text{m}$)	100
APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NOS ANAIS DO II CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS	101
APÊNDICE B – ARTIGO ACEITO NA XII CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	105

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

De acordo com o balanço energético nacional, feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz de geração de energia elétrica brasileira é formada principalmente por fontes hidráulicas (EPE, 2016). Essa energia é gerada em usinas hidrelétricas, que em sua maioria são localizadas a uma distância considerável dos grandes centros consumidores. Dessa forma, o transporte da energia gerada constitui um aspecto fundamental para o atendimento da demanda no país.

O transporte de energia elétrica envolve diversos tipos de instalações e equipamentos, e dentre estes, destacam-se as linhas de transmissão. Para que a qualidade da energia elétrica transportada não seja comprometida, devem ser considerados diversos fatores, desde a fase de projeto até a operação da linha. Desse modo, há uma constante preocupação por parte das concessionárias em atender aos requisitos de continuidade de serviço.

Em geral, tais linhas apresentam grande extensão e alturas consideráveis, o que reflete num alto grau de exposição para a incidência direta de descargas atmosféricas. Os comportamentos associados a esse fenômeno compõem um tópico de importância ressaltada para o setor elétrico, especialmente em termos do desempenho de seus componentes. Nesse contexto, o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é essencial para se avaliar a qualidade do serviço prestado. Esse desempenho é definido por um índice que quantifica o número de desligamentos ao longo de um comprimento de 100 km da linha no período de um ano.

Além disso, conforme estudos do INPE, feitos a partir das observações efetuadas por satélites da NASA em conjunto com os dados da BRASILDAT, o Brasil, que já possui a maior incidência de descargas atmosféricas do mundo (cerca de 60 milhões por ano), deverá ter acréscimo de 18% desse valor, causado pelo aquecimento global, aumentando ainda mais a exposição dessas linhas de transmissão aos surtos de origem atmosférica.

Os desligamentos de linhas de transmissão ocasionadas por incidência direta de descargas atmosféricas se devem primordialmente a dois fenômenos: descarga disruptiva no isolamento – do inglês, *flashover* – e descarga disruptiva de retorno – do inglês, *backflashover* (KINDERMANN, 1992).

O flashover pode ocorrer quando uma descarga atmosférica atinge diretamente um condutor energizado da linha de transmissão. Associada à onda de corrente, também se propaga ao longo do condutor uma onda de tensão com elevada amplitude. Caso essa sobretensão exceda a suportabilidade da cadeia de isoladores que separa o condutor fase da torre aterrada, pode ocorrer uma descarga disruptiva com a eventual formação de um arco elétrico entre o condutor energizado à torre. Através deste arco, a corrente da descarga é drenada para a estrutura e flui em direção ao solo. Caso o arco não se extinga, haverá o fluxo da corrente de frequência industrial do condutor para o solo. Nessa situação, fica caracterizado o curto-circuito fase-terra, o qual pode levar ao desligamento da linha (D'AJUZ, 1987).

Com o objetivo de minimizar a ocorrência da incidência direta de descargas atmosféricas sobre alguma das fases, as linhas de transmissão normalmente são protegidas por cabos para-raios posicionados acima dos condutores energizados. Esses cabos podem interceptar uma descarga que atingiria uma das fases e direcionar a corrente para o solo através da impedância de surto da torre e da impedância de aterramento.

Na incidência de uma descarga atmosférica nos cabos guarda, as ondas de tensão e de corrente que se propagam em direção à torre e posteriormente ao longo desta em direção ao solo sofrem reflexão no aterramento. Essa reflexão colabora para a redução do valor máximo das sobretensões a que são submetidas as cadeias de isoladores caso o valor da impedância de aterramento seja suficientemente baixo.

Porém, mesmo as linhas protegidas por cabos para-raios podem sofrer desligamentos decorrentes de descargas atmosféricas. A depender da amplitude da corrente de retorno e da disposição dos cabos de blindagem, a descarga pode incidir nos condutores energizados mais expostos. Essa ocorrência é conhecida como falha de blindagem e pode resultar em um *flashover*.

Sob outra perspectiva, em situações em que a amplitude da corrente de descarga for elevada e o valor de impedância de aterramento não for suficientemente baixo, mesmo com a interceptação da descarga pelos cabos para-raios, a sobretensão submetida às cadeias de isoladores pode alcançar um elevado valor de pico e resultar em uma descarga disruptiva com o estabelecimento de um arco elétrico da estrutura aterrada para o condutor energizado. Nesse caso, configura-se um *backflashover* (VISACRO FILHO, 2005).

1.2.OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é estudar a eficiência de diferentes configurações de sistemas de aterramento em linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas para redução dos desligamentos causados pelo fenômeno da descarga disruptiva de retorno, ou *backflashover*.

1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desse trabalho:

- Desenvolver uma ferramenta teórico-computacional, utilizando o ATP (Alternative Transients Program), para simular a incidência de uma descarga atmosférica direta em uma linha de transmissão;
- Estudar e implementar os modelos matemáticos de todos os elementos envolvidos na simulação do fenômeno e avaliar se a resposta da associação deles é fisicamente consistente;
- Avaliar a resposta transitória do sistema de aterramento da linha de transmissão a partir de diferentes configurações desse sistema, de acordo com as sobretensões nas cadeias de isoladores da linha de transmissão decorrentes de descargas atmosféricas;
- Analisar a sensibilidade da resposta das diversas configurações do sistema de aterramento, variando dois parâmetros notadamente relevantes nos resultados para o estudo em questão, que são a corrente de descarga atmosférica e a resistividade do solo;
- Dimensionar os sistemas de aterramento de acordo com os parâmetros utilizados nas simulações para reduzir as ocorrências de desligamento por descarga disruptiva de retorno, ou *backflashover*.

1.4.JUSTIFICATIVA

No caso do Brasil, devido a possuir valor médio de resistividade do solo elevado, em torno de $1.000 \Omega.m$ (LIMA, 2010), o projeto e construção de malhas de aterramento em linhas de transmissão que garantam um bom desempenho do sistema, se torna fator primordial. Dessa forma, os sistemas de aterramento apresentam fundamental relevância no que tange a sua influência no desempenho do sistema aterrado e proteção humana.

Às descargas atmosféricas estão associadas grandes correntes elétricas, e quando ocorre a incidência de um raio em uma linha de transmissão, a corrente proveniente dele deve fluir eficientemente para terra através do sistema de aterramento. Esta eficiência se relaciona não unicamente com a rapidez, mas também com o mínimo de interferência nos arredores do sistema de aterramento. A referida eficiência pode ser obtida por meio de práticas adequadas de aterramento, que exigem um apurado conhecimento do comportamento eletromagnético transitório do aterramento.

Das exposições dos parágrafos anteriores surgem diversos desdobramentos relacionados à avaliação do comportamento e estimativa da resposta transitória do aterramento frente à incidência de descargas atmosféricas. Estas avaliações podem ser obtidas por meio de uma ferramenta que possa simular o sistema elétrico, a partir de diversos modelos matemáticos que representem de forma fisicamente consistente todos os elementos de um sistema elétrico real sob o efeito do fenômeno transitório.

A partir do que foi apresentado inicialmente, percebe-se a relevância do tema a ser investigado: modelagem de aterramentos elétricos em linhas de transmissão e avaliação de sua resposta frente a descargas atmosféricas. Pretende-se gerar uma contribuição que subsidie a investigação do comportamento transitório do aterramento em altas frequências e na definição de técnicas e soluções de proteção contra descargas atmosféricas.

1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos e encontra-se com uma distribuição de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, realiza-se revisão bibliográfica e apresenta-se aspectos básicos sobre as descargas atmosféricas, tais como: definição do fenômeno físico, formação das descargas, parâmetros de incidência e parâmetros da corrente de descarga. Além disso, também são tipificados os desligamentos em linhas de transmissão ocasionados por incidências de descargas atmosféricas. Por fim também são apresentados aspectos quanto aos sistemas de aterramento em torres de transmissão, com ênfase no comportamento em relação a solicitações impulsivas.
- No Capítulo 3, expõem-se detalhadamente as modelagens de todos os elementos (descarga atmosférica, torre de transmissão, linha de transmissão, sistemas de aterramento) envolvidos nos estudos e avaliações a serem feitas a partir das simulações computacionais, realizadas no Alternative Transients Program (ATP), do fenômeno alvo.
- No Capítulo 4, mostra-se a metodologia que será utilizada na implementação do circuito que será utilizado nas simulações, além do próprio circuito proposto que foi simulado no ATP. Além disso, são definidos os valores dos parâmetros que serão empregados nas simulações, estas que possuem o objetivo de avaliar a eficiência e dimensionar os sistemas de aterramento na redução da ocorrência do fenômeno de *backflashover*.
- No capítulo 5 são apresentados os resultados de todos os estudos de caso, com as respectivas análises, oriundos da implementação computacional do circuito apresentado no capítulo 4. É feita a avaliação da eficiência e dimensionamento dos sistemas de aterramento baseado na resposta transitória das sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores da

linha de transmissão quando submetidos a uma onda representativa para uma descarga atmosférica. Os arranjos dos sistemas de aterramento foram simulados sempre até alcançarem um valor suficiente para proteção da linha quanto a descarga disruptiva de retorno. Além disso, são apresentados todos os resultados sumarizados em formato de tabela e agrupados por características comuns. Também são apresentados os referenciais teóricos que explicam a influência na variação dos parâmetros utilizados nas simulações em relação aos resultados encontrados.

- No Capítulo 6, são expostas as conclusões da dissertação e as recomendações para trabalhos futuros que poderão apoiar-se nos resultados obtidos e ampliar sua gama de aplicações.

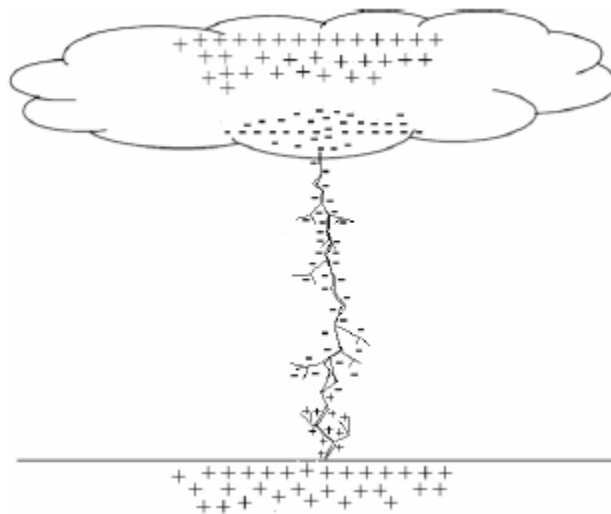
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre descargas atmosféricas, linhas de transmissão atingidas por surtos de tensão atmosférica e sistemas de aterramento em linhas de transmissão, inclusive seu comportamento sob condições impulsivas.

2.1. A DESCARGA ATMOSFÉRICA

A descarga atmosférica, também conhecida como raio, consiste numa intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Trata-se de um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra, como (Figura 1) (UMAN, 1987).

Figura 1 - Representação esquemática de uma descarga atmosférica



Fonte: Pinheiro (2008, p. 18)

Desde os tempos mais antigos, as descargas atmosféricas são motivo de curiosidade e medo pela sua grandeza e sua capacidade de causar danos e mortes. No princípio das civilizações, como não havia uma explicação científica plausível, as descargas eram associadas aos deuses.

Essas e outras superstições permaneceram por muito tempo até as experiências e estudos de cientistas a exemplo de Benjamim Franklin e outros, no século XVIII, os quais evidenciaram a natureza elétrica dos raios. A partir desses, verificou-se que as descargas atmosféricas nada mais são que intensas transferências de cargas elétricas oriundas de nuvens carregadas eletricamente (VISACRO FILHO, 2005).

2.2.FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para entender a formação desses raios, é indispensável conhecer a dinâmica elétrica e magnética do planeta. Pesquisas recentes atestam valores de 100 a 200 V/m para campos elétricos e 23 a 46 A/m para campos magnéticos ao nível do solo em condições de bom tempo. Em consequência disso, há sempre uma pequena eletrificação da atmosfera terrestre em função de um carregamento negativo da terra e um carregamento positivo do ar, o que resulta numa distribuição de carga que acarreta o aparecimento desses campos elétricos verticais (RAKOV e UMAN, 2003).

Em virtude do campo elétrico gerado, há um fluxo constante de corrente elétrica entre a atmosfera e o solo, cuja magnitude e distribuição são motivadas pela dinâmica físico-química desta, relacionada à condutividade e densidade de cargas existentes nas suas diversas camadas, tendo um valor máximo para a camada superior entre 95 a 1000 km de altitude, denominada Ionosfera, e um valor mínimo para a camada até 2 km de altitude, a Biosfera (RAKOV, 2013).

As nuvens carregadas que exercem o papel de fontes geradoras para o circuito global possuem um método muito complexo para o seu carregamento. Esse método, que é baseado nas transformações físico-químicas e dinâmicas secundadas por movimentos de convecção ascendentes de cargas positivas e descendentes de cargas negativas que ocorrem no interior das nuvens, ainda não é inteiramente esclarecido pela literatura científica, dadas as naturais dificuldades de investigação existentes, havendo várias teorias para a sua explicação mais detalhada. Mas o que se compreende, de maneira simplificada, é que as nuvens carregadas se comportam como um imenso capacitor onde, na sua parte superior, há um acúmulo de cargas positivas e, na parte inferior, há um acúmulo de cargas negativas, separadas por uma grande camada de ar, em torno de 10 km, com uma condutividade muito reduzida (HEILMANN, SCHNEIDER JR e SCHNEIDER, 2012).

Com a acumulação de cargas negativas na parte inferior das nuvens, há, conseqüentemente, indução de cargas positivas no solo, o que produz um acentuado campo elétrico vertical no sentido solo-nuvem. Dependendo da intensidade e do comportamento da rigidez dielétrica do ar, pode-se iniciar um processo físico de liberação de elétrons dos orbitais mais externos (camada de valência) dos átomos dos gases que compõem o ar, dando origem a uma descarga elétrica (GOLDE, 1977).

As primeiras descargas elétricas que se constituem em singularidades espaciais da camada inferior da nuvem produzem um primeiro canal ionizado de plasma com algumas dezenas de metros, o qual é alimentado pelas cargas negativas da nuvem que funcionam como um gigantesco reservatório de cargas para suprir as descargas, resultando em mais descargas subseqüentes. E devido à repulsão dos elétrons que fluem, à atração do solo da terra carregada positivamente por indução e ao poder das pontas existente na extremidade do canal, este vai se alongando e é impelido em direção ao solo gradativamente. À medida que esse canal de plasma carregado negativamente, denominado canal descendente, se aproxima do solo, um canal ascendente formado por partículas positivas vai se formando a poucos metros do solo e se direcionando ao canal descendente até ocorrer uma descarga de interligação entre os dois canais, configurando-se a descarga atmosférica (VISACRO FILHO, 2005).

2.3. PARÂMETROS RELACIONADOS À DESCARGA ATMOSFÉRICA

2.3.1. Parâmetros relativos à frequência de incidência geográfica

Para avaliação do desempenho de sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas é de fundamental importância o conhecimento da frequência de solicitação do local pelo fenômeno. O parâmetro que quantifica essa frequência é a densidade de descargas local (N_g). É altamente recomendável que a medição desse parâmetro, definido como o número médio anual de descargas para terra por km^2 em uma determinada região, seja feita diretamente, através de aparelhos ou sistemas projetados para essa finalidade. Entretanto, quando N_g não é conhecida, é procedimento usual relacioná-la com o nível

ceráunico da região (N_c), definido como o número de dias que ocorrem trovoadas por ano, através da equação (VISACRO FILHO, 2005) (HILEMAN, 1999) (KING, 2004):

$$N_g = 0,04 \cdot N_c^{1,25} \quad (1)$$

Além deste, outro parâmetro importante é o número de descargas que atingem uma LT por 100 km por ano (N_L), que é definido pela seguinte expressão:

$$N_L = \frac{N_g}{10} \cdot (4h^{1,09} + b) \quad (2)$$

Onde:

N_g é o número de descargas por km^2 por ano

h é a altura média dos cabos guardas (m)

b é o espaçamento horizontal entre os cabos-guarda (m), caso haja mais do que um cabo guarda.

2.3.2. Parâmetros da corrente de descarga

Os parâmetros de maior influência no desempenho de uma linha são a intensidade da corrente e o tempo de frente de onda, quando se analisa a incidência de descargas diretamente nas torres ou nos cabos para-raios (BAZELYAN e RAIZER, 2000).

A intensidade da corrente determina a amplitude das sobretensões desenvolvidas e desta forma, os níveis máximos de solicitação impostos pela corrente da descarga aos componentes do sistema. Isto torna este parâmetro o mais crítico para dimensionamento das características de projeto da linha (CUNHA, 2010).

Com base em medições realizadas em diversos países verificou-se que a probabilidade $P(I)$ de que a corrente de uma descarga atinja amplitude superior a certo valor I (em quiloampères) pode ser estimada pela expressão (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 1982):

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (3)$$

Com $2 \text{ kA} < I < 200 \text{ kA}$.

O tempo de frente de onda da corrente de descarga corresponde, de forma simplificada, ao intervalo de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do primeiro pico da onda (KINDERMANN, 1992).

Para os sistemas elétricos de potência, esse é um dos parâmetros da onda de corrente mais importantes, uma vez que a suportabilidade quanto às sobretensões depende significativamente da inclinação da frente de onda. Dessa forma, a partir de várias medições efetuadas para o tempo de frente de onda, foi possível a obtenção da distribuição estatística da taxa de crescimento de uma corrente de descarga ser superior a uma certa taxa considerada, conforme equação abaixo (ZANETTA JÚNIOR, 2003), (VIANA, 2009):

$$P(dI) = \frac{1}{1 + \left(\frac{dI}{dt} \cdot \frac{1}{24}\right)^4} \quad (4)$$

Onde $P(dI)$ é a probabilidade de a taxa de crescimento do raio ser excedida.

2.4. CARACTERÍSTICAS DOS DESLIGAMENTOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Ter ciência das características dos desligamentos das linhas de transmissão de energia elétrica ocasionados por descargas atmosféricas possibilita eleger e implantar procedimentos mais eficazes na busca pela melhoria contínua do desempenho destas linhas de transmissão.

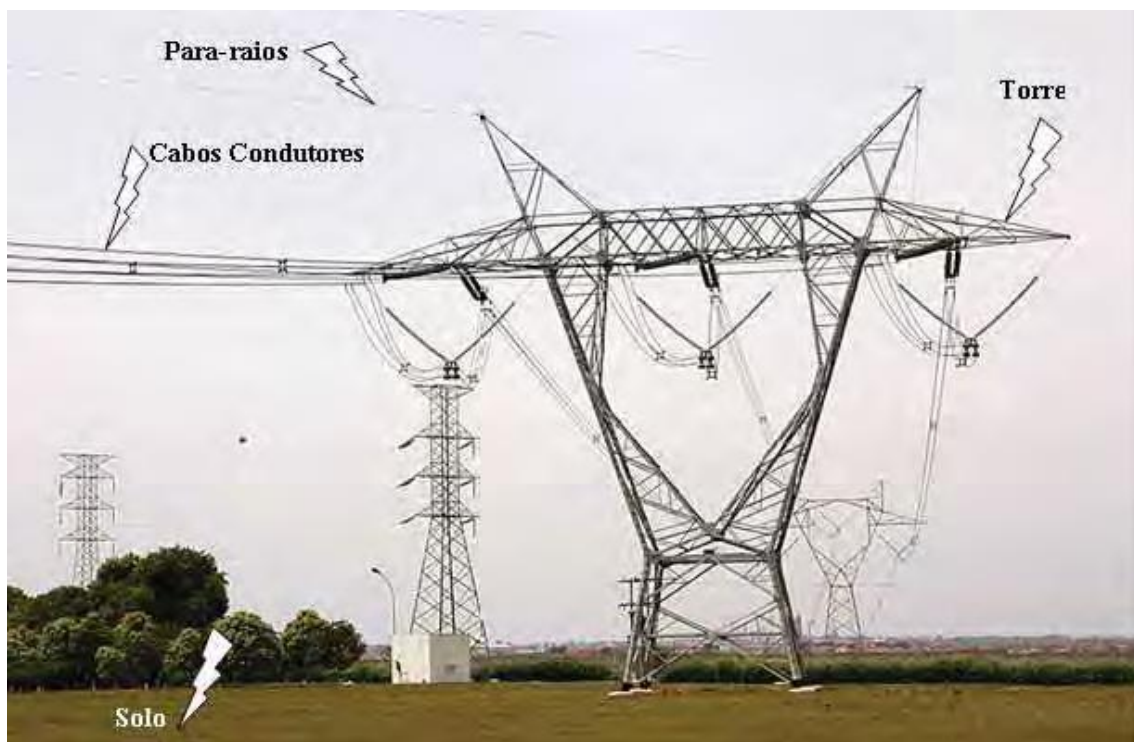
Os indicadores que expressam o desempenho de linhas de transmissão, em termos da qualidade da energia elétrica entregue às cargas consumidoras, consideram o tempo de duração e a frequência de desligamentos em cada linha de transmissão.

Pode-se descrever descarga atmosférica como um fenômeno transitório e aleatório, que ocorre na atmosfera e tem como princípio uma nuvem de tempestade que se expressa, em seu estágio final, através de um fluxo de corrente impulsiva com grande amplitude em um rápido intervalo de tempo através de um percurso constituído pelo canal de descarga. Apesar de existirem diversos tipos de descargas atmosféricas nuvem-solo, a de maior relevância em proteção de linhas de transmissão são as descargas negativas

descendentes, que constituem cerca de 81% do total que atinge o solo, sendo que estas descargas podem ser as descargas negativas únicas e as múltiplas (VISACRO et al., 2004).

Em linhas de transmissão as descargas atmosféricas podem incidir de maneira indireta, ou seja, quando atingem o solo próximo da linha de transmissão; ou direta, quando estas atingem diretamente as torres, cabos condutores ou para-raios, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Descargas atmosféricas atingindo direta e indiretamente a Linha de Transmissão



Fonte: Berardo (2012, p. 29)

2.4.1. Incidência indireta

Quando uma descarga atmosférica atinge as proximidades de uma linha de transmissão ou distribuição e causa seu desligamento, classifica-se descarga por incidência indireta, conhecida também como tensão induzida ao longo de seu percurso. Nestas linhas, também acompanhada à onda de tensão induzida, existe uma onda de corrente que percorre os condutores energizados da linha de transmissão. Dois aspectos

podem influenciar na intensidade da tensão induzida por correntes de descargas atmosféricas: as características da onda de corrente (o tempo de frente e o valor de pico), e a distância do ponto de incidência até a linha de transmissão (SILVA, 2007).

A existência de cargas ao longo do canal isoladamente já seria capaz de gerar um campo elétrico estático. Com o início do fluxo de cargas durante a descarga deste canal, têm-se a presença de uma corrente associada e, conseqüentemente, um campo magnético concomitante com o campo elétrico. Como a variação de corrente ao longo do canal é bem acentuada, este fenômeno gera a irradiação de campo eletromagnético e a conseqüente superposição destes fenômenos é responsável pela tensão induzida (MASTER e UMAN, 1983).

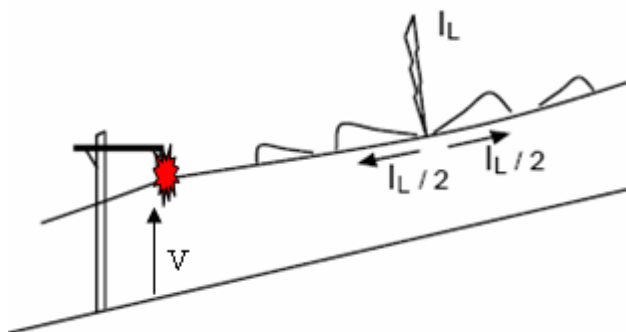
As linhas de distribuição são mais sensíveis a esse tipo de ocorrência pois como possuem classe de tensão menor, são mais facilmente afetadas por essas tensões induzidas.

2.4.2. Incidência direta

2.4.2.1. *Flashover*

O *Flashover* ou Descarga Disruptiva Direta é a falha no isolamento que pode ser relacionada à incidência de uma descarga atmosférica em um cabo condutor energizado de uma linha de transmissão. Este tipo de incidência pode ocorrer em linhas de transmissão que não possuam cabos para-raios dispostos adequadamente ou para incidências laterais, caso haja falha na blindagem, conforme representado na Figura 3 (CUNHA, 2010).

Figura 3 - Ruptura de isolamento por *flashover*



Nas situações em que ocorrem este tipo de incidência de descarga têm-se o estabelecimento de elevados níveis de sobretensão entre os condutores energizados da linha de transmissão e a terra.

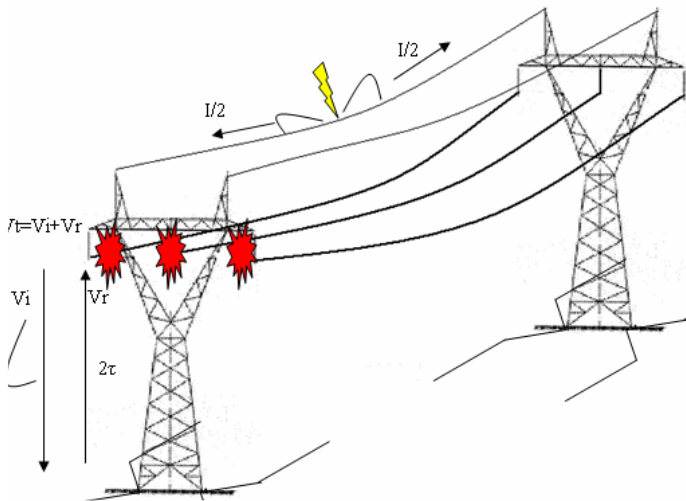
Na maior parte dos casos, o valor da sobretensão ao qual é submetido a cadeia de isoladores é suficiente para causar o rompimento do isolamento da linha de transmissão e estabelecer um arco elétrico (*flashover*) que liga o condutor energizado à torre aterrada. Este arco geralmente possui característica superficial, através do ar nas proximidades do isolador, e em alguns casos pode danificar um ou mais isoladores da cadeia. A manutenção deste arco configura um curto-circuito entre os condutores energizados e à terra, desta forma o sistema de proteção é sensibilizado por este fluxo de corrente, comandando o desligamento da linha de transmissão. (VISACRO FILHO, 2005)

A estratégia mais usada na prevenção contra o *flashover* é a instalação de cabos para-raios dispostos acima dos condutores energizados (fases). Conhecidos também como cabos de blindagem de uma linha de transmissão, os cabos para-raios são diretamente ligados às torres aterradas ao solo através do sistema de aterramento (VIEMEISTER, 1972).

2.4.2.1. *Backflashover*

Mesmo com a instalação dos cabos de blindagem, ainda existe a possibilidade de haver falha no isolamento quando uma descarga atmosférica atinge os condutores de blindagem ou o topo da torre, como pode-se observar da Figura 4, esse fenômeno é conhecido como descarga disruptiva de retorno ou *Backflashover* (CUNHA, 2010).

Figura 4 - Ruptura de isolamento por *backflashover*



Fonte: Cunha (2010, p. 10)

Ao atingir o cabo de blindagem, uma descarga atmosférica provoca surtos de tensão e corrente que se propagam em ambas as direções. Ao alcançar a primeira torre aterrada, as ondas se dividem em componentes, uma delas é refletida, outra é transmitida e outra parcela percorre a torre em direção ao solo. Quando a onda de sobretensão atinge o solo, ocorre outra reflexão devido à diferença de impedância da torre (Z_t) e a impedância de aterramento (Z_g). O coeficiente de reflexão na base da torre (Γ) é dado por (VISACRO FILHO, 2005):

$$\Gamma = \frac{Z_g - Z_t}{Z_g + Z_t} \quad (5)$$

A onda de tensão refletida pelo solo irá ser somada àquela que se estabeleceu sobre a cadeia de isoladores. Porém, essas duas ondas de tensão apresentam, em geral, polaridades opostas, de sorte que quanto maior a amplitude da tensão refletida, menor será a tensão total na cadeia. Como a amplitude da tensão refletida aumenta conforme diminui o valor da impedância de aterramento, conclui-se que quanto menor o valor desta, menor o número de interrupções da linha devido à *backflashovers* (VISACRO FILHO, 2005; HASBROUCK, 1989).

Portanto, a impedância de aterramento das torres é uma das variáveis que mais afetam o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas, assim sendo, deve-se sempre projetá-las para limitar seu valor ao mínimo possível e viável.

2.5.SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.5.1. Aspectos gerais

Os sistemas de aterramento de uma linha de transmissão são compostos pelos cabos para-raios, pelo aterramento dos pés de torres e pela interligação com a malha de terra das subestações. O aterramento dos pés das torres pode ser formado por hastes de aterramento e/ou cabos enterrados no solo, os quais são nomeados de contrapeso. A resistividade do solo é uma das principais variáveis que influenciam no dimensionamento do sistema de aterramento de uma linha de transmissão para que este seja eficiente em proteger a linha, sendo este influenciado pelos seguintes fatores: tipo de solo, temperatura, teor de umidade, concentração dos sais da água retida, estratificação e compactação do solo e sua composição química (KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

O sistema de aterramento de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica é constituído pelas seguintes partes:

- Todos os componentes metálicos que compõem a torre e que mantêm contato com o solo ou com o concreto das fundações, inclusive vergalhões, grelhas, parafusos, etc.
- Qualquer aparato de aterramento, tais como: hastes de aterramento, anéis horizontais, contrapesos, ou ainda qualquer associação destes que estejam enterrados no solo (KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995; VISACRO FILHO, 2002).

Eletrodos ou hastes de aterramento suplementar podem ser de dois tipos básicos:

- Concentrado (condutor cilíndrico em anel fechado, condutor cilíndrico horizontal, haste vertical no solo).
- Contínuo ou Prolongado: conhecido como contrapeso contínuo, composto de um e, às vezes, de vários condutores cilíndricos contínuos enterrados no solo ao longo da linha de transmissão e conectados nos pés de cada torre (VISACRO FILHO, 2002).

Dentre os principais objetivos de um sistema de aterramento podem-se citar:

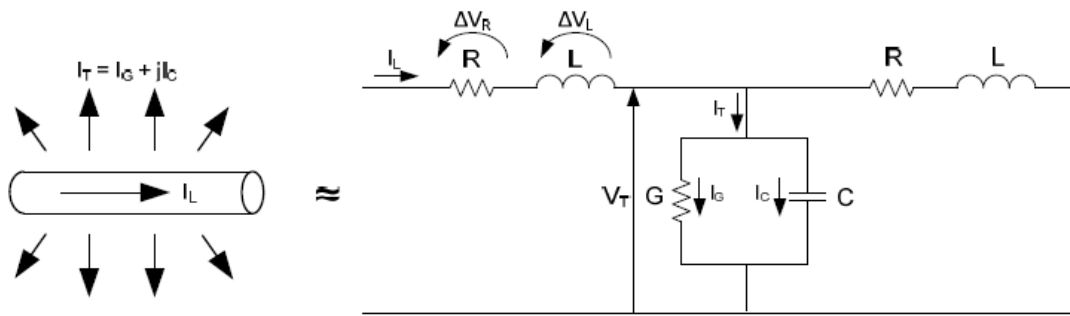
- Tornar a resistência de aterramento mais baixa possível para as correntes provenientes de falta à terra;
- Manter potenciais produzidos por correntes de falta entre valores que não provoquem a fibrilação do coração humano;
- Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e atuem de forma a isolar rapidamente as faltas à terra;
- Propiciar um caminho adequado para escoar à terra correntes de descargas atmosféricas (KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

As torres (suportes) de uma linha de transmissão devem ser aterradas de maneira a tornar a resistência de aterramento compatível com o desempenho desejado e a segurança de terceiros. O aterramento deve se restringir a faixa de segurança da linha de transmissão e não interferir com outras instalações existentes e com atividades desenvolvidas dentro da faixa. Os materiais empregados nos aterramentos devem ser resistentes à corrosão e sua durabilidade no solo deve ser, sempre que possível, compatível com a vida útil da linha de transmissão (ABNT NBR 5422, 1985), normalmente admitida como sendo de 30 anos.

2.5.2. Comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas

Para análise do comportamento do aterramento considera-se que, em geral, uma conexão à terra apresenta efeitos resistivo, capacitivo e indutivo. A Figura 5 ilustra um circuito equivalente que representa estes efeitos para um pequeno segmento ou elemento de um eletrodo de um sistema de aterramento. A corrente neste elemento é composta de duas parcelas: uma corrente transversal I_T que dispersa para o solo e uma corrente longitudinal I_L que é transferida para o restante do eletrodo (VISACRO FILHO, 2002; KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 5 - Componentes de corrente no solo e circuito equivalente do aterramento – adaptada de Visacro (2002).



Fonte: Visacro (2002, p. 13)

A corrente longitudinal está associada às perdas características do condutor e gera um campo magnético interno e em volta dele. Na Figura 5, uma resistência R e uma indutância L em série são responsáveis pelo padrão desses efeitos. Ambos os parâmetros geram uma queda de tensão (ΔV_R e ΔV_L) ao longo do eletrodo quando este é percorrido por uma corrente (VISACRO FILHO, 2002; KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

A corrente transversal está relacionada com a dispersão para o solo de correntes condutiva e capacitiva. A proporção entre essas duas correntes não depende da geometria do eletrodo, mas apenas da frequência característica do fenômeno solicitante e da condutividade e permissividade elétrica do solo. Os efeitos transversais associados a essa corrente de dispersão são modelados na Figura 5 por meio de uma condutância G e uma capacitância C em paralelo (VISACRO FILHO, 2002; KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

A ilustração apresentada na Figura 5 se refere apenas a uma pequena porção do eletrodo. De forma complementar, devem ser considerados os acoplamentos eletromagnéticos próprios e mútuos (capacitivo, condutivo e indutivo) entre os diversos elementos dos eletrodos de aterramento (GRCEV e ARNAUTOVSKI-TOSEVA, 2003). O entendimento do comportamento completo do aterramento demanda a solução de um encadeamento de circuitos similares ao apresentado na Figura 5 conectados de acordo com a geometria do aterramento, incluindo os efeitos mútuos (VISACRO FILHO, 2007). A solução desse intrincado circuito fornece a impedância vista do ponto de injeção de corrente, que reflete à razão entre a elevação de potencial desenvolvida neste ponto em relação ao terra remoto e a corrente de injeção. A impedância como foi definida é calculada para cada frequência característica da onda de corrente injetada e constitui-se um conceito importante. (VISACRO FILHO, 2002)

2.5.2.1. Definição da impedância de aterramento

O sistema de aterramento pode ser definido eletromagneticamente por meio de uma impedância de aterramento. A definição de impedância é amplamente utilizada, entretanto, seu conceito original e limitações merecem ser destacadas. A impedância é originalmente determinada no domínio da frequência para excitações com variação senoidal no tempo e se aplica, geralmente, entre pontos próximos no espaço (GRCEV e ARNAUTOVSKI-TOSEVA, 2003).

No estudo de fenômenos de baixa frequência (50/60 Hz), os efeitos reativos podem ser desprezados. Neste caso, o cálculo aproximado do potencial constante é válido para os eletrodos de aterramento e o circuito equivalente para o aterramento fica reduzido a uma série de condutâncias acopladas. Assim, em baixas frequências, o sistema de aterramento pode ser qualificado eletromagneticamente por meio de uma resistência de aterramento (ALÍPIO, 2006).

Em tais situações, a resistência de aterramento pode ser definida como um caso particular limite da impedância de aterramento, sendo o valor desta para frequência igual a zero. Neste caso a razão entre a elevação de potencial em relação ao infinito V_T desenvolvida no ponto de injeção de corrente e a corrente injetada I_J resulta em um número real, que é a resistência de aterramento R_T (VISACRO FILHO, 2002):

$$R_T = \frac{V_T}{I_J} \quad (6)$$

Porém, via de regra, e especialmente na investigação de fenômenos de alta frequência, o aterramento deve ser representado por uma impedância. No domínio da frequência, para cada frequência específica, uma impedância complexa deve ser precisamente determinada, como a solução do circuito equivalente do aterramento, ou seja:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (7)$$

O valor de $Z(\omega)$ depende da geometria do aterramento e das características eletromagnéticas do solo, mas não da onda de corrente injetada se o sistema é linear.

No domínio do tempo, o comportamento do aterramento sob condições de ondas de corrente impulsivas de alta frequência é normalmente determinado em termos da impedância impulsiva Z_p (ROUSSEAU e GRUET, 2004).

Este parâmetro é definido como a razão entre os picos de tensão e corrente no ponto de injeção. A impedância impulsiva nem sempre é facilmente calculada, tendo em vista que os picos de tensão e corrente via de regra não acontecem simultaneamente. Todavia, é um conceito bastante atrativo numa perspectiva prática, haja vista que a máxima sobretensão resultante no ponto de injeção pode ser determinada simplesmente pela multiplicação do valor do pico de corrente por Z_p . A impedância impulsiva, diversamente do conceito original de impedância no domínio da frequência, depende da forma de onda injetada, com destaque para o tempo de frente da mesma (GRCEV e ARNAUTOVSKI-TOSEVA, 2003).

Clara está a importância fundamental da distinção dos conceitos de impedância e resistência de aterramento no estudo de correntes impulsivas de altas frequências. Um sistema de aterramento efetivo deve apresentar não só uma baixa resistência, mas também uma baixa impedância de forma a garantir a maximização da dissipação de ambos os componentes, de alta e baixa frequência, característicos dos surtos atmosféricos (VISACRO FILHO, 2002).

2.5.2.2. Efeito da propagação no solo

Quando uma corrente impulsiva de alta frequência é injetada no sistema de aterramento, a onda eletromagnética associada ao surto se propaga ao longo do eletrodo. A propagação da onda eletromagnética em um meio com perdas, como é o solo, apresenta dois fenômenos relacionados: atenuação e distorção da onda. O primeiro consiste na redução da amplitude da onda de corrente ao longo do eletrodo. O segundo constitui-se na deformação da onda à medida que se propaga e equivale fisicamente às diferentes velocidades que cada componente de frequência apresenta, e em consequência disso não apresenta uma propagação uniforme. A atenuação aumenta com a frequência e com a condutividade do solo, bem como as perdas. Em conclusão, a onda de corrente que se propaga ao longo do eletrodo de aterramento tem sua amplitude atenuada e sofre deformação com o aumento do tempo de frente ao longo da direção de propagação (ROUSSEAU e GRUET, 2004).

3. MODELAGEM DOS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NO ESTUDO

Neste capítulo são apresentados os modelos considerados no trabalho para a representação de uma linha de transmissão e seu sistema de aterramento em simulações de descargas atmosféricas incidentes. Foi adotada como ferramenta computacional para a modelagem e posterior execução das simulações computacionais o programa computacional Alternative Transients Program (ATP) e sua interface gráfica (ATPDraw), muito utilizados em estudos de transitórios eletromagnéticos.

Complexidades inerentes ao próprio fenômeno das descargas atmosféricas são geralmente encontradas na etapa de modelagem para a execução de estudos direcionados à avaliação da eficiência e dimensionamento dos sistemas de aterramento de linhas de transmissão submetidas a esses fenômenos eletromagnéticos, bem como ao projeto do isolamento, sistemas de blindagem de surtos, etc. Algumas dessas dificuldades são relacionadas a seguir (PORTELA, 1983):

- I. Os fenômenos da descarga apresentam grande complexidade física;
- II. Os parâmetros das descargas possuem grande dispersão e, por esta razão, em muitos estudos pode ser necessário um tratamento desses parâmetros através de distribuições estatísticas; e;
- III. É bastante complexa a propagação das descargas na região próxima à linha e ao longo da linha. Além disso, alguns parâmetros envolvidos com o cálculo variam com a frequência, o que dificulta tratamentos no domínio do tempo.

Com o propósito de implementar os modelos para simulação das descargas atmosféricas foi então imprescindível realizar extensa pesquisa na literatura, de modo a obter um maior embasamento teórico através do conhecimento de trabalhos correlatos, e a partir disso, identificar as possibilidades de aplicação de modelos semelhantes, utilização de parâmetros típicos em alguns casos, entre outros.

Deve-se destacar que a despeito da modelagem apresentada ser testada no trabalho exclusivamente para a linha em análise, a estrutura geral do modelo possibilita, e é esse o objetivo, sua utilização no estudo de LT's com outras configurações, desde que nesses casos sejam realizadas adequações nos modelos individuais, relativas às singularidades

naturais de cada caso, como: diferentes modelos de torre, geometria da linha e aterramento.

São expostos nesse capítulo os modelos individuais empregados para a descarga atmosférica, as torres de transmissão, os cabos da linha de transmissão e sistemas de aterramento. Destaca-se ainda que o principal intuito desse modelo é possibilitar resultados coerentes unindo à praticidade dos modelos individuais empregados, tornando-o aplicável em análises de casos reais de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Servindo assim, como apoio teórico-computacional para estudos preliminares realizados ainda na etapa de projetos de linhas de transmissão, com o objetivo de reduzir as sobretensões causadas por descargas atmosféricas, assim podendo alcançar um melhor desempenho em relação a desligamentos.

3.1. CORRENTE DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

O pesquisador alemão Heidler propôs uma função analítica capaz de representar adequadamente as curvas média ou mediana obtidas a partir dos dados de medição direta de ondas de corrente em torres “instrumentadas” (HEIDLER, 1985), (NUCCI, 2000). Tal curva é muito adotada, sobretudo nas simulações para avaliação dos efeitos gerados pelo fluxo da corrente de retorno.

A curva de Heidler contempla a natureza côncava da onda nos seus instantes iniciais. Também, observa parcialmente o posicionamento adequado da derivada máxima próximo ao pico e tem, ainda, o decaimento de sua amplitude após a ocorrência do pico muito similar àquele das curvas medianas. A curva é obtida através da aplicação de uma expressão analítica, chamada de Função de Heidler. Esta permite o ajuste, de forma independente, da amplitude de corrente, da derivada máxima de corrente e da carga transferida, através da variação das constantes I_0 , τ_1 e τ_2 . A expressão dessa função é apresentada a seguir (VISACRO FILHO, 2005).

$$i_0(t) = \frac{I_p}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (8)$$

onde:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right], \quad (9)$$

e:

I_p = É a amplitude da corrente de descarga atmosférica (kA);

τ_1 = Constante de tempo de frente de onda (μ s);

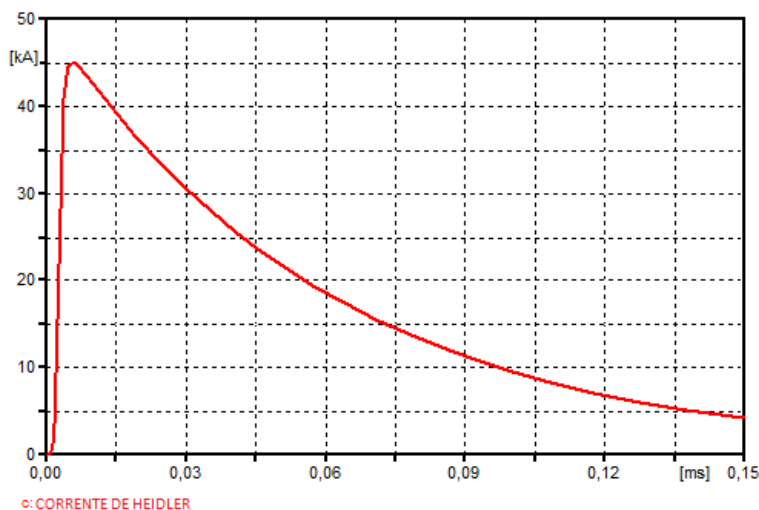
τ_2 = Constante de tempo de decaimento da onda (μ s);

η = Fator de correção da amplitude;

n = Fator de inclinação da corrente.

Para ilustrar o comportamento da função de Heidler, exposta anteriormente, é apresentado um exemplo a partir da Figura 6, cujos valores utilizados foram $I_0 = 45,2$ kA; $\tau_1 = 5,6$ μ s; $\tau_2 = 53,5$ μ s; $\eta = 1$ e $n = 5$. O fator n é estrategicamente escolhido para em função de $\tau_2/\tau_1 \gg 1$, garanta-se o valor de $\eta \approx 1$ (HEIDLER, 1985). Esses mesmos valores dos parâmetros n e η , foram utilizados em todas as simulações deste trabalho.

Figura 6 - Exemplo de forma de onda utilizando a Fórmula de Heidler



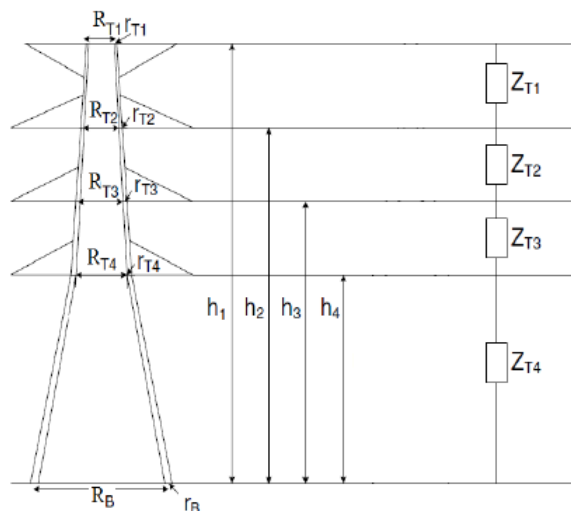
Fonte: Acervo próprio do autor

3.2. TORRES DE TRANSMISSÃO

Nesse modelo a torre de transmissão é composta por linhas curtas sem perdas que representam as pernas, as barras inclinadas e os braços da torre. A exata impedância de cada parte da torre é dada em função das dimensões e geometrias, na qual são baseadas em uma série de experimentos em modelos de escalas reduzidas independentes. Nesse

modelo, a torre de transmissão é dividida em 4 trechos, onde cada trecho é representado por uma linha de transmissão monofásica com um determinado raio equivalente (CHANAKA, SHANTHI e PERERA, 2011; MARTINEZ e CASTRO-ARANDA, 2005; CHISHOLM, CHOW e SRIVASTAVA, 1983).. Em Chanaka, et al. (2011) obteve-se computacionalmente as formas de onda para as tensões nos braços da torre de circuito duplo independente. Essas tensões estão de acordo com as obtidas experimentalmente. Assim os autores propõem uma fórmula empírica para impedância de surto para um condutor vertical de cada trecho da torre. A Figura 7 mostra o modelo por linhas sem perdas.

Figura 7 - Modelo da torre de transmissão por linhas sem perdas, com a representação da impedância de surto por cada trecho. Adaptada de (ARAUJO; KUROKAWA, 2016)



Fonte: Araujo;Kurokawa (2016, p. 4)

3.3.LINHA DE TRANSMISSÃO

É valoroso salientar que a modelagem de fenômenos eletromagnéticos transitórios e outros dispositivos aplicados na distribuição e transmissão de energia elétrica são, em sua grande maioria, modelados no domínio do tempo.

Devido às vantagens da modelagem de linhas no domínio do tempo, são apresentadas as soluções encontradas para as equações diferenciais concebidas no domínio do tempo e uma dessas soluções é o modelo de Bergeron. Um benefício dos modelos encontrados é que podem ser solucionados através de computadores

convencionais, com os quais é possível desenvolver ferramentas de alto poder e versatilidade para simulação de redes arbitrárias com alta confiabilidade (BRANIN, 1967).

Uma solução digital para computadores é inevitavelmente um processo passo a passo que progride ao longo do tempo com um passo Δt constante ou variável, dependendo do método usado. Um dos dilemas é que devido às limitações da forma de trabalho dos computadores digitais, os resultados obtidos não podem dar uma história contínua dos fenômenos transitórios, mas podem dar uma série de imagens em intervalos discretos Δt . Essa discretização do tempo pode causar erros de truncamento que podem levar a instabilidade numérica (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Na técnica de Bergeron, uma fração da história passada é necessária para a resposta do sistema e a regra de integração trapezoidal é utilizada para os parâmetros concentrados, uma vez que apresenta uma alta estabilidade em relação aos outros métodos de integração (DOMMEL, 1969).

O método de Dommel uniu o método de Bergeron e a regra trapezoidal de integração em um algoritmo capaz de solucionar transitórios em redes monofásicas ou polifásicas com parâmetros concentrados e distribuídos. Os modelos de linhas com parâmetros distribuídos apresentam soluções satisfatórias e são utilizados na maioria dos estudos de transitórios em sistemas elétricos. (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

3.4.SISTEMA DE ATERRAMENTO

Consoante ao que já foi exposto, o projeto e dimensionamento do sistema de aterramento são particularmente importantes no Brasil, devido às particularidades do solo, que possui valores (típicos) de resistividade muito elevados se comparados àqueles de outros países. Tais características conferem um destaque particular ao aterramento elétrico, no que tange à sua importância no desempenho do sistema aterrado frente a diversas solicitações. Dentre estas, aquelas provindas da incidência de descargas atmosféricas possuem particular importância (VISACRO *et al.*, 2004).

Nessa perspectiva, é essencial um estudo aprofundado do aterramento, que inclua fundamentalmente dois tópicos: i) análise de sensibilidade para a resposta do aterramento, quando são consideradas faixas típicas das variáveis envolvidas (por exemplo, configuração do aterramento e parâmetros do solo); ii) estimativa do desempenho do

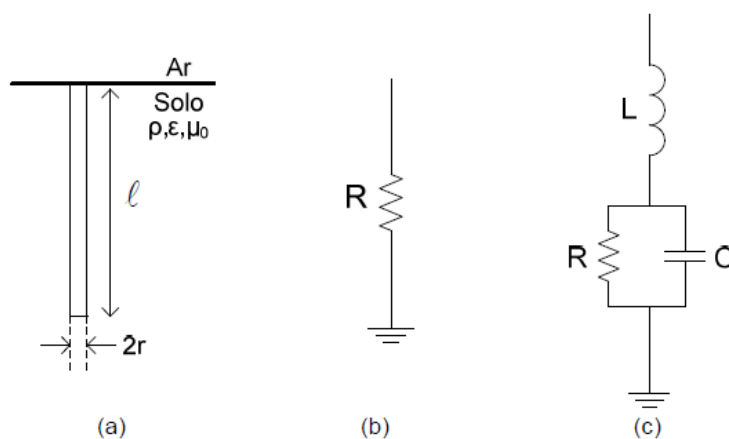
sistema de aterramento quando submetido a solicitações impostas, principalmente aquelas associadas a surtos atmosféricos. A existência de um modelo matemático fisicamente consistente para o sistema de aterramento é um requisito essencial para esse tipo de estudo (GATTANEO, GERI e VECA, 1992).

3.4.1. Modelo da haste de aterramento

O comportamento de hastes verticais de aterramento é bem conhecido em baixas frequências e é, usualmente, analisado a partir de métodos baseados na teoria de circuitos. Contudo, conhecer seu desempenho em altas frequências é imprescindível na incidência de surtos atmosféricos (ALÍPIO, SCHROEDER, *et al.*, 2008).

Neste caso, o valor da impedância do aterramento é um fator de fundamental interesse, dado que, a partir dela, pode-se determinar os níveis máximos de tensão a que o aterramento fica sujeito. Em baixas frequências, essa impedância é habitualmente aproximada por uma resistência de aterramento e a haste modelada por um simples resistor (GRCEV e POPOV, 2005). Já sob altas frequências, contexto em que está inserida a análise objeto desta dissertação, esta é frequentemente modelada por um circuito RLC concentrado (ALÍPIO, SCHROEDER, *et al.*, 2008) (GRCEV e POPOV, 2005). Esses dois modelos são ilustrados na Figura 8.

Figura 8 - (a) Situação física; (b) Circuito equivalente em baixas frequências; (c) Circuito equivalente em altas frequências.



Fonte: Alípio (2008, p. 119)

Os parâmetros R , L e C podem ser calculados a partir das seguintes expressões propostas por Sunde (1949):

$$R = \frac{\rho}{2\pi.l} \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right] \quad (10)$$

$$C = 2\pi.\epsilon.l \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right]^{-1} \quad (11)$$

$$L = \frac{\mu.l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{r} - 1 \right], \quad (12)$$

Em que:

R - É a resistência de aterramento da haste (Ω);

C - É a capacitância da haste (F);

L - É a indutância da haste (H);

l - É o comprimento da haste (m);

r - É raio da haste (m);

μ - É a permeabilidade magnética do solo (considerada igual à do ar) (H/m);

ϵ - É a permissividade elétrica do solo (F/m);

ρ - É a resistividade do solo ($\Omega.m$);

3.4.1. Modelo do cabo de aterramento ou contrapeso

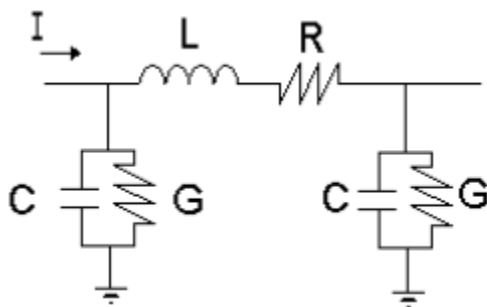
Será utilizada a modelagem por linhas de transmissão nos seus conceitos básicos no caso de um eletrodo horizontal enterrado. Supondo que um eletrodo metálico seja representado através de um circuito composto de um gerador de tensão, ou um gerador de corrente elétrica ou uma descarga atmosférica, conectado diretamente nesse eletrodo pertencente a determinado conjunto de aterramento.

Aos familiarizados com as “equações do telegrafista” (PAUL, 2007) empregadas para estudar as distribuições das tensões e correntes ao longo de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica, não será difícil expandir este conceito aplicando-o ao condutor enterrado, substituindo sua condutância dispersiva pela resistência equivalente de aterramento recíproca, distribuída ao longo do mesmo. Deve-se calcular então os valores numéricos da resistência equivalente, por exemplo, do sistema de aterramento para utilizá-los no cálculo dos parâmetros que serão aplicados na representação por circuitos π em cascata (HATZIARGYROU; LORENTZOU, 1997).

Assim sendo, os eletrodos de aterramento foram modelados por uma série de circuitos pi-nominais, com parâmetros concentrados de resistência, indutância e capacitância, em que cada circuito pi-nominal corresponde a um pequeno segmento do condutor.

Um circuito pi-nominal é mostrado na Figura 9. Os parâmetros R-L-C dos circuitos pi-nominais são derivados das equações abaixo (GATTANEO, GERI e VECA, 1992), baseadas nas já amplamente conhecidas expressões de Sunde (SUNDE, 1949).

Figura 9 - Modelo de uma célula do cabo contrapeso



Fonte: Hatziargyrou & Lorentzou (1997, p. 2)

$$R = \frac{l}{\pi \cdot r^2} \cdot \rho_c \quad (13)$$

$$G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (14)$$

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (15)$$

$$L = \frac{\mu \cdot l}{\alpha} \left[\ln \frac{2l}{\alpha} - 1 \right], \quad (16)$$

Em que:

R - É a resistência do condutor contrapeso (Ω);

G - É a condutância do condutor contrapeso (Ω^{-1});

C - É a capacitância do condutor contrapeso (F);

L - É a indutância do condutor contrapeso (H);

ρ_c - É a resistividade do condutor contrapeso ($\Omega \cdot m$);

ρ - É a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

l - É o comprimento do condutor contrapeso (m);

r - É o raio do condutor contrapeso (m);

α - É $\sqrt{2 \cdot r \cdot h}$ (m);

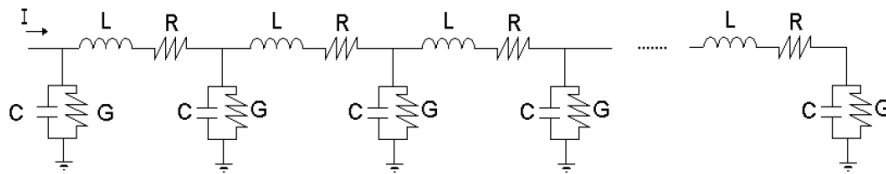
h - É a profundidade em que ficará enterrado o condutor contrapeso (m);

μ - É a permeabilidade magnética do solo (considerada igual à do ar) (H/m);

ε - É a permissividade elétrica do solo (F/m).

A representação generalizada do condutor contrapeso utilizada nos circuitos simulados é modelada por n células idênticas, correspondentes cada uma a um metro do referido condutor, como visto na Figura 10.

Figura 10 - Representação generalizada do condutor contrapeso



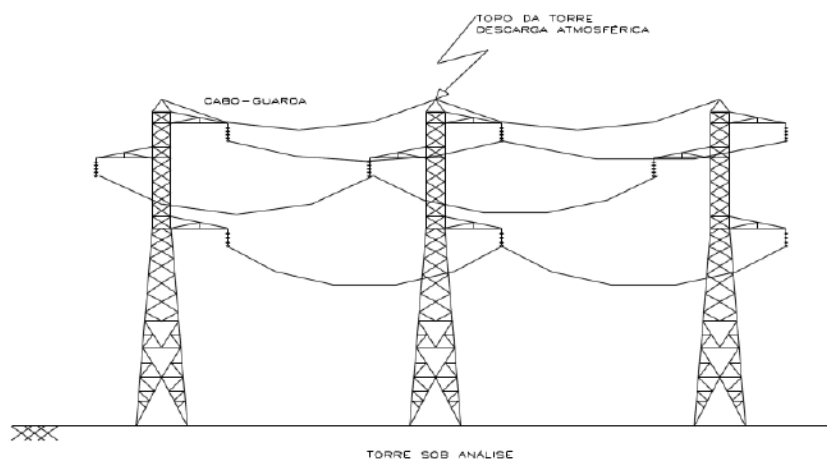
Fonte: Hatziargyrou & Lorentzou (1997, p. 2)

4. METODOLOGIA E PARÂMETROS UTILIZADOS

Foram realizadas simulações de uma parte de linha de transmissão aérea no software ATP utilizando os modelos anteriormente citados com o objetivo de se obter as sobretensões nos isoladores decorrentes da descarga atmosférica e assim analisar a eficiência dos sistemas de aterramento e dimensionar esses sistemas para proteção da linha para o fenômeno de *backflashover* nos casos de interesse.

Na modelagem do circuito elétrico a ser simulado, a descarga atmosférica incide no topo da torre central, considerando também duas torres adjacentes, conforme Figura 11.

Figura 11 - Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica. Situação com uma torre adjacente.



Fonte: Viana (2009, p. 53)

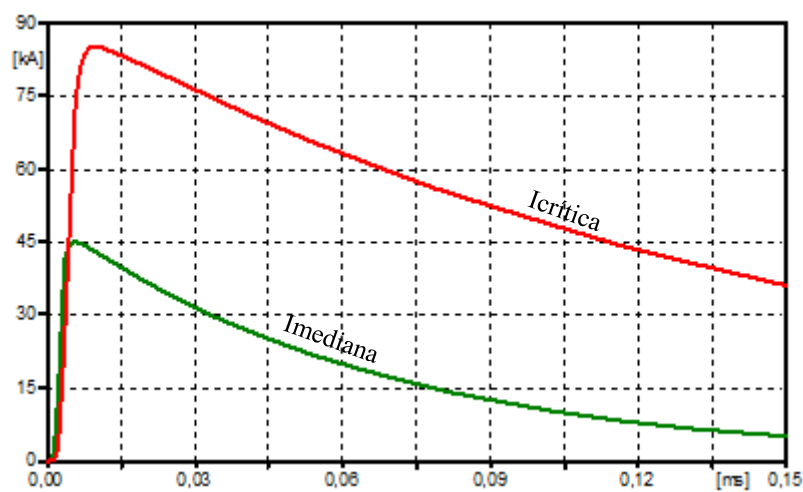
Foram utilizados dois “tipos” de corrente de descarga atmosférica para as diversas simulações, cada um representado por um conjunto de valores para as características da corrente de descarga atmosférica, tais como amplitude da corrente, tempo de frente e tempo de cauda. Os parâmetros utilizados para essas duas “correntes típicas” foram medidos na estação de Morro do Cachimbo-MG (VISACRO *et al.*, 2004), e vale salientar que estas distribuições são específicas para a localidade, não seguindo a equação apresentada em 2.3.2. Em um desses tipos, definido como “corrente mediana”, são utilizadas as especificações das descargas em que os valores dos parâmetros medidos dos raios excederam os valores especificados em 50% dos raios amostrados, enquanto que no

outro, designado de “corrente crítica”, os valores medidos foram maiores em relação aos utilizados em apenas 5% da amostra total. Esses valores estão tabulados logo abaixo na Tabela 1 e expressos graficamente na Figura 12.

Tabela 1 - Parâmetros das correntes de descarga utilizadas

Corrente de Descarga (tipo)	I_p (kA)	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)
Mediana	45,3	5,6	53,5
Crítica	85,2	9,9	145,2

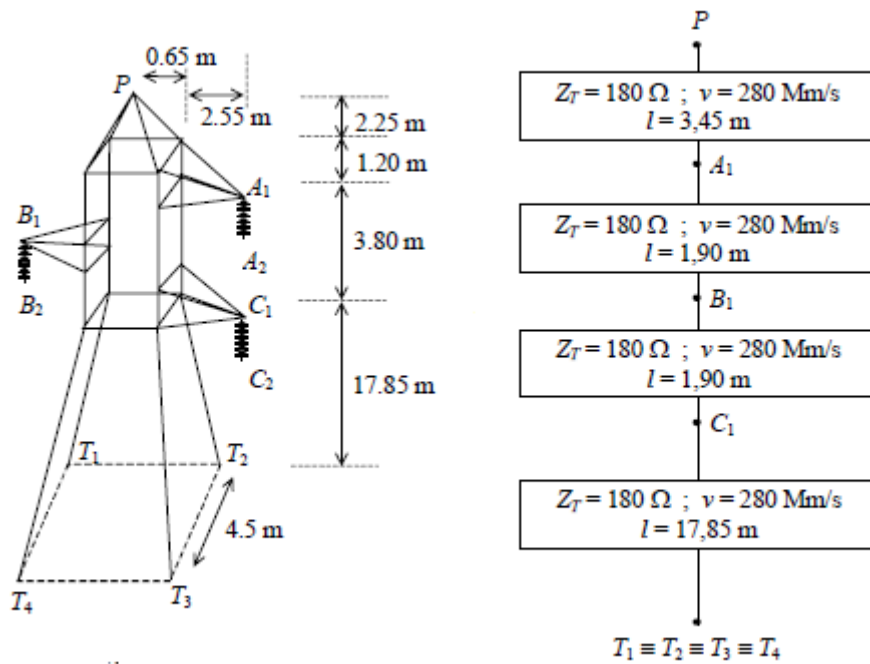
Figura 12 - Comportamento das correntes "mediana" e "crítica"



Fonte: Acervo próprio do autor.

A Figura 13 apresenta as especificações da torre de transmissão de 138 kV implementada nas simulações tais como configuração geométrica, valores das impedâncias de surto (Z_T) e da velocidade de propagação (v) da onda de surto.

Figura 13 - Configuração da torre da linha de transmissão de 138kV, e circuito equivalente da torre.



Fonte: Portela, et al. (2007, p. 3)

O circuito modelado no ATP/ATPDraw foi composto de uma linha de transmissão, implementada em 200 kHz, frequência típica para o fenômeno de descargas atmosféricas (ZANETTA JÚNIOR, 2003) e com uma das suas extremidades conectada a uma fonte de tensão senoidal de 138 kV entre fases e com comprimento de 10km após as torres das extremidades para simular uma linha de transmissão infinita (neste caso, as reflexões não retornam antes do fim do tempo total de estudo, não afetando os resultados porque só há interesse nas sobretensões máximas). Os dados físicos dos cabos e da linha de transmissão são apresentados conforme a Tabela 2, sendo estes extraídos de catálogos técnicos e da configuração geométrica da linha.

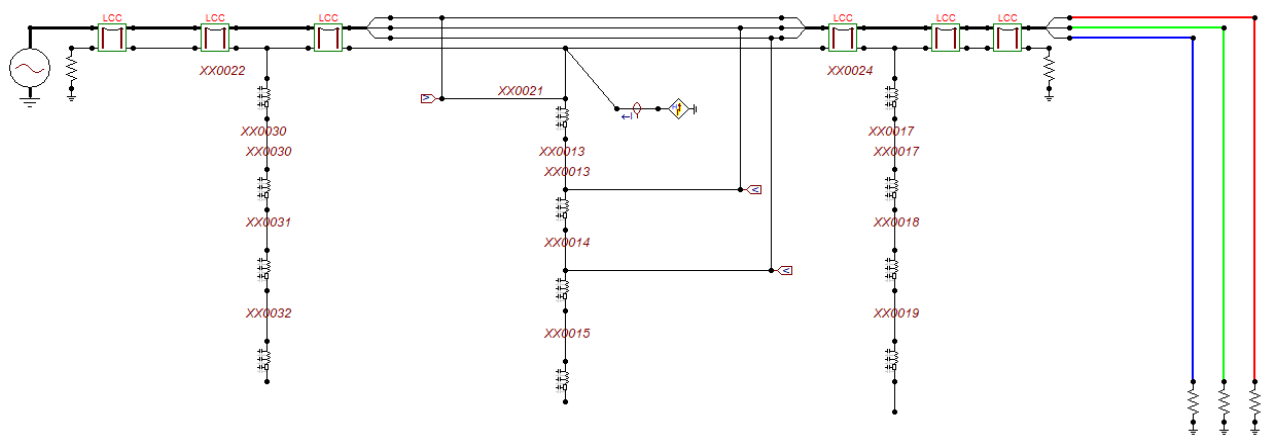
Tabela 2 - Dados elétricos e mecânicos dos cabos

Nome do Cabo	LINNET	EHS 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe A
Comprimento do Vão (m)	300	300
Flechas (m)	7	4
Raio Interno (cm)	0,2976	0
Raio Externo (cm)	0,9155	0,476
Resistência em CC ($\Omega.km$)	0,2032	3,81

Os sistemas de aterramento utilizaram configurações diversas, essas foram compostas de hastes verticais de aterramento, cabos contrapeso ou a associação dos dois elementos anteriores. Para os sistemas de aterramento, os valores das grandezas que não variam conforme os arranjos são $\varepsilon = 10 \cdot \varepsilon_0$ e $\mu = \mu_0$ (LIMA, 2010). Os valores de comprimento e raio dos cabos contrapeso e hastes de aterramento que variam conforme os arranjos e das resistividades do solo utilizadas nas simulações serão apresentados na próxima seção antes de cada conjunto de resultados.

Na Figura 14, apresenta-se o circuito implementado no software ATPDraw, para melhor entendimento da situação proposta.

Figura 14 - Modelo elétrico básico no ATPDraw para avaliações



Fonte: Acervo próprio do autor.

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão determinadas as amplitudes das sobretensões que definem a ocorrência de interrupções devido ao fenômeno de *backflashover*, além de analisada a influência dos arranjos de aterramento nessas ocorrências com o objetivo de dimensionar os sistemas de aterramento para redução do número de desligamentos em decorrência do referido fenômeno. O valor de sobretensão adotado para as avaliações da ocorrência do fenômeno foi de 650 kV, sendo esse um critério bastante rigoroso, por se tratar do valor mínimo, e não do valor usual, do Nível Básico de Isolamento (NBI) da cadeia de isoladores utilizadas para a classe de tensão de 138 kV, alvo específico desse estudo (VISACRO FILHO, 2005). O NBI é o valor de sobretensão para o qual a probabilidade de não ocorrerem descargas disruptivas na isolação, em condições especificadas, é igual a uma probabilidade de referência especificada. Na NBR-6939/1987 adota-se a probabilidade de referência igual a 90%, ou seja, a probabilidade de ocorrerem descargas disruptivas nessa tensão é de 10%.

Os arranjos do sistema de aterramento, em todos os casos, foram representados por hastes de aterramento, cabos contrapeso ou associações desses elementos.

No primeiro caso é feita uma avaliação da viabilidade da utilização apenas das hastes de aterramento e da associação destas com os cabos contrapeso. Nesse e em todos os casos restantes, o intuito é alcançar os arranjos de aterramento suficientes para evitar o fenômeno de *backflashover* para variados valores da corrente de descarga e resistividade do solo. Esses valores foram definidos em virtude de avaliar os sistemas de aterramento necessários em condições médias e críticas de corrente de descarga e com valores de resistividade do solo estrategicamente escolhidos para atender a diversas variedades de solos, típicos da realidade brasileira.

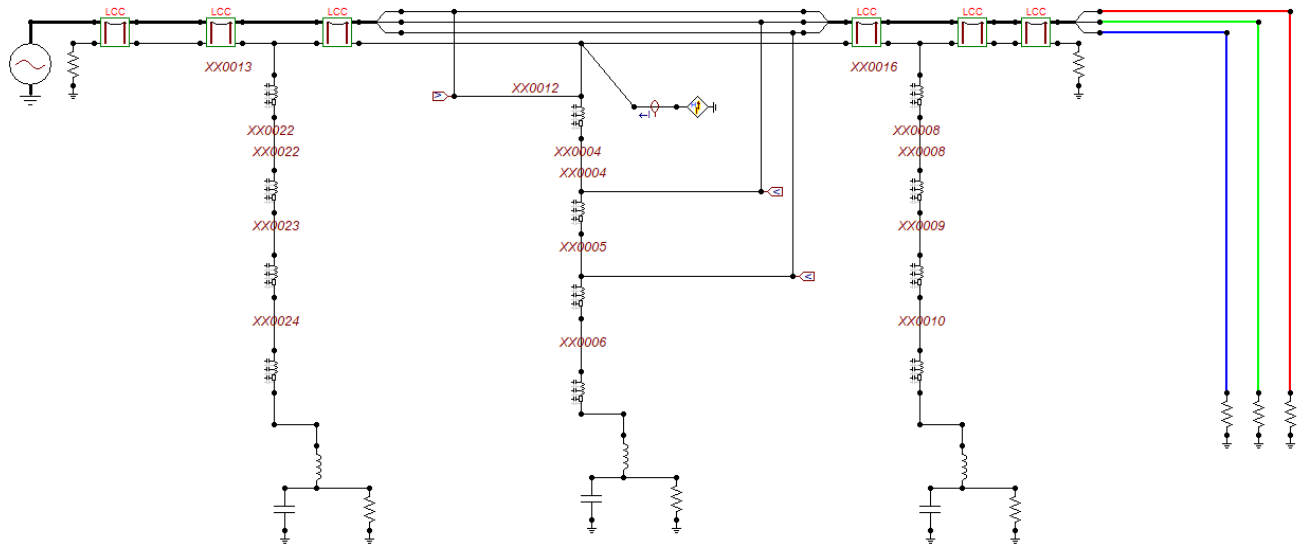
5.1.CASO 1: CORRENTE DE DESCARGA MEDIANA (Tabela 1) E

$$\rho = 500 \Omega. m$$

Na Figura 15, visualiza-se a modelagem elétrica da instalação com três estruturas, nas quais o aterramento foi modelado inicialmente apenas com um cabo guarda da torre de transmissão e o cabo de equalização interligado na sua extremidade inferior, a uma

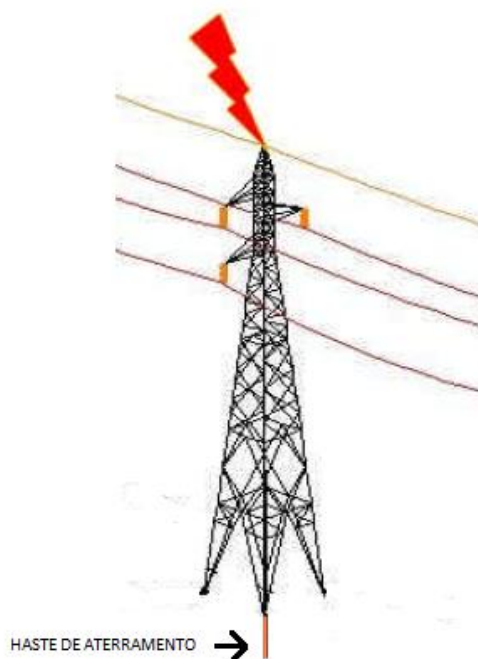
haste cobreada (*copperweld*) de 3/4"x1,5m com uma descarga atmosférica incidindo no topo da estrutura central. Tal topologia do sistema de aterramento, pode ser vista em perspectiva na Figura 16.

Figura 15 - Modelo elétrico no ATPDraw com aterramento modelado apenas por uma haste de 3/4" x 1,5m



Fonte: Acervo próprio do autor.

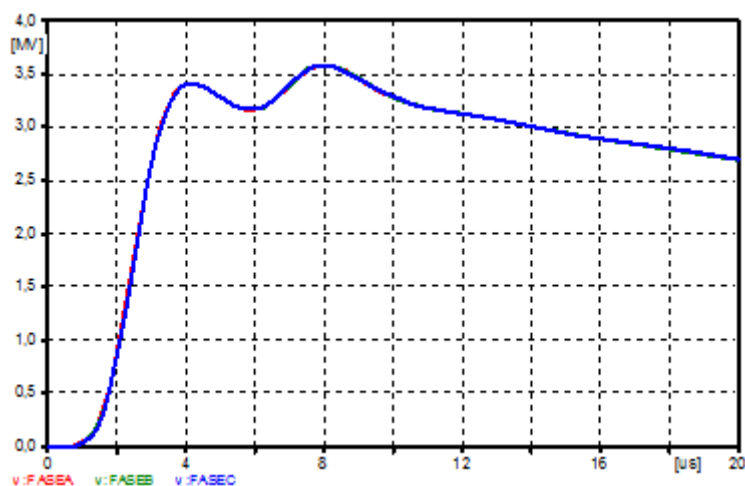
Figura 16 – Representação gráfica da topologia de aterramento com uma haste conectada diretamente ao pé da torre



Fonte: Adaptada de Nogueira (2002, p.13)

Na Figura 17, visualizam-se as curvas das tensões sobre os isoladores de cada fase da estrutura central, relativo à modelagem mostrada na Figura 14, para uma resistividade do solo de $500 \Omega.m$, permeabilidade relativa unitária e permissividade relativa dez. Os valores obtidos aproximam-se de uma tensão de 3,5 MV, o que muito provavelmente implicaria uma descarga disruptiva de retorno, *backflashover*, pois esse valor extrapola, e muito, o valor do NBI da instalação, que é de 650 kV.

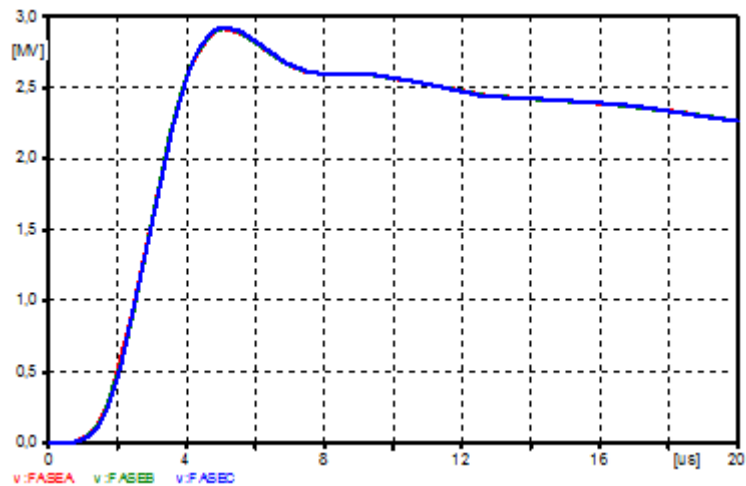
Figura 17 - Tensões nos isoladores com uma haste de 3/4"x1,5m



Fonte: Acervo próprio do autor.

É realizada outra análise referente à mesma modelagem do circuito da Figura 15, alterando apenas a dimensão da haste cobreada de 3/4"x1,5 m para 5/8"x2,4 m. Para esse caso, os valores obtidos aproximam-se de 3 MV, conforme se verifica na Figura 18 a seguir.

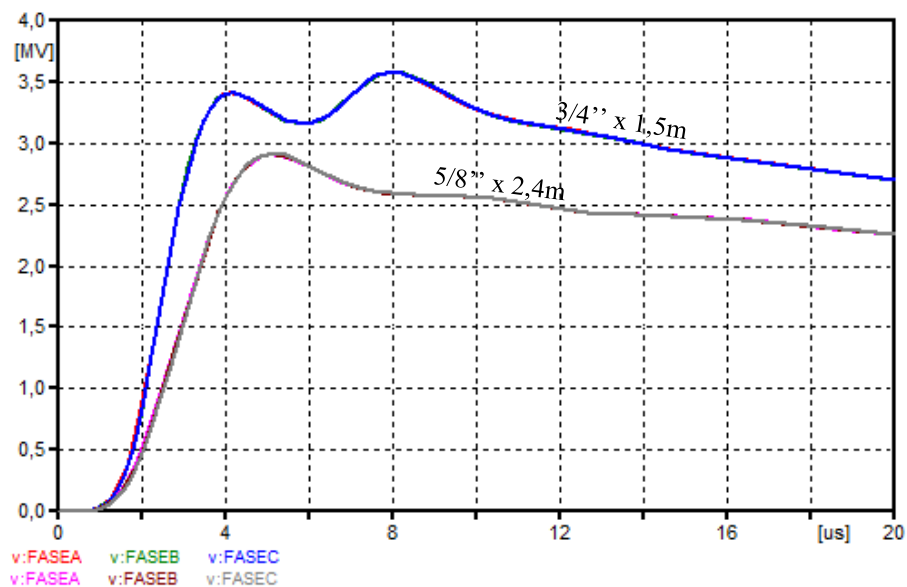
Figura 18 - Tensões nos isoladores com uma haste de 5/8"x2,4m



Fonte: Acervo próprio do autor.

Da Figura 19, pode-se observar a diferença entre as respostas das duas configurações do sistema de aterramento modelado por dois tipos de hastes distintas.

Figura 19 - Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando haste de aterramento de 3/4"x1,5m e 5/8"x2,4m.

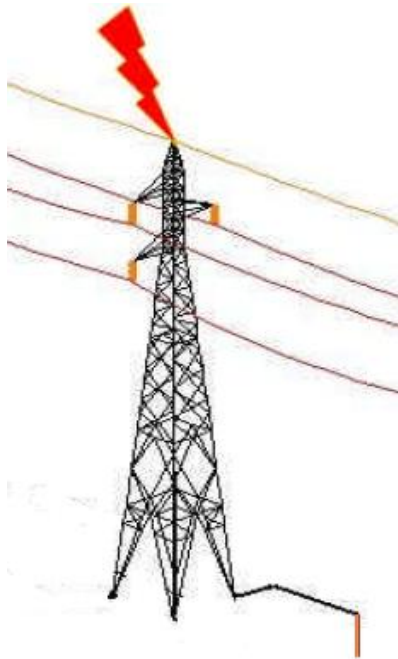


Fonte: Acervo próprio do autor.

Como visto, o valor das sobretensões resultantes ainda é muito acima do NBI com a configuração do sistema de aterramento aplicando apenas uma haste de aterramento.

Em vista disso haverá alteração da topologia do sistema de aterramento, sendo este modelado por uma haste cobreada de 5/8"x2,4 m e conectada a um cabo contrapeso de aço-cobreado 4 AWG perpendicular à estrutura, enterrado a 60cm da superfície do solo, instalado no sentido longitudinal da LT, conforme ilustração da Figura 20.

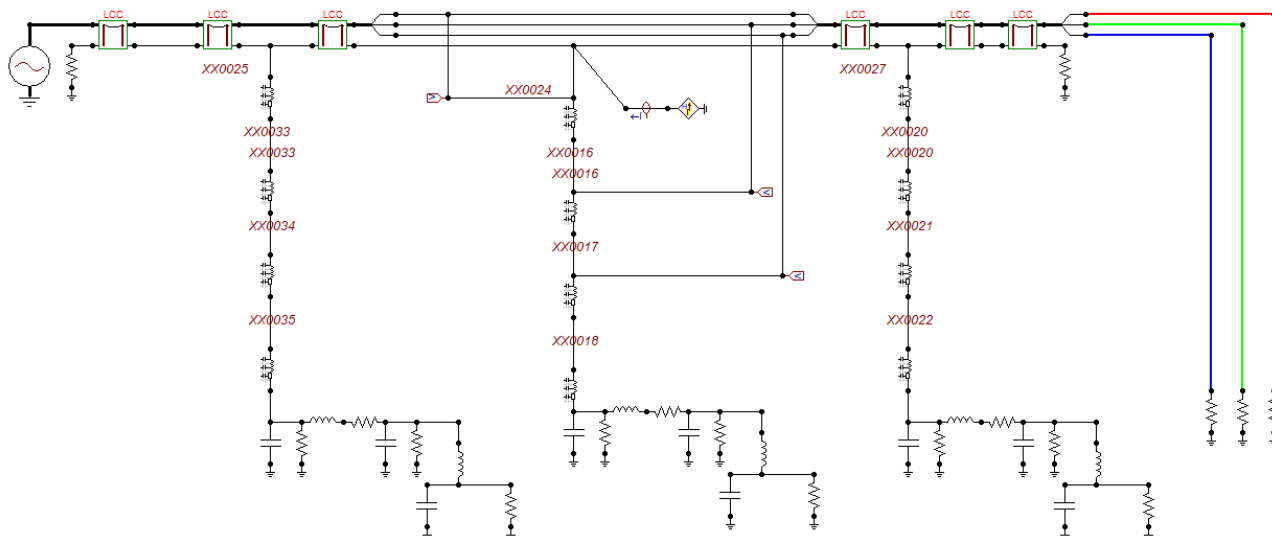
Figura 20 - Representação gráfica da topologia de aterramento com um cabo de aterramento e haste de aterramento associada.



Fonte: Adaptada de Nogueira (2002, p.13)

O modelo elétrico do sistema descrito anteriormente implementado no ATPDraw pode ser visto a partir da Figura 21.

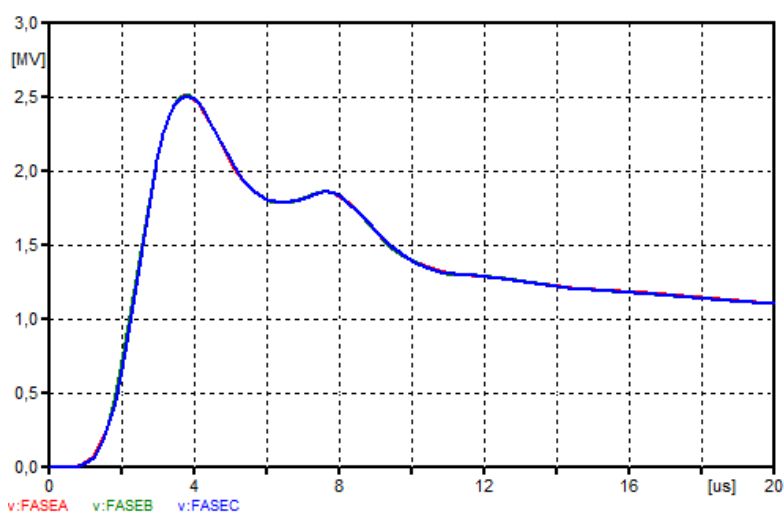
Figura 21 - Modelo elétrico no ATPDraw com aterramento modelado apenas por um cabo contrapeso de 1m associado a uma haste.



Fonte: Acervo próprio do autor.

Da simulação do circuito acima extraiu-se o gráfico das sobretensões nas cadeias de isoladores para cada fase, representado na Figura 22, que apresentaram valor pouco acima de 2,5 MV, ainda muito acima do NBI.

Figura 22 - Tensões nos isoladores com 1m de cabo contrapeso e uma haste de 5/8''x2,4m

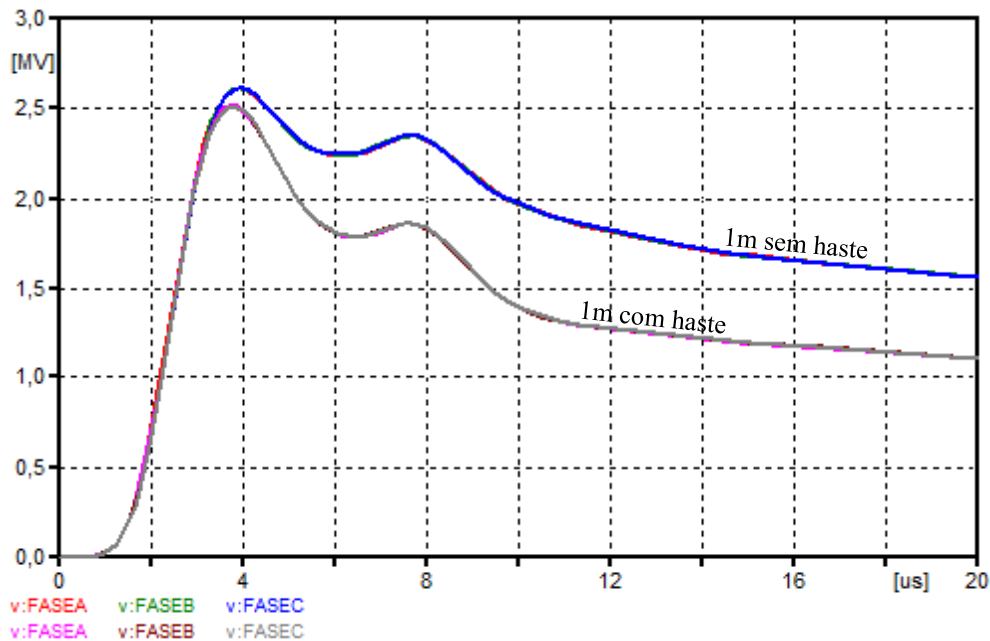


Fonte: Acervo próprio do autor.

Para mostrar a influência da associação da haste de aterramento para essa topologia, é mostrada na Figura 23 a resposta do sistema apenas com 1m de cabo

contrapeso sem instalação da haste e também com a instalação da haste, sendo observável uma diferença de 150kV, mas ainda muito acima do NBI.

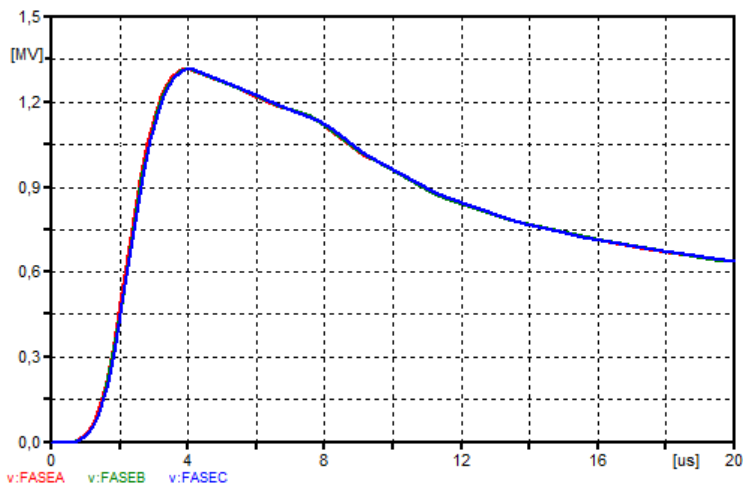
Figura 23 - Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 1m com e sem haste de aterramento de 5/8''x2,4m.



Fonte: Acervo próprio do autor.

Na tentativa de alcançar um valor de sobretensão na cadeia dos isoladores menor que o NBI, com o objetivo de evitar o desligamento por *backflashover*, o comprimento do cabo contrapeso foi aumentado para 10m, mantendo-se a haste de aterramento de 5/8'' x 2,4m. As curvas das tensões medidas por fase estão representadas na Figura 24, e alcançaram o valor de aproximadamente 1,3 MV.

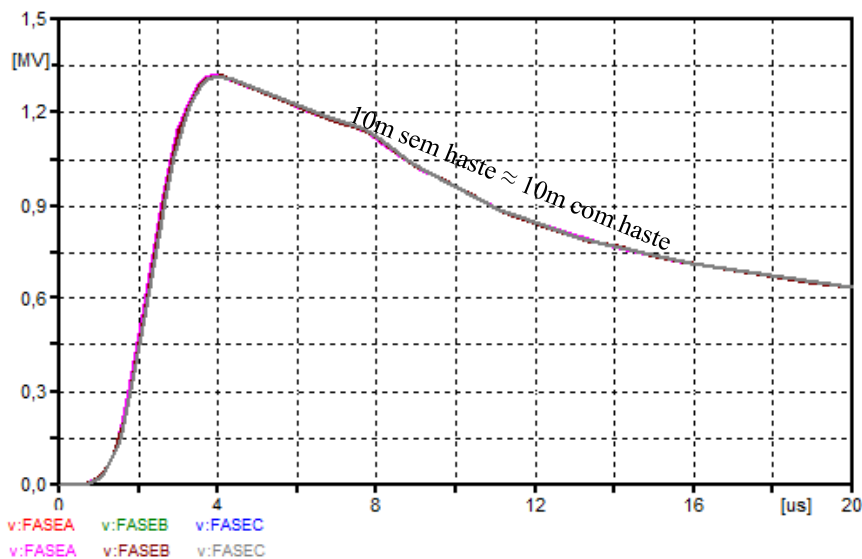
Figura 24 - Tensões nos isoladores com 10m de cabo contrapeso e haste de aterramento.



Fonte: Acervo próprio do autor.

Para testar a influência da associação da haste de aterramento para esse comprimento de cabo contrapeso, é mostrada na Figura 25 a resposta do sistema apenas com 10m de cabo contrapeso sem instalação da haste e também com a instalação da haste, concluindo que a partir desse comprimento de cabo contrapeso o uso da haste de aterramento passa a ser dispensável.

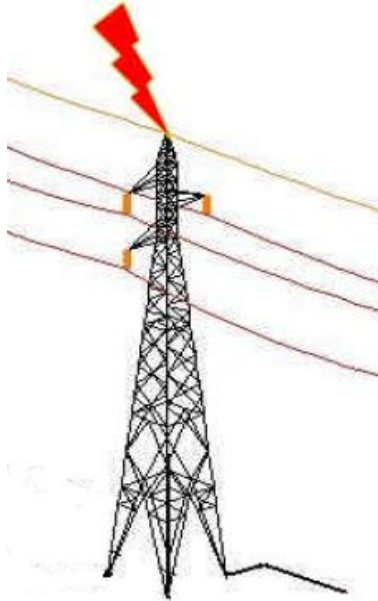
Figura 25 - Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 10m com e sem haste de aterramento de 5/8''x2,4m.



Fonte: Acervo próprio do autor.

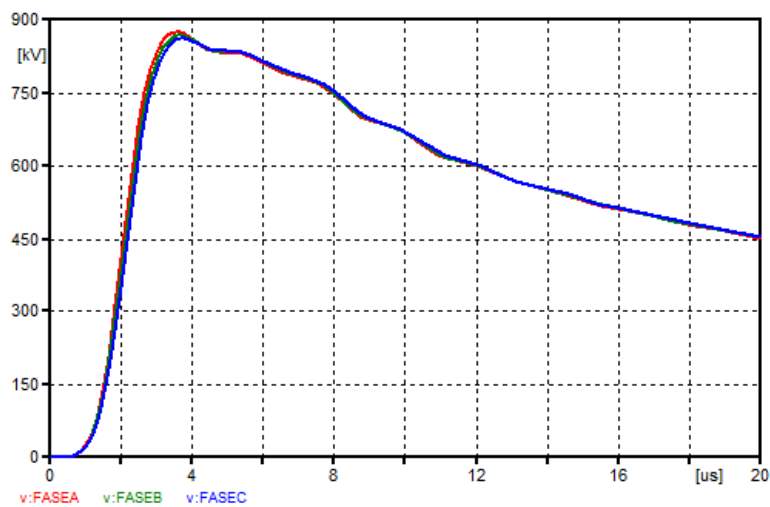
Concluído isso, foi simulado o mesmo circuito com o aumento do comprimento do cabo para 20m, já desprezando a associação com a haste de aterramento. Esta topologia é ilustrada na Figura 26. Assim, os resultados das tensões por fase com essa mudança se aproximam de 900 kV, conforme Figura 27.

Figura 26 - Representação gráfica da topologia de aterramento com um cabo contrapeso sem haste associada



Fonte: Adaptada de Nogueira (2002, p.13)

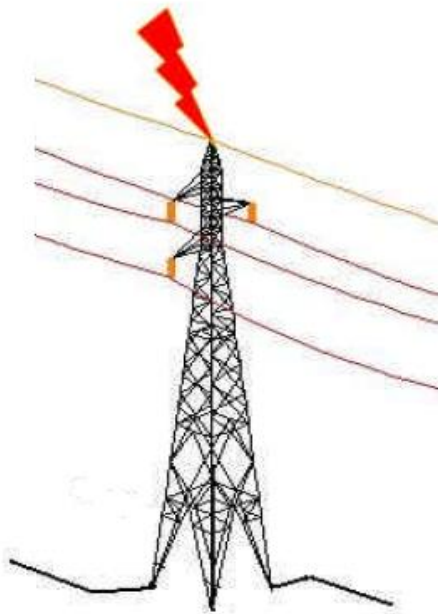
Figura 27 - Tensões nos isoladores com 20m de cabo contrapeso.



Fonte: Acervo próprio do autor.

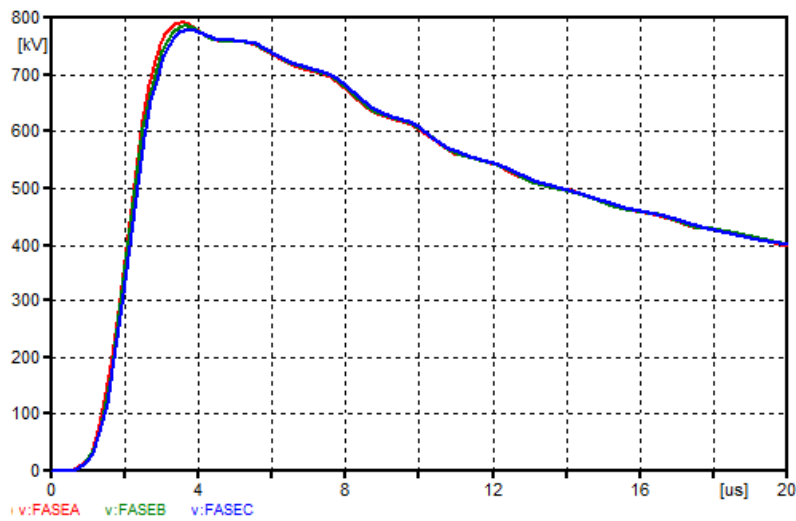
Como os resultados ainda estão muito distantes do NBI, será implementada topologia com dois cabos contrapeso em paralelo conectados aos pés da torre, vide Figura 28.

Figura 28 - Representação gráfica da topologia de aterramento com dois cabos de aterramento.



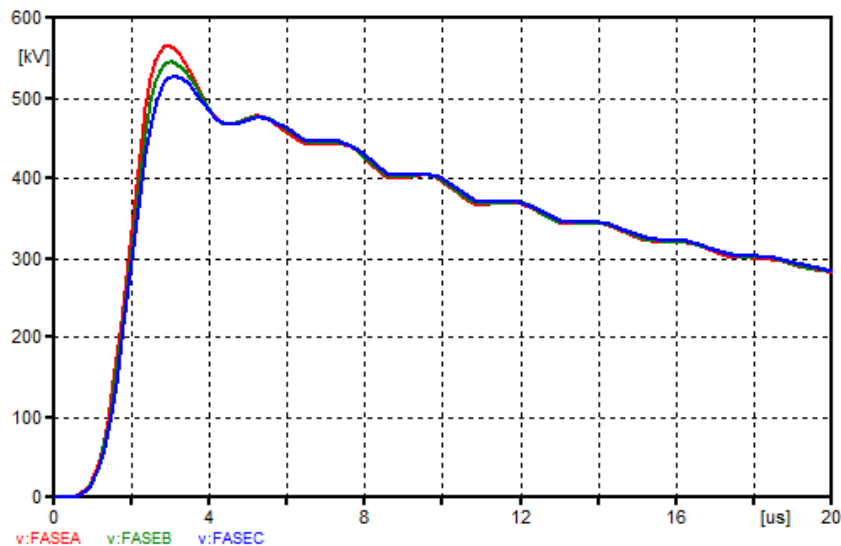
Fonte: Adaptada de Nogueira (2002, p.13)

Já com essa topologia utilizando dois cabos, o sistema de aterramento foi simulado com 10m para cada cabo contrapeso, os resultados são mostrados na Figura 29. Pode-se comprovar através do gráfico que a utilização de dois cabos contrapeso em paralelo é mais eficiente do que apenas aumentar o comprimento de um cabo, pois a tensão máxima nesse caso foi de aproximadamente 800kV enquanto que utilizando 20m de cabo único foi de praticamente 900kV.

Figura 29 - Tensões nos isoladores com dois cabos contrapeso de 10m.

Fonte: Acervo próprio do autor.

Porém, como ainda não foi alcançado o objetivo de manter a sobretensão máxima abaixo do valor mínimo do NBI, o comprimento dos cabos foi acrescido em mais 10 metros e testado com 2x20m, ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Tensões nos isoladores com dois cabos contrapeso de 20m

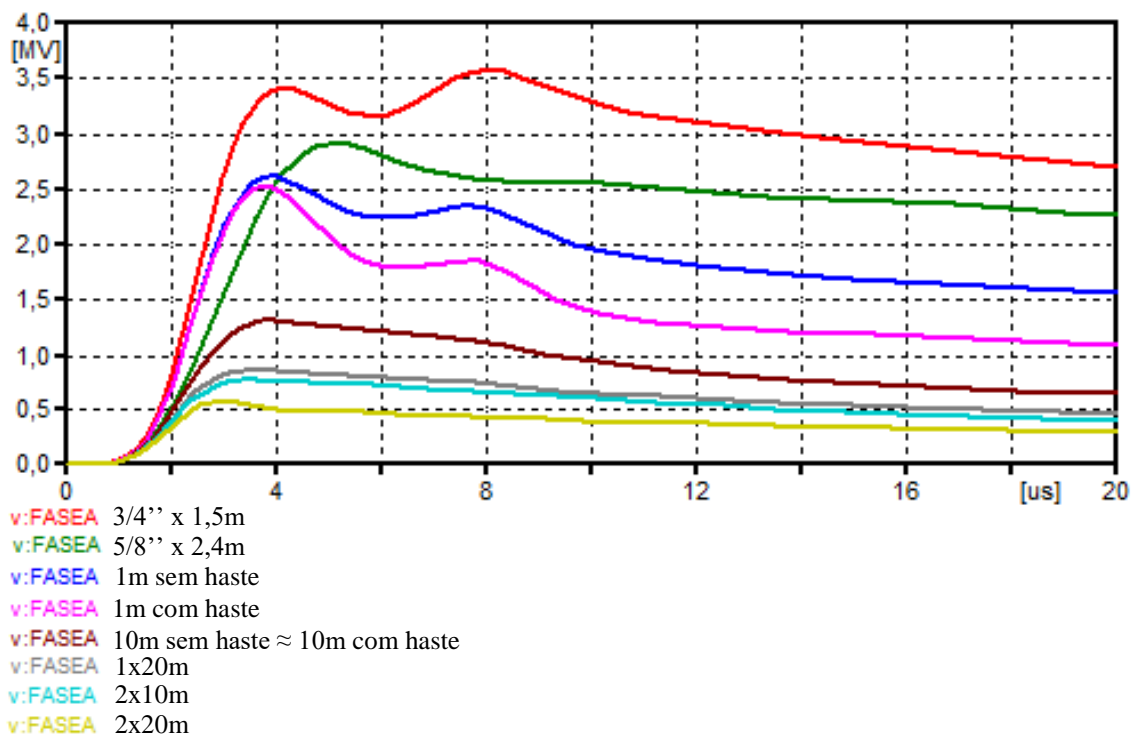
Fonte: Acervo próprio do autor.

A partir da leitura do gráfico, chega-se à conclusão que esse é o primeiro caso em que o valor do NBI considerado não é ultrapassado, apresentando valores máximos de

cerca de 565 kV e que o objetivo de proteção contra o desligamento da linha por *backflashover* é alcançado com os parâmetros definidos.

Com o objetivo de melhor visualizar os resultados anteriores e comparar os comportamentos do sistema de aterramento com a variação da topologia e/ou comprimento do(s) cabo(s) contrapeso para o Caso 1, é apresentada a Figura 1Figura 31, com todos os resultados anteriores plotados em apenas um gráfico. Serão representados os valores apenas referentes a fase A de todos os circuitos modelados, pois o programa de plotagem do ATP tem a limitação de até 8 curvas por gráfico, sendo assim impossível mostrar as três fases dos três casos simultaneamente e estrategicamente também por ser essa fase que apresenta o maior valor de tensão, pois em função da geometria da torre, está mais distante da onda refletida pelo sistema de aterramento.

Figura 31 - Comparação dos comportamentos das diversas topologias testadas para o Caso 1.

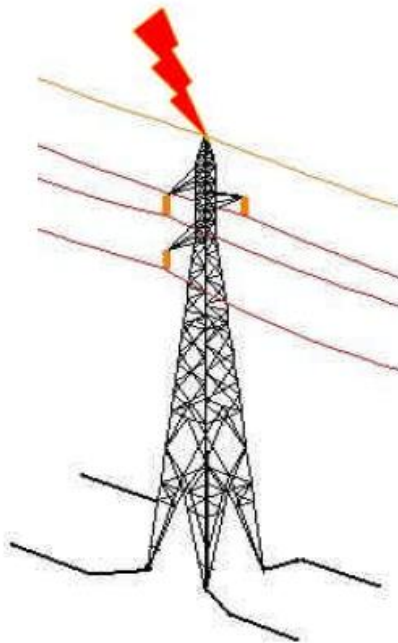


Fonte: Acervo próprio do autor.

5.2.CASO 2: CORRENTE DE DESCARGA CRÍTICA (Tabela 1) E $\rho = 500 \Omega \cdot m$

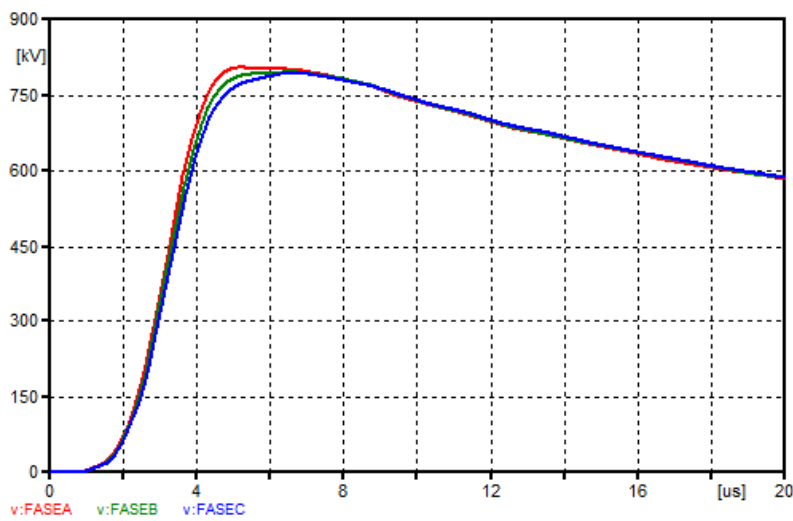
No segundo caso modelado, o valor da resistividade do solo é o mesmo usado no primeiro caso, porém utilizando as características da corrente de descarga crítica, que tem praticamente o dobro da amplitude da usada no primeiro. Por conta disso, as avaliações se iniciam com uma configuração mais eficiente que a suficiente para proteger a linha no Caso 1, utilizando quatro cabos contrapeso em paralelo conectados aos pés da torre, ao invés de dois cabos, conforme a Figura 32.

Figura 32 - Representação gráfica da topologia de aterramento com quatro cabos de aterramento.



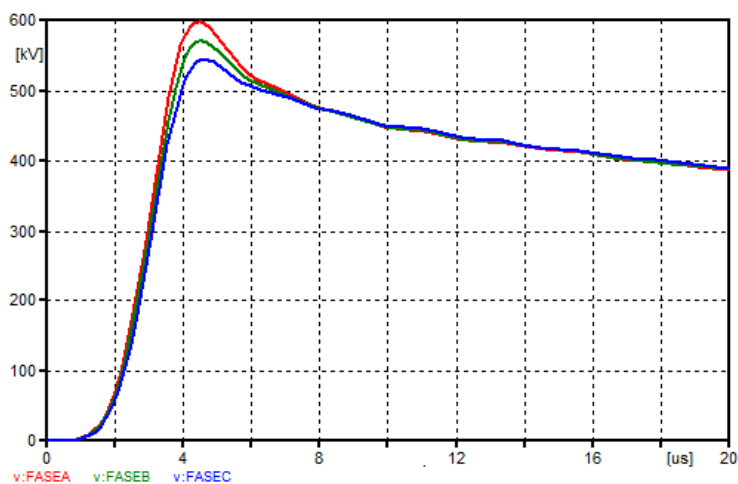
Fonte: Adaptada de Nogueira (2002, p.13)

Primeiramente foi modelado o aterramento com quatro cabos de 10 metros de comprimento para aferição das sobretensões e avaliação da necessidade ou não de incrementar o comprimento dos cabos afim de alcançar a proteção em relação ao *backflashover*. O resultado está exposto na Figura 33, e ficou em torno de 800 kV, assim sendo não alcançou ainda o objetivo.

Figura 33 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 10m no Caso 2.

Fonte: Acervo próprio do autor.

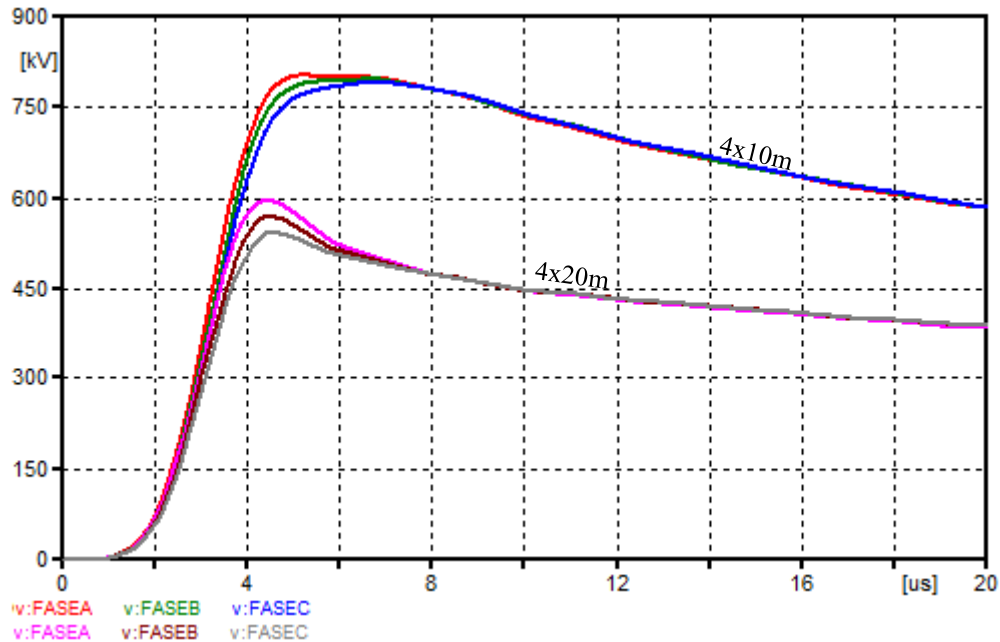
Em virtude de não ter apresentado resultado satisfatório, foi testada a eficácia do sistema de aterramento incrementando o comprimento dos quatro cabos contrapeso para 20 metros. E o que se observa a partir da Figura 34, é que essa topologia, com os parâmetros considerados, consegue alcançar o objetivo que é limitar o valor da sobretensão em aproximadamente 600 kV, dentro do NBI e evitar o desligamento da linha.

Figura 34 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 20m no Caso 2.

Fonte: Acervo próprio do autor.

Em seguida, é apresentado em gráfico único, da Figura 35, a comparação das duas configurações apresentadas anteriormente.

Figura 35 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 2.



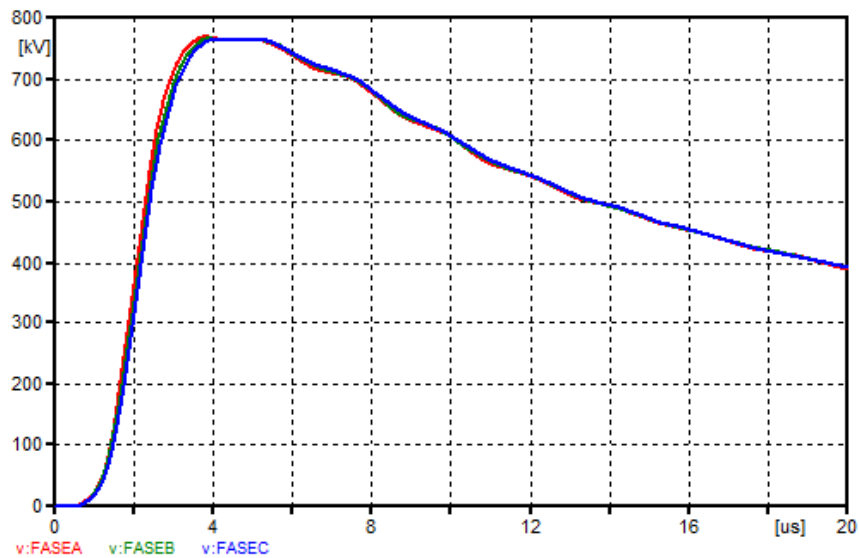
Fonte: Acervo próprio do autor.

5.3.CASO 3: CORRENTE DE DESCARGA MEDIANA (Tabela 1) E

$$\rho = 1000 \Omega \cdot m$$

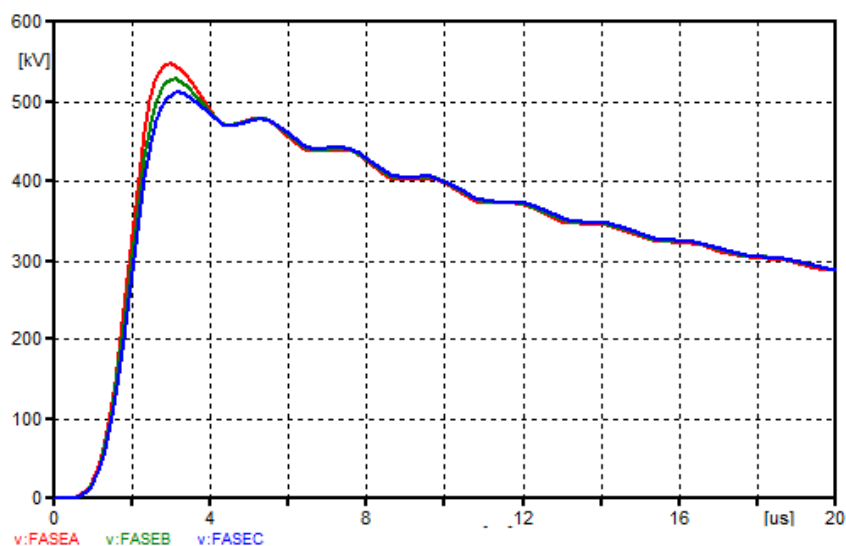
No terceiro caso estudado, o valor da resistividade do solo é o dobro da usada no primeiro caso, mantendo-se as características da corrente de descarga do mesmo. Por conta disso, as avaliações se iniciam com uma configuração mais “robusta” que a do Caso 1, utilizando também quatro cabos contrapeso em paralelo conectados aos pés da torre, conforme a Figura 32.

Assim sendo, as simulações já começam utilizando a configuração com quatro cabos de 10 metros para o sistema de aterramento, e como pode-se observar do gráfico da Figura 36, o valor máximo da tensão se sobrepõe ao valor considerado como referência para o NBI, alcançando valor próximo de 750 kV.

Figura 36 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 10m no Caso 3.

Fonte: Acervo próprio do autor.

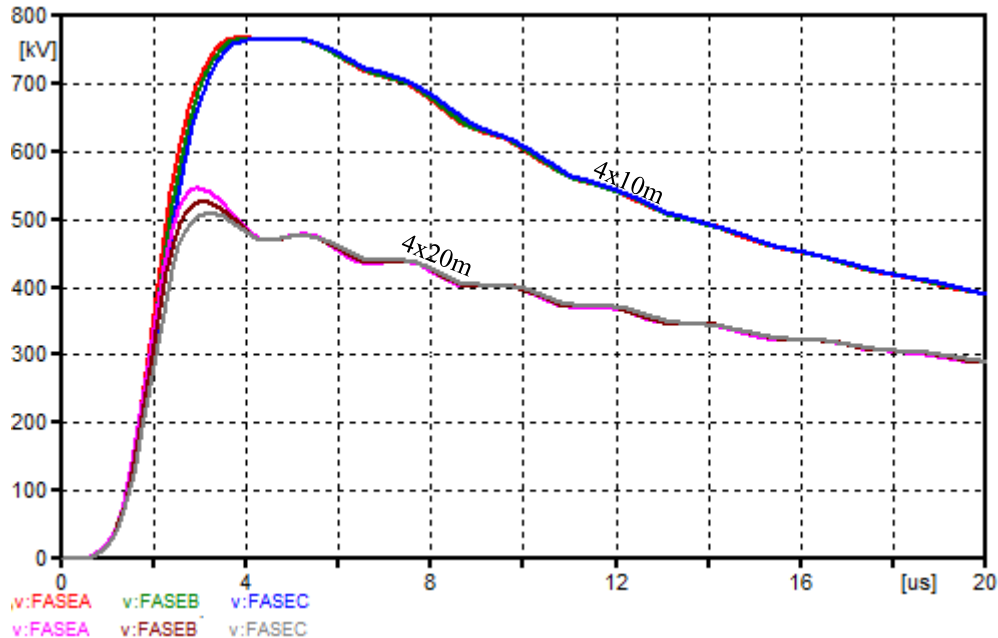
Ao incrementar o comprimento dos cabos contrapeso para 20 metros mantendo a mesma configuração têm-se os resultados ilustrados na Figura 37. Tal configuração se mostra eficaz para a proteção da linha, por apresentar valor de sobretensão máxima em torno de 550 kV, abaixo do valor de 650 kV.

Figura 37 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 20m no Caso 3.

Fonte: Acervo próprio do autor.

Novamente serão apresentados os resultados associados ao Caso 3 em gráfico único, vide Figura 38, com a finalidade de facilitar a comparação.

Figura 38 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 3.

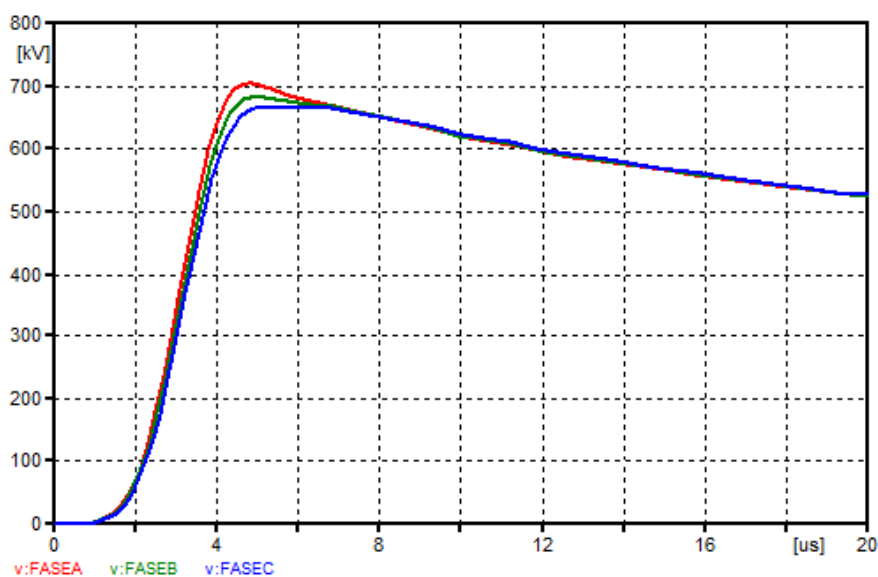


Fonte: Acervo próprio do autor.

5.4.CASO 4: CORRENTE DE DESCARGA CRÍTICA (Tabela 1) E $\rho = 1000 \Omega \cdot m$

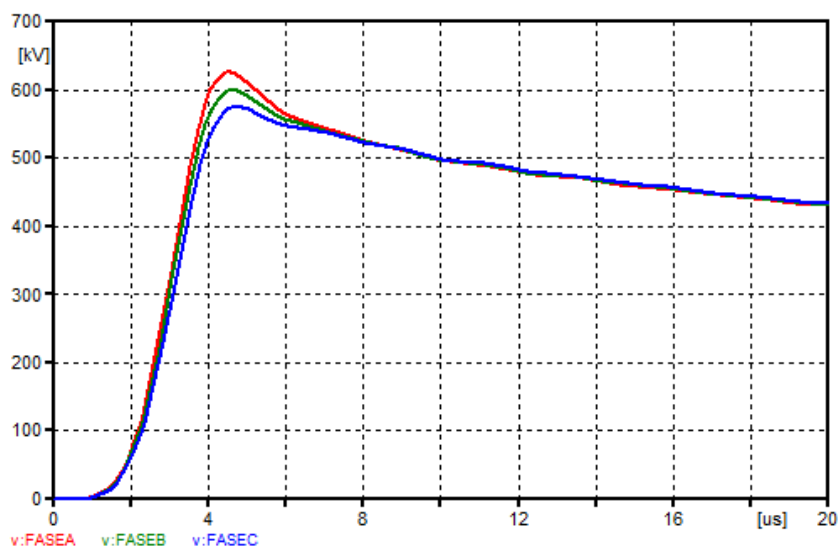
No quarto caso de estudo, o valor da resistividade do solo é o mesmo que foi usado no terceiro caso, e utilizando as características da corrente de descarga crítica. Por conta disso, as avaliações se iniciam com uma topologia previsivelmente mais eficiente que a do caso anterior, mas ainda utilizando quatro cabos contrapeso conectados aos pés da torre, conforme a Figura 32.

Sendo assim, as simulações começam utilizando a configuração com quatro cabos de 30 metros para o sistema de aterramento, e como pode se observar do gráfico da Figura 39, o valor máximo da tensão ultrapassa o valor do NBI considerado como parâmetro limite, alcançando valor em torno de 720 kV.

Figura 39 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 30m no Caso 4.

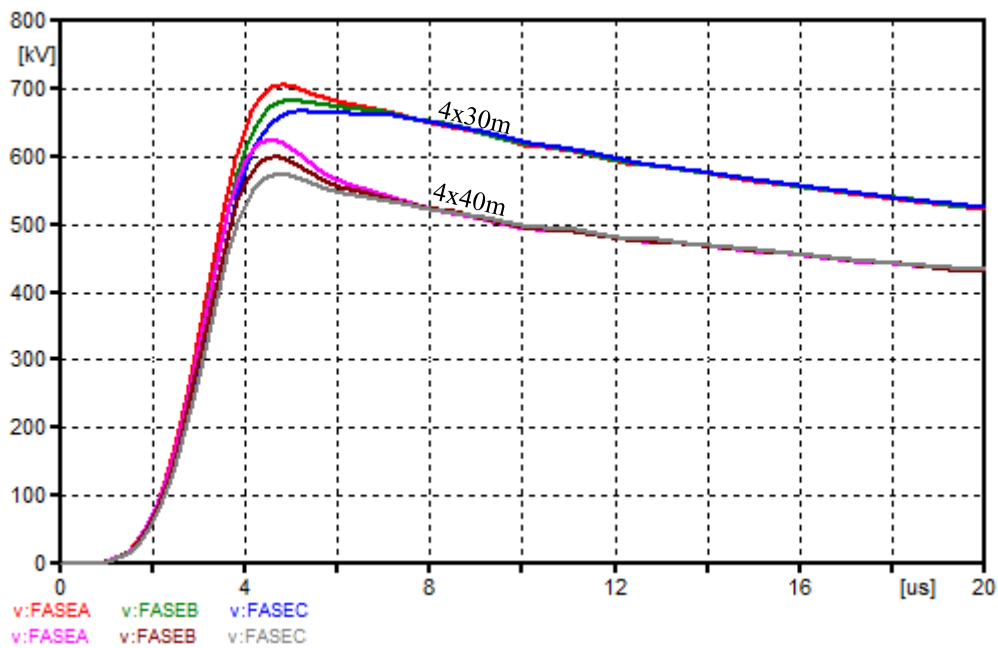
Fonte: Acervo próprio do autor.

Incrementando o comprimento dos cabos contrapeso para 40 metros mantendo a mesma configuração têm-se os resultados ilustrados na Figura 40. Tal configuração se mostra eficaz para a proteção da linha, por apresentar valor de sobretensão máxima em torno de 630 kV, menor que o valor do NBI.

Figura 40 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 40m no Caso 4.

Fonte: Acervo próprio do autor.

Como nas subseções anteriores serão apresentados os resultados associados ao Caso 4 em gráfico único, vide Figura 41, com a finalidade de facilitar a visualização.

Figura 41 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 4.

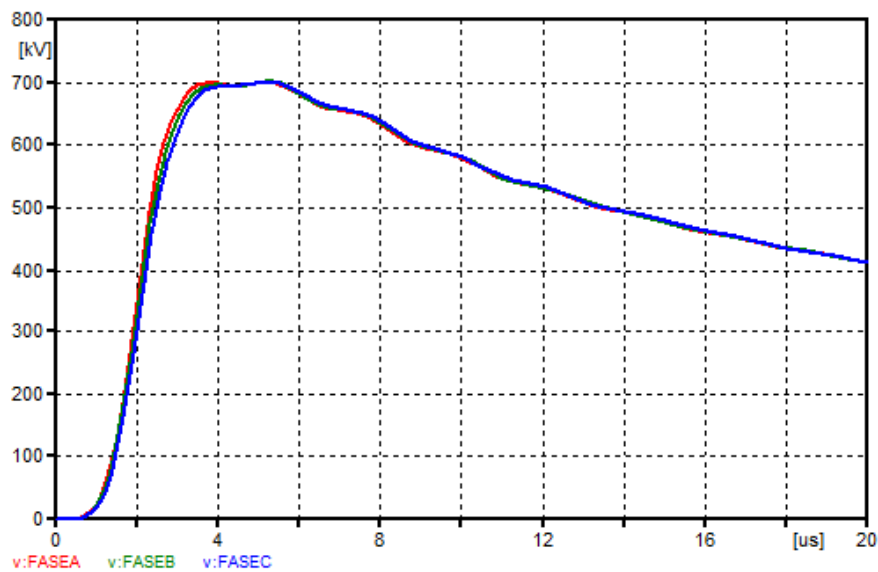
Fonte: Acervo próprio do autor.

5.5.CASO 5: CORRENTE DE DESCARGA MEDIANA (Tabela 1) E

$$\rho = 2500 \Omega \cdot m$$

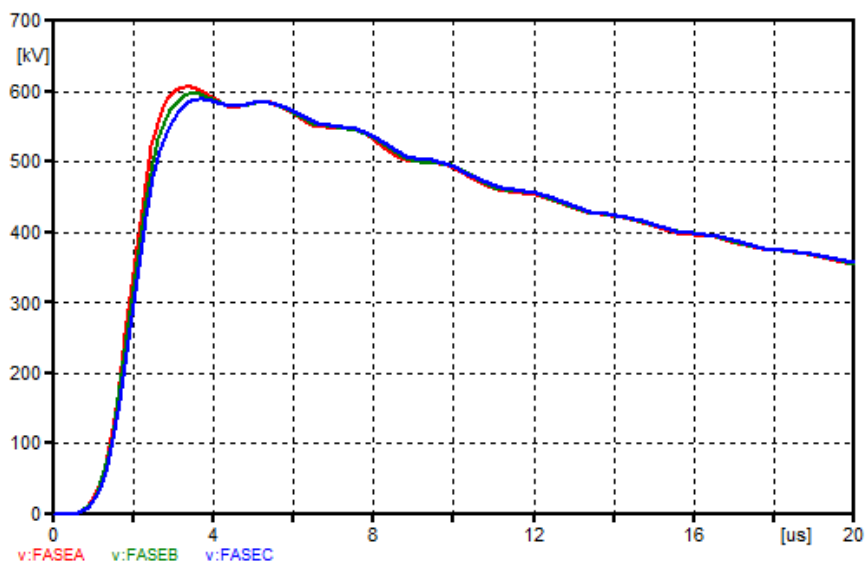
No quinto caso avaliado, o valor da resistividade do solo é duas vezes e meia maior que nos casos 3 e 4, cinco vezes maior que nos casos 1 e 2, e as características da corrente de descarga mediana. Por conta disso, as avaliações se iniciam com uma topologia que já projeta a tendência de se necessitar de cabos contrapeso mais longos que nos demais casos anteriores, ainda utilizando a topologia com quatro cabos contrapeso em paralelo e conectados aos pés da torre, conforme a Figura 32.

Assim sendo, as simulações se iniciam adotando a topologia com quatro cabos de 35 metros para o sistema de aterramento, e como pode se observar do gráfico da Figura 42, o valor máximo da tensão se sobrepõe ao valor considerado da NBI, resultando num valor próximo de 700 kV.

Figura 42 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 35m no Caso 5.

Fonte: Acervo próprio do autor.

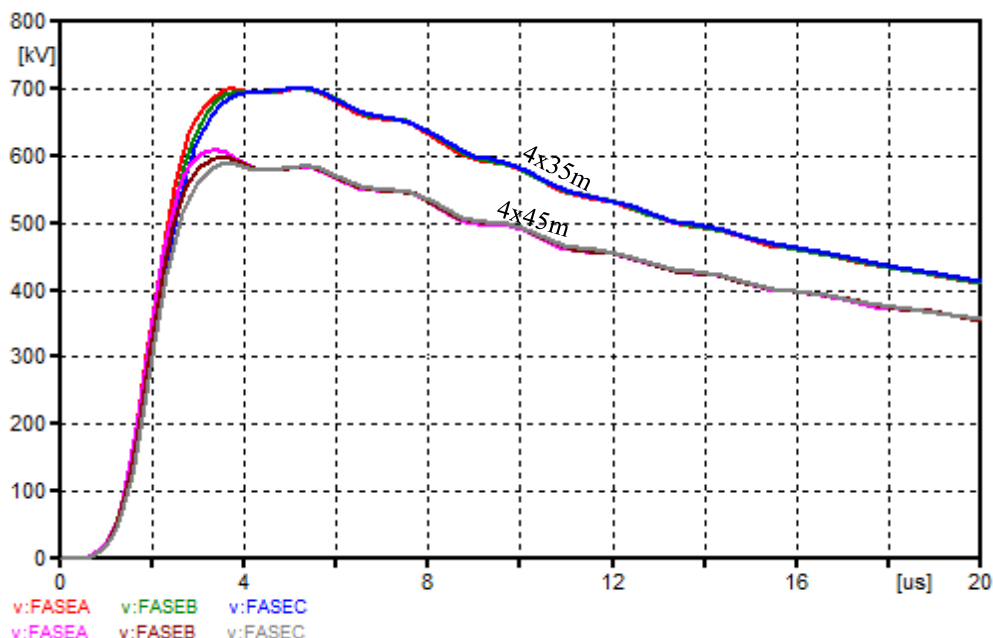
Aumentando o comprimento dos cabos contrapeso para 45 metros mantendo a mesma configuração têm-se os resultados ilustrados na Figura 43. Esta configuração se mostra suficiente para proteger a linha, pois apresenta valor de sobretensão máxima em torno de 610 kV, já abaixo dos 650 kV definido como NBI.

Figura 43 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 45m no Caso 5.

Fonte: Acervo próprio do autor.

Com a finalidade de facilitar a comparação e melhor ilustrar resultados obtidos para o Caso 5, estes serão apresentados em um único gráfico, conforme a Figura 44.

Figura 44 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 5.

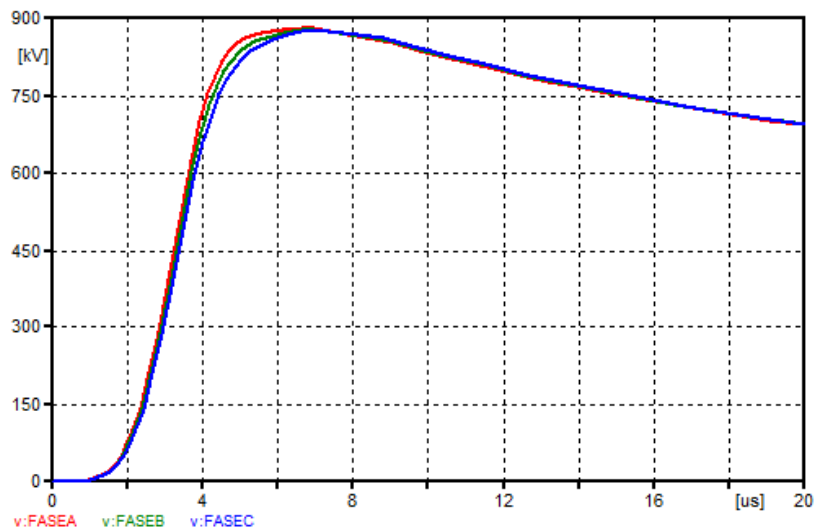


Fonte: Acervo próprio do autor.

5.6.CASO 6: CORRENTE DE DESCARGA CRÍTICA (Tabela 1) E $\rho = 2500 \Omega.m$

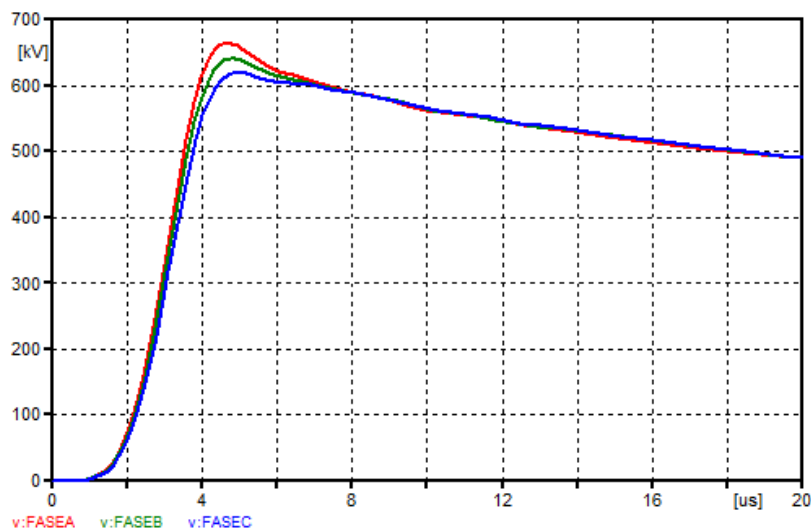
No sexto caso, o valor da resistividade do solo é a mesma do caso anterior e os parâmetros da corrente de descarga crítica. Por conta disso, as avaliações se iniciam com uma topologia que já projeta a necessidade de um sistema de aterramento mais robusto que no caso 5, entretanto ainda serão utilizados quatro cabos contrapeso conectados aos pés da torre, como já apresentado na Figura 32.

Sendo assim, as simulações se iniciam adotando a topologia com quatro cabos de 60 metros para o sistema de aterramento, e como pode se observar do gráfico da Figura 45, o valor máximo da tensão ultrapassa o valor mínimo referência para a NBI, alcançando valor próximo de 860 kV.

Figura 45 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 60m no Caso 6.

Fonte: Acervo próprio do autor.

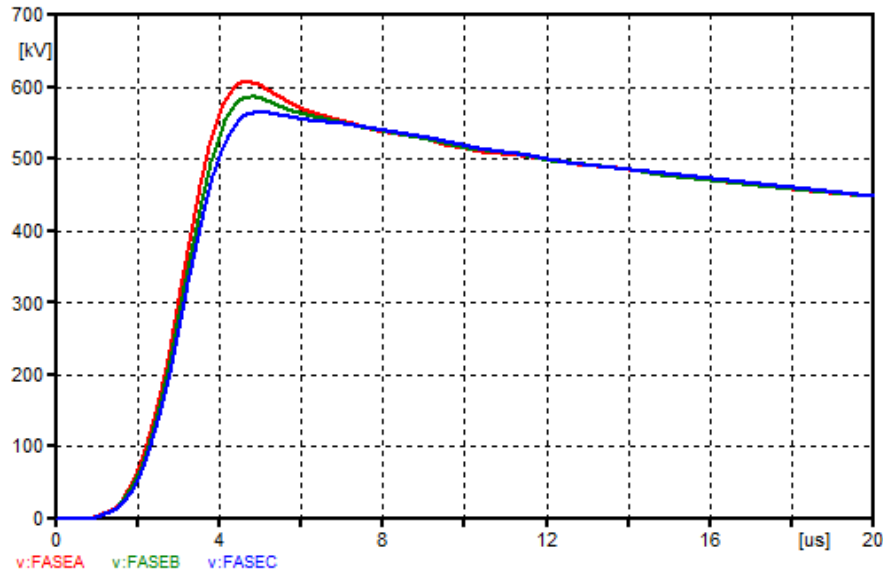
Ao crescer o comprimento dos cabos contrapeso para 80 metros mantendo a mesma configuração têm-se os resultados ilustrados na Figura 46. Porém, esta configuração ainda não se mostra eficaz para a proteção da linha, por apresentar valor de sobretensão máxima em torno de 660 kV, acima do valor mínimo estabelecido para o NBI.

Figura 46 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 80m no Caso 6.

Fonte: Acervo próprio do autor.

Aumentando mais uma vez o comprimento dos cabos contrapeso para 100 metros mantendo a mesma configuração têm-se os resultados ilustrados na Figura 47. Esta configuração se mostra suficiente para proteger a linha, pois apresenta valor de sobretensão máxima em torno de 610 kV, já abaixo dos 650 kV definido como NBI.

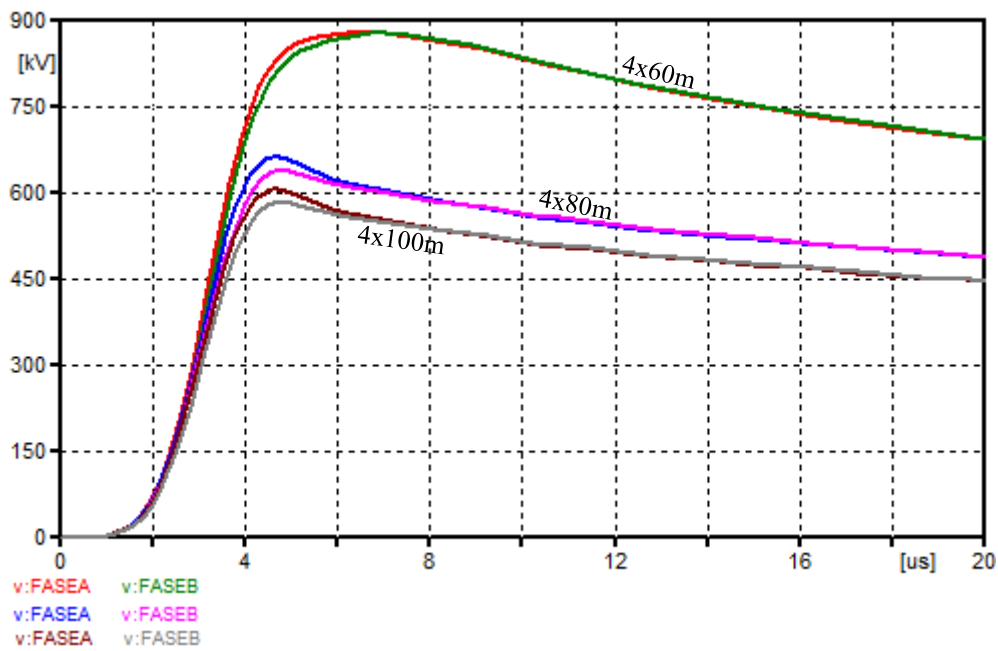
Figura 47 - Tensões nos isoladores com quatro cabos contrapeso de 100m no Caso 6.



Fonte: Acervo próprio do autor.

Com o objetivo de simplificar a analogia e melhor apresentar resultados obtidos para o Caso 6, estes serão apresentados em um único gráfico, conforme a Figura 48. Foram apresentados os valores referentes apenas às fases A e B, por uma questão de facilitar a visualização, sendo que essas duas fases apresentaram os maiores valores de sobretensão associado, pois estão mais distantes fisicamente da onda refletida pelo aterramento.

Figura 48 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para o Caso 6.



Fonte: Acervo próprio do autor.

5.7.SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão sumarizados os resultados encontrados em forma de tabela e também em gráficos que possam reunir as respostas com certos parâmetros em comum, tais como a resistividade do solo e “tipo” de descarga, para verificação mais direta do comportamento dos arranjos de aterramento e dimensionamento para proteção da linha.

A seguir, na Tabela 3 estão apresentados os valores aproximados de tensão máxima verificada em cada arranjo para cada conjunto de parâmetros envolvidos.

Tabela 3 - Resumo dos resultados para todos os casos estudados.

TENSÕES MÁXIMAS SUBMETIDAS ÀS CADEIAS DE ISOLADORES		
PARÂMETROS	TOPOLOGIA	TENSÃO (≈kV)
$I_p = 45,3\text{kA}$ $\tau_1 = 5,6\mu\text{s}$ $\tau_2 = 53,5\mu\text{s}$ $\rho = 500\Omega\text{m}$	Haste 3/4"x1,5m	3500
	Haste 5/8"x2,4m	3000
	Contrapeso 1m sem haste	2650
	Contrapeso 1m com haste	2500
	Contrapeso 10m sem haste	1300
	Contrapeso 10m com haste	1300
	Contrapeso 20m sem haste	900
	Contrapeso 2x10m sem haste	800
	Contrapeso 2x20m sem haste	565
$I_p = 85,2\text{kA}$ $\tau_1 = 9,9\mu\text{s}$ $\tau_2 = 145,2\mu\text{s}$ $\rho = 500\Omega\text{m}$	Contrapeso 4x10m	800
	Contrapeso 4x20m	600
$I_p = 45,3\text{kA}$ $\tau_1 = 5,6\mu\text{s}$ $\tau_2 = 53,5\mu\text{s}$ $\rho = 1000\Omega\text{m}$	Contrapeso 4x10m	750
	Contrapeso 4x20m	550
$I_p = 85,2\text{kA}$ $\tau_1 = 9,9\mu\text{s}$ $\tau_2 = 145,2\mu\text{s}$ $\rho = 1000\Omega\text{m}$	Contrapeso 4x30m	720
	Contrapeso 4x40m	630
$I_p = 45,3\text{kA}$ $\tau_1 = 5,6\mu\text{s}$ $\tau_2 = 53,5\mu\text{s}$ $\rho = 2500\Omega\text{m}$	Contrapeso 4x35m	700
	Contrapeso 4x45m	600
$I_p = 85,2\text{kA}$ $\tau_1 = 9,9\mu\text{s}$ $\tau_2 = 145,2\mu\text{s}$ $\rho = 2500\Omega\text{m}$	Contrapeso 4x60m	860
	Contrapeso 4x80m	660
	Contrapeso 4x100m	610

A partir da leitura dos dados acima, pode-se ver a evolução da eficiência da eficiência do sistema de aterramento em relação a atenuação das sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores para os seis casos estudados. Também fica claro que, comparando-se os casos 2 e 3, a influência da corrente de pico da descarga atmosférica é mais severa sobre o valor das sobretensões resultantes, pois no caso 2 com a corrente pico tendo um valor de um pouco menos que duas vezes da corrente de pico e metade da resistividade do caso 3, chegou-se a um valor de sobretensão maior que no caso 3. Bem como pode-se perceber que houve ganho na atenuação das sobretensões

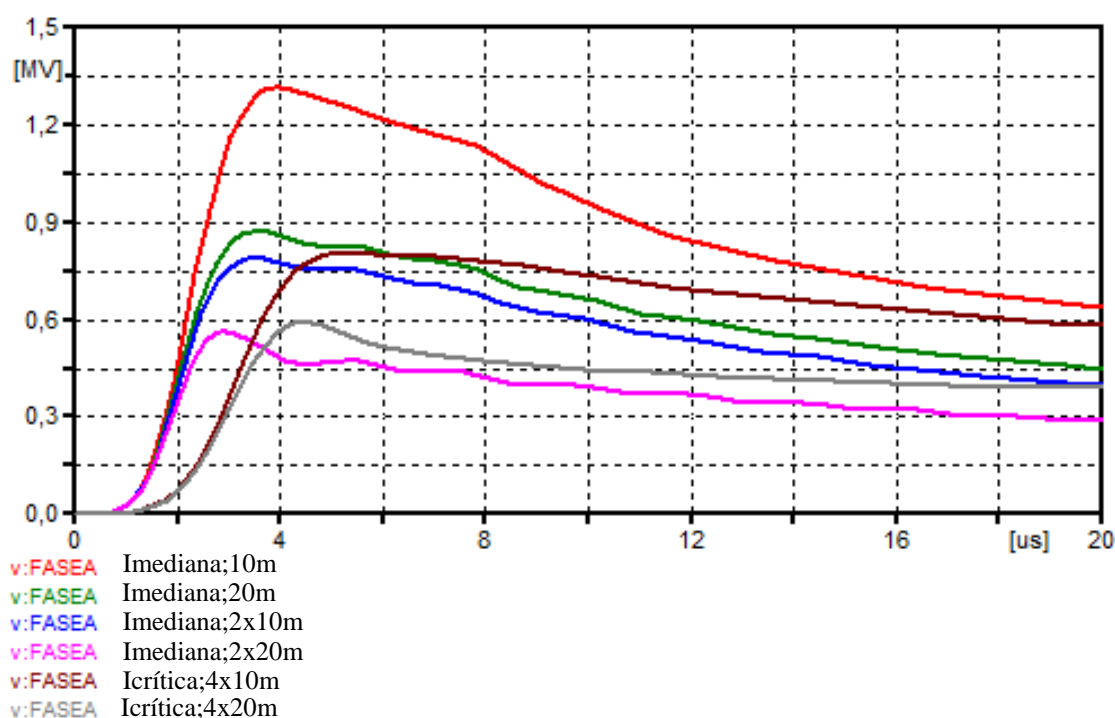
utilizando a topologia com dois cabos contrapeso em paralelo de 10 metros ao invés de apenas um cabo contrapeso com 20m.

5.7.1. Sumarização das curvas com iguais resistividades do solo

Para uniformizar a apresentação dos resultados e favorecer a realização das analogias pertinentes, serão apresentados os resultados apenas utilizando arranjos sem associação com hastes de aterramento, pois esta associação foi avaliada apenas no caso 1 e já apresentada. São ilustrados nos gráficos da Figura 49, Figura 50 e Figura 51 os valores referentes apenas a fase A dos circuitos modelados, com o objetivo de facilitar a visualização e estrategicamente por ser essa fase que apresenta o maior valor de tensão, pois em função da geometria da torre, está mais distante da onda refletida pelo sistema de aterramento, agrupados por valor de resistividade.

5.7.1.1. $\rho = 500\Omega\text{m}$

Figura 49 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para $\rho = 500\Omega\text{m}$.



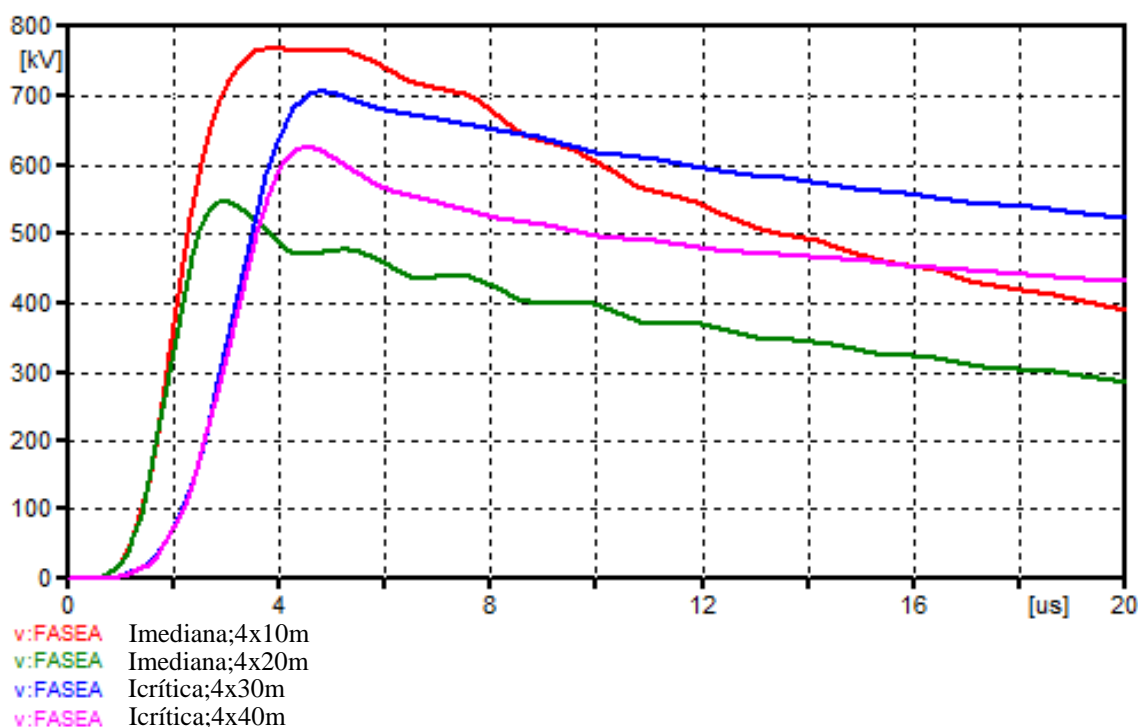
Fonte: Acervo próprio do autor.

A partir da leitura do gráfico, pode-se perceber que as curvas vermelha, verde, azul e rosa representam o caso 1, pois se referem à corrente mediana e as curvas marrom

e cinza ao caso 2, ao se referirem à corrente crítica. Comparando das curvas em ambos os casos, pode-se ver a mudança no comportamento dos gráficos resultantes e a evolução em relação a eficiência do sistema de aterramento em atenuar o valor das sobretensões desenvolvidas, mais explicitamente a mudança na resposta do sistema da curva vermelha em comparação às demais associadas ao caso 1.

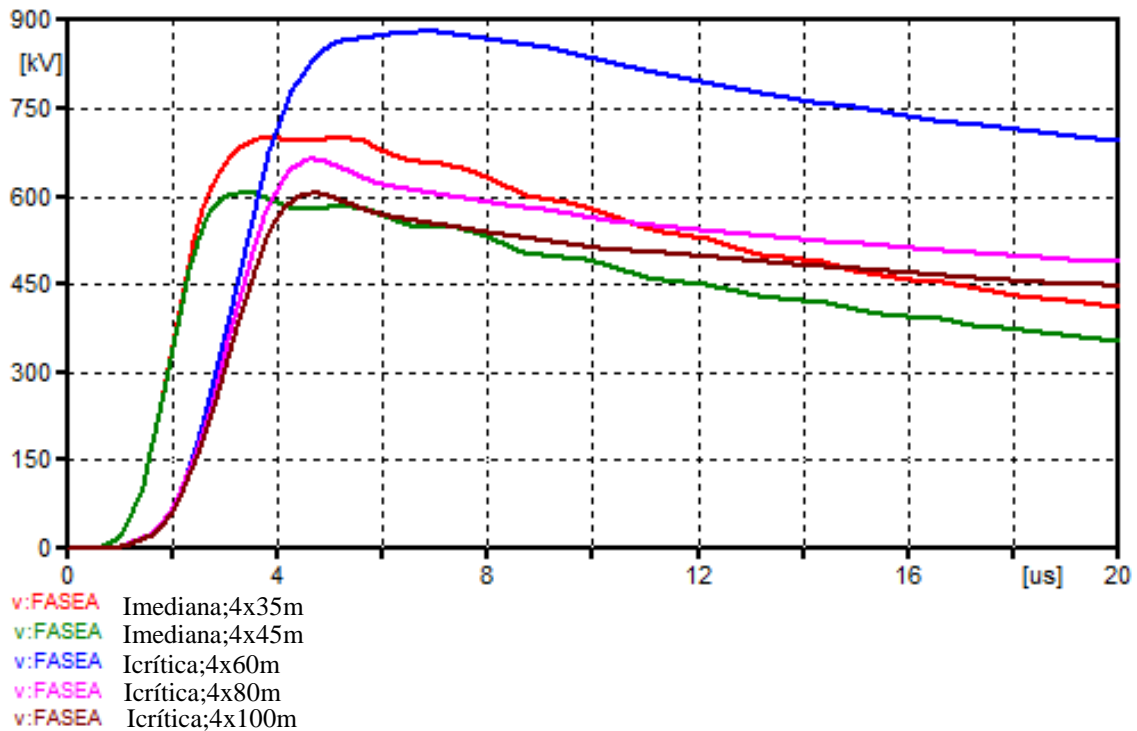
5.7.1.2. $\rho = 1000\Omega\text{m}$

Figura 50 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para $\rho = 1000\Omega\text{m}$.



Fonte: Acervo próprio do autor.

Percebe-se a partir da leitura do gráfico, que as curvas vermelha e verde são associadas ao caso 3, pois se referem à corrente mediana e as curvas azul e rosa ao caso 4, ao se referirem à corrente crítica. Comparando das curvas em ambos os casos, pode-se ver a mudança no comportamento dos gráficos resultantes e a evolução em relação a eficiência do sistema de aterramento em atenuar o valor das sobretensões desenvolvidas, sendo claramente perceptível a diferença do comportamento entre as curvas vermelha e verde, associadas ao caso 3.

5.7.1.3. $\rho = 2500\Omega\text{m}$ Figura 51 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para $\rho = 2500\Omega\text{m}$.

Fonte: Acervo próprio do autor.

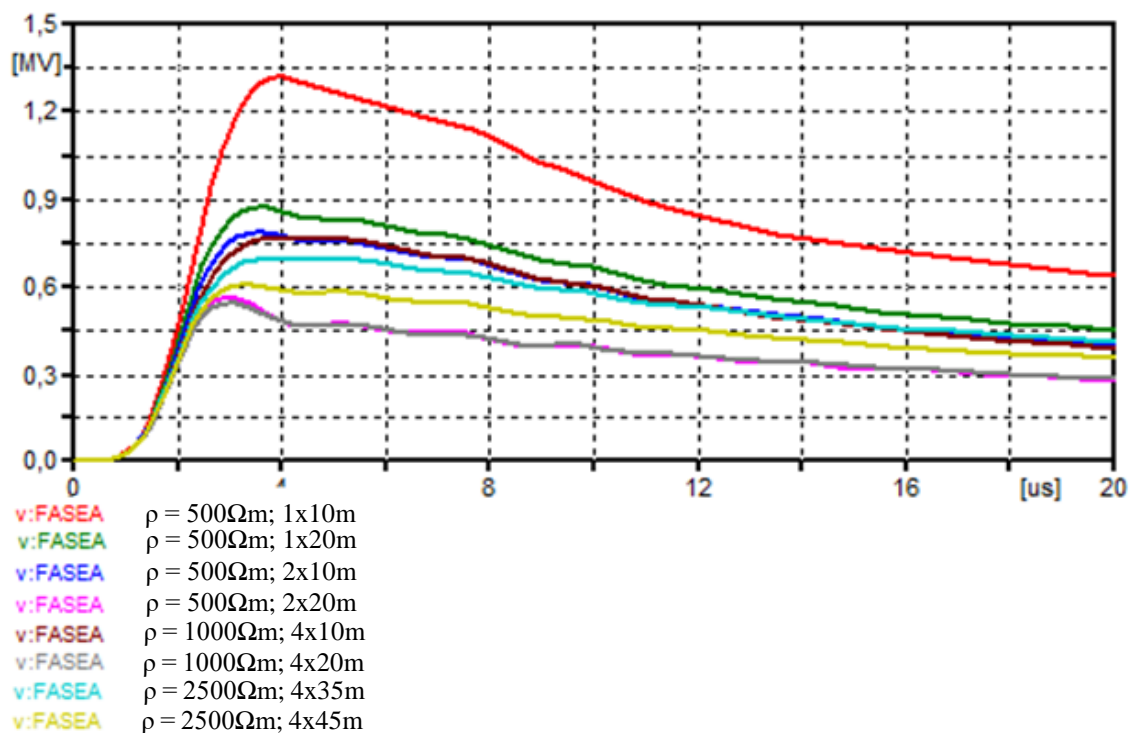
Pode-se constatar, a partir da leitura do gráfico que as curvas vermelha e verde são associadas ao caso 5, pois se referem à corrente mediana e as curvas azul, rosa e marrom ao caso 6, ao se referirem à corrente crítica. Comparando das curvas em ambos os casos, pode-se ver a mudança no comportamento dos gráficos resultantes e a evolução em relação a eficiência do sistema de aterramento em atenuar o valor das sobretensões desenvolvidas, sendo flagrante a diferença do comportamento entre as curvas azul em comparação com a marrom e rosa, associadas ao caso 6.

5.7.2. Sumarização das curvas com iguais correntes de descarga

Para uniformizar a apresentação dos resultados e favorecer a realização das analogias pertinentes, serão apresentados os resultados apenas utilizando arranjos sem associação com hastes de aterramento, pois esta associação foi avaliada apenas no caso 1 e já apresentada. São ilustrados nos gráficos da Figura 52 e Figura 53 os valores referentes apenas a fase A dos circuitos modelados agrupados pelo tipo de corrente.

5.7.2.1. Corrente Mediana ($I_p = 45,3\text{kA}$; $\tau_1 = 5,6\mu\text{s}$; $\tau_2 = 53,5\mu\text{s}$)

Figura 52 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para a Corrente Mediana.



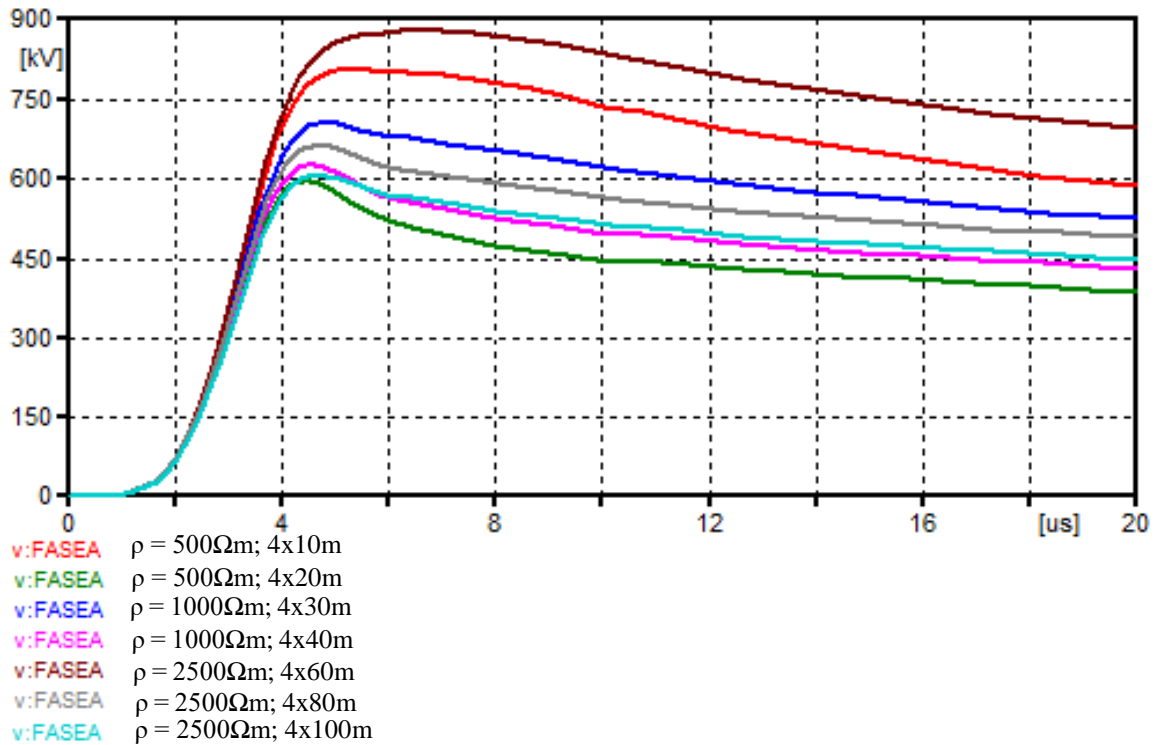
Fonte: Acervo próprio do autor.

A partir da leitura do gráfico, pode-se comparar os resultados estudados nos casos 1, 3 e 5 respectivamente, por se referirem às resistividades de 500, 1000 e 2500 Ωm e corrente mediana. Comparando das curvas associadas a esses três casos, pode-se ver a mudança no comportamento dos gráficos resultantes e a evolução em relação a eficiência do sistema de aterramento em atenuar o valor das sobretensões desenvolvidas, sendo flagrante a diferença do comportamento entre as curvas vermelha em comparação com a

verde, a azul escuro e a rosa, associadas ao caso 1 e as curvas marrom e cinza associadas ao caso 3.

5.7.2.2. Corrente Crítica ($I_p = 85,2\text{kA}$; $\tau_1 = 9,9\mu\text{s}$; $\tau_2 = 145,2\mu\text{s}$)

Figura 53 - Comparação dos comportamentos das topologias testadas para a Corrente Crítica.



Fonte: Acervo próprio do autor.

A partir da visualização do gráfico, pode-se contrastar os resultados estudados nos casos 2, 4 e 6 respectivamente, por se referirem às resistividades de 500, 1000 e 2500 Ωm e corrente crítica. Comparando das curvas associadas a esses três casos, pode-se ver a mudança no comportamento dos gráficos resultantes e a evolução em relação a eficiência do sistema de aterramento em atenuar o valor das sobretensões desenvolvidas, sendo notória a diferença do comportamento entre as curvas vermelha e verde no caso 2 e as curvas marrom em comparação a cinza e a azul clara associadas ao caso 6.

5.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir da visualização dos gráficos da seção anterior pode-se inferir algumas hipóteses. Ao incrementar o comprimento do cabo contrapeso a tensão a que são submetidas as cadeias de isoladores diminui, porém não em relação diretamente proporcional, pois as grandezas envolvidas e sua sensibilidade quanto aos parâmetros não variam na mesma proporção, apesar de serem dependentes entre si.

Ao se utilizar mais de um cabo há um ganho maior que apenas aumentar o comprimento do cabo, pois o resultado utilizando dois cabos de 10 metros se mostra melhor que apenas um cabo de 20 metros e por sua vez utilizar quatro cabos com 10 metros confere um melhor resultado que instalar dois cabos de 20 metros. Assim a impedância “enxergada” pela torre no uso de cabos contrapeso em paralelo é menor que simplesmente acrescer o comprimento do cabo.

Pode-se concluir também que a sensibilidade dos sistemas de aterramento é afetada por todos os parâmetros que variam nos estudos (amplitude da corrente de pico e tempo de subida), pois no caso da corrente crítica não se têm simplesmente o aumento da tensão diretamente proporcional ao aumento da amplitude da corrente, pois também há aumento no valor do tempo de frente, que também influencia diretamente no comportamento da curva e no resultado final.

Na Tabela 4 é exposto o resumo da influência dos diversos fatores estudados na amplitude da sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores da linha (VISACRO FILHO, 2005). Após exposta esta tabela, serão detalhados nas próximas subseções os mecanismos de influência desses parâmetros.

Tabela 4 - Resumo da influência de diversos fatores na amplitude da sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores da linha.

Parâmetro	Variação	Efeito na amplitude da sobretensão na cadeia de isoladores
Impedância de Aterramento	Redução	Redução
Amplitude da corrente de descarga	Redução	Redução na mesma proporção
Tempo de frente da onda de corrente	Redução	Aumento
Impedância de surto da torre	Redução	Redução na mesma proporção

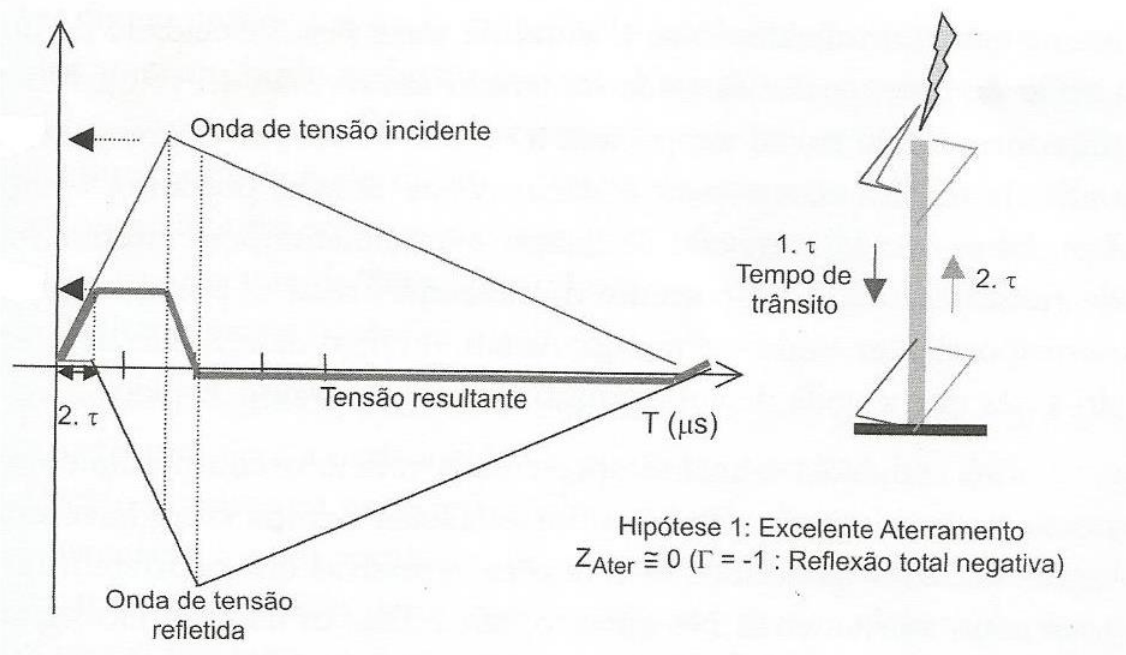
5.8.1. Fatores de influência na amplitude da sobretensão resultante

5.8.1.1. Impedância de aterramento

Ao atingir diretamente o topo da torre, a descarga dá origem a uma onda de corrente que desce pela estrutura em direção ao solo. Para estudar as sobretensões desenvolvidas admite-se que a torre é representada por quatro trechos com impedância de surto Z_{torre} de valor 180Ω . Admite-se que o aterramento conectado à base da torre seja um elemento concentrado, representado por sua impedância (Z_{ater}). A onda de corrente que percorre a torre em direção ao solo está associada a uma onda de tensão. Esta é obtida pela multiplicação da impedância de surto da torre pela onda de corrente. Se o aterramento apresentar um valor de impedância igual àquele da impedância de surto da torre, não há reflexão e a onda de tensão resultante no topo da torre constitui-se na própria onda incidente (VISACRO FILHO, 2005; RAKOV e UMAN, 2003).

Admitindo um aterramento com valor de impedância menor do que a da impedância de surto da torre, quando a onda de tensão alcança o solo, encontra uma descontinuidade de impedância, havendo reflexão negativa naquele ponto. A Figura 54 ilustra tal processo, no caso particular de um valor nulo da impedância de aterramento (caso ideal).

Figura 54 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $Z_{\text{ater}} = 0\Omega$)



Nesse caso, após um tempo de trânsito pela torre (τ), a onda sofre uma reflexão total, em razão do valor nulo da impedância de aterramento. A onda refletida possui a mesma amplitude da onda incidente, mas com sinal contrário, e trafega pela torre até alcançar o topo, após um tempo de trânsito igual ao de descida. A onda de tensão resultante na cadeia dos isoladores é aquela obtida pela superposição das ondas incidente e refletida. Tal onda está indicada em traço mais forte na Figura 54. Percebe-se que, até que a onda refletida alcance o topo, após um intervalo de tempo igual ao dobro do tempo de trânsito (2τ), a onda resultante é idêntica à onda incidente. A partir desse instante, como as duas ondas apresentam a mesma taxa de crescimento, mas sinais contrários, o crescimento da onda é anulado. O valor alcançado em 2τ permanece como a diferença entre as ondas incidente e refletida até que a onda incidente atinja seu valor de pico. A partir desse instante, o valor da tensão começa a decrescer, pois passa a prevalecer o crescimento negativo da onda refletida, havendo redução da amplitude da onda resultante até que a onda refletida também alcance seu valor de pico. Desse ponto em diante, a amplitude da onda resultante se aproxima de zero. Dessa maneira, a repercussão da reflexão negativa da onda de tensão no aterramento promove uma sensível redução na amplitude da sobretensão na cadeia dos isoladores da torre. (VISACRO FILHO, 2005).

Sendo assim, a redução da amplitude da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores é tanto mais pronunciada, quanto menor for a impedância do aterramento da torre. Esta é a justificativa para o desenvolvimento e adoção das simulações apresentadas nesta dissertação, para tentar assegurar uma amplitude elevada da onda negativa de reflexão no aterramento e, assim, uma vigorosa redução na tensão resultante na cadeia de isoladores.

O tempo de trânsito (τ) é também fundamental na definição da amplitude da sobretensão resultante. Ele define o valor da redução da mesma, na medida em que determina o instante em que a onda de tensão incidente tem seu crescimento “grampeado”. Tal intervalo de tempo pode ser aproximadamente calculado dividindo-se a altura da torre pela velocidade de propagação da onda de tensão em direção ao solo. No caso estudado, tal tempo tem a ordem de $0,09 \mu\text{s}$. O grampeamento da onda de tensão ocorre para o dobro deste tempo, portanto, após $0,18 \mu\text{s}$. Verifica-se que tal intervalo de tempo é usualmente bem inferior ao tempo de frente de ondas de corrente de descargas reais e, conseqüentemente, das correspondentes ondas de tensão. Assim, o resultado da reflexão deve ser sentido antes que a onda de sobretensão alcance seu valor de pico (VISACRO FILHO, 2005; RAKOV e UMAN, 2003).

5.8.1.2. Impedância de surto da torre e amplitude da corrente de descarga

Associada à onda de corrente, que se propaga através da torre em direção ao solo, está a onda incidente de tensão. Como indica a equação da qual a onda de tensão incidente é derivada ($V^+ = Z_{\text{torre}} \cdot I^+$), a amplitude da onda de sobretensão incidente é diretamente proporcional tanto à amplitude da corrente, quanto à impedância de surto da torre. Isto posto, existe também, uma relação proporcional entre as amplitudes da sobretensão resultante na cadeia de isoladores e da onda de corrente incidente. Tal relação proporcional se aplica também ao valor da impedância de surto da torre (VISACRO FILHO, 2005) (COORAY, 2004).

5.8.1.3. Tempo de frente da onda de corrente

Outro fator que exerce uma influência significativa na sobretensão resultante na cadeia de isoladores da torre é o tempo de frente da onda de corrente. É uma estimativa plausível assumir que o tempo de frente das ondas incidentes de corrente e tensão sejam iguais, caso se admita a representação da torre por impedâncias de surto. Embora o crescimento de uma onda real de tensão não seja linear em sua frente, é possível aproximar o crescimento médio no intervalo até a ocorrência do pico da onda a partir do quociente entre o valor de crista e o tempo de frente de onda.

Pelas considerações anteriores, já fora evidenciado que a onda de sobretensão apresenta dois estágios de crescimento. O primeiro equivale ao intervalo anterior ao retorno da onda refletida à cadeia de isoladores (2τ). Nesse intervalo o crescimento da onda incidente predomina integralmente. No segundo intervalo (de 2τ até o instante correspondente à crista da onda), o crescimento é resultado da superposição do crescimento das ondas incidente e refletida. Quando se reduz o tempo de frente da onda de sobretensão incidente, há um maior crescimento da onda resultante até o final do intervalo de tempo 2τ , pois este mantém-se fixo, ao mesmo tempo que a onda incidente cresce mais rapidamente. No segundo estágio, não há variação do crescimento com a mudança do tempo de frente, pois o efeito da onda refletida se faz sentir. É o primeiro estágio que define o aumento da sobretensão com a redução do tempo de frente. É por isso, que as ondas de corrente mais rápidas (menor tempo de frente) são consideradas

críticas, pois causam maiores sobretensões (assumindo-se um mesmo valor de crista para a onda de corrente indidente) (BAZELYAN e RAIZER, 2000).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

No cenário atual em que tanto os clientes das empresas concessionárias quanto os órgãos fiscalizadores exigem maiores disponibilidade, confiabilidade e qualidade da energia, procura-se cada vez mais alternativas não-convencionais eficazes para avaliação de desempenho de linhas de transmissão.

Devido ao grande número de descargas atmosféricas que ocorrem ano a ano e provocam desligamentos em linhas de transmissão, este fenômeno natural requer estudos mais profundos sobre suas características e sobre sua influência em sistemas, de forma que eles possam estar adequadamente protegidos para não sofrerem falhas por sua interferência.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo apresentar uma contribuição aos estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, particularmente no que concerne a influência dos sistemas de aterramento no fenômeno do *backflashover*.

A redução da impedância das malhas de aterramento das estruturas de suporte das linhas de transmissão constitui uma importante técnica para a melhoria do seu desempenho quando submetidas a eventos impulsivos. Para alcançar tal objetivo, estudos preliminares realizados ainda na etapa de projeto devem ser apoiados por ferramentas e modelos que expressem adequadamente o evento eletromagnético em questão.

Neste trabalho foram apresentados os resultados de estudos da avaliação da eficiência e dimensionamento de sistemas de aterramento para evitar os desligamentos de uma linha de transmissão provenientes de *backflashovers*, bem como foi realizada uma revisão dos modelos dos elementos envolvidos para a simulação deste fenômeno transitório.

Dentre as contribuições do presente trabalho, pode-se destacar as modelagens dos elementos, tais como a corrente de descarga atmosférica, torre de transmissão, linha de transmissão e sistemas de aterramento, visando os estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência causados por descargas atmosféricas no ATP. Uma vez que estas modelagens são universais, estas podem ser utilizadas para simular diversas situações com diferentes classes de tensão da linha, geometria das linhas,

correntes de descargas com diversas características e variados valores de resistividade do solo, servindo assim como ferramenta de apoio a estudos preliminares, ainda na fase de projeto.

Outra contribuição também não menos importante foi a análise de diversos casos, que comprovou a influência de diversos fatores que influenciam nas sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores das linhas, tais como a impedância de aterramento da torre, amplitude da corrente de descarga, tempo de frente da onda de corrente incidente e impedância de surto da torre.

Através das simulações de transitórios expostos no decorrer do capítulo 5, procurou-se demonstrar que os atuais usos de “topologias padrão” para dimensionamento dos sistemas de aterramento de linhas de transmissão, comumente utilizadas pelas concessionárias, são passíveis de melhorias através do uso de ferramentas computacionais, para assim otimizar o projeto dos sistemas de aterramento.

Devido à natureza probabilística das descargas atmosféricas e dos diferentes valores de resistividade do solo encontrados em diferentes regiões de possíveis instalações de linhas de transmissão, os estudos foram realizados através de várias simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o ATP. Este processo serve para definir a topologia ideal e o dimensionamento adequado de forma a atender o desempenho da linha ao requerido pelo projeto ou legislação em diversas realidades geográficas.

Considerando uma linha de 138 kV típica, foram realizadas diversas simulações variando os valores dos parâmetros da corrente da descarga atmosférica e da resistividade do solo. Os resultados comprovam que, para os casos estudados, ao aumentar o comprimento do cabo contrapeso, reduz-se a impedância de aterramento das torres e consequentemente atenua-se as sobretensões nos isoladores.

Também foi verificado, que à medida que o comprimento dos cabos contrapeso aumenta, a influência das hastes de aterramento torna-se insignificante, corroborando assim as configurações usuais aplicadas às linhas de transmissão, pois estas não apresentam tais associações.

Em suma, conclui-se que, para os casos analisados, as linhas de transmissão precisam ter o comprimento dos cabos contrapeso aumentados quando expostas a correntes de descarga com altos valores de amplitude e/ou instaladas em locais com solos que apresentam alta resistividade, para se atingir o objetivo de redução dos desligamentos em decorrência de backflashover.

De forma geral, espera-se que os resultados obtidos através deste projeto possam ser úteis para as concessionárias de energia, no sentido de proporcionarem melhorias nos sistemas de proteção contra surtos e reduzirem a quantidade de danos nos equipamentos dos sistemas elétricos de potência e dos consumidores finais.

6.2.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a experiência adquirida ao longo deste trabalho alguns aspectos de relevância foram observados. Esses podem subsidiar trabalhos futuros, citando-se:

- Inclusão da estratificação do solo conferindo maior generalidade às análises e por ser esta uma condição normalmente encontrada;
- Inclusão dos efeitos não lineares relacionadas à ionização do solo;
- Considerar a variação da permissividade e resistividade do solo com a frequência;
- Modelagem do canal de descarga, computando os efeitos de indução nos eletrodos de aterramento e cabos condutores;
- Determinação dos limites de aplicação da diminuição da impedância de aterramento como técnica para melhoria de desempenho das linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas;
- Verificar a utilização de elementos lineares como capacitores e não lineares como para-raios ou centelhadores associados aos sistemas de aterramento;
- Avaliar a viabilidade técnico-econômica da solução proposta neste trabalho para uma linha de transmissão real, operada por alguma concessionária de transmissão de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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: 10/11/2016.

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.

ALÍPIO, R. S. et al. A discussion of circuit equivalents of a vertical ground rod. **Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing and 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects (GROUND' 2008 and 3rd LPE)**, Florianópolis, Brasil, novembro 2008.

ARAÚJO, A. R. J.; KUROKAWA, S. Um tutorial sobre modelos de torres de linhas de transmissão utilizados nas análises de backflashovers. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Natal, 2016.

BAZELYAN, E. M.; RAIZER, Y. P. **Lightning Physics and Lightning Protection**. Bristol: IOP, 2000.

BERARDO, B. L. **ESTUDO DO ATERRAMENTO DOS PÉS DE TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. 2012. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista., Bauru, 2012.

BRANIN, F. H. J. Computer methods of network analysis. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, 55, 1967. 1787-1801.

CHANAKA, M.; SHANTHI, K.; PERERA, R. Modeling of power transmission lines for lightning back flashover analysis (A case study: 220 kV Biyagama-Kotmale transmission line). **Proc. 6th International Conference on Industrial and Information Systems**

(**ICHS 2011**), Peradeniya, Sri Lanka, agosto 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6038099/>>. Acesso em: 10/11/2016.

CHISHOLM, W. A.; CHOW, Y. L.; SRIVASTAVA, K. D. Lightning Surge Response of Transmission Towers. **IEEE Trans.**, PAS-102, 1983. 3232-3242. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4112337/>>. Acesso em: 15/10/2016.

COORAY, G. V. **The Lightning Flash**. IEEE, 2004.

CUNHA, L. V. **DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA NA RUPTURA A MEIO DE VÃO**. 2010. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

D'AJUZ, A. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento**. EDUFF, 1987.

DOMMEL, H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, PAS-88, 1969. 388-399.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above**. Palo Alto, 1982.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015** – Rio de Janeiro: EPE, 2016

GATTANEO, S.; GERI, A.; VECA, G. M. Transient Behaviour of Grounding Systems Simulation: Remarks on the EMTP's and special code's use. **Proceedings of the 21st EMTP Users Group Meeting**, 1992.

GOLDE, R. H. **Lightning**. Academic Press Inc., 1977.

GRCEV, L.; ARNAUTOVSKI-TOSEVA, V. Grounding systems modeling for high frequencies. **Proceedings of the IEEE Bologna Powertech Conference**, Bolonha, Junho 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1304516/>>. Acesso em: 18/11/2016.

GRCEV, L.; POPOV, M. On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod. **IEEE Transactions on power delivery**, 2, abril 2005. 1598-1603. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1413431/>>. Acesso em: 18/11/2016.

HASBROUCK, R. T. **Lightning: Understanding it and Protecting Systems from its Effects**. Lawrence Livermore National Laboratories, 1989.

HATZIARGYROU, N. D.; LORENTZOU, M. I. Grounding system design using emtp. **23rd european emtp users group meeting**, 1997. Disponível em: <<http://publicationslist.org.s3.amazonaws.com/data/maria.lorentzou/ref-13/EEUG97.pdf>>. Acesso em: 22/11/2016.

HEIDLER, F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP - Berechnung. **Proceedings of 18th ICLP**, Munich, Sept. 1985. 63-66.

HEILMANN, E. A.; SCHNEIDER JR, B.; SCHNEIDER, F. K. **O CAMPO ELÉTRICO TERRESTRE, SUA MEDIÇÃO, E A INFLUÊNCIA DAS TEMPESTADES**, Curitiba, 17 out. 2012. Disponível em: <<http://conferencias.utfpr.edu.br/ocs/index.php/sicite/2012/paper/viewFile/1019/464>>. Acesso em: 22/11/2016.

HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. North Carolina: CRC Press, 1999.

KINDERMAN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Editora Sagra;DCLuzzatto, 1995.

KINDERMANN, G. **Descargas Atmosféricas**. Sagra-DC Luzzato Editores, 1992.

KING, K. **Handbook for improving overhead transmission line lightning performance**. 2004.

LIMA, A. B. **MÉTODO PARA CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE MALHAS DE ATERRAMENTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**, 2010. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MARTINEZ, J. A.; CASTRO-ARANDA, F. Tower Modeling for Lightning Analysis of Overhead Transmission Lines. **Power Engineering Society General Meeting**, junho 2005. 1212-1217.

MASTER, M.; UMAN, M. A. Electric and Magnetic Field Associated with Establishing a Finite Electrostatic Dipole: A Exercise in the Solution of Maxwell's Equation. **Am. J.**, 1983. 118-126.

NOGUEIRA, P. J. C. **INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO NA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA DE ATERRAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**, 2002. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

NUCCI, C. A. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines - Part III: Sensitivity Analysis. **CIGRÉ WG 33.01**, Bolonha, Sept 2000.

PAUL, C., **Analysis of Multiconductor Transmission Lines**. Wiley & Sons, 2007.

PINHEIRO, F. H. C. **ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA-TENSÃO NA PRESENÇA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**, 2008. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2008.

PORTELA, C. M. **Regimes Transitórios**. COPPE/UFRJ, v. 1 - 4, 1983.

PORTELA, C.; SALARI, J. C.; AZEVEDO, R. M. An efficient modeling of transmission lines towers and grounding systems for lightning propagation studies. **IX International Symposium on Lightning Protection**, Foz do Iguaçu, Novembro. 2007.

RAKOV, R. A.; UMAN, M. A. **Lightning Physics and Effects**. Cambridge University Press, 2003.

RAKOV, V. A. The Physics of Lightning. **Surv Geophys**, 2013.

ROUSSEAU, A.; GRUET, P. P. Practical high frequency measurement of a lightning earthing system. **Proceedings of International Conference on Lightning Protection (ICPL)**, Saint Malo, França, Setembro 2004.

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.

SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. New York: Dover Publ., 1949.

UMAN, M. A. **The lightning Discharge**. Academic Press Inc., 1987.

VIANA, J. C. C. **ESTUDO DE APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZNO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO EM REGIÕES DE NÍVEL CERÁUNICO E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO ELEVADOS**. 2009. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

VIEMEISTER, P. E. **The Nature of Lightning and How to Protect Yourself from It**. Doubleday & Company Inc., 1972.

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

VISACRO, S.; SOARES JR, A.; SCHROEDER, M. A. O.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; SOUSA, V. J.. Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at morro do cachimbo station. **Journal of geophysical research**, 2004. v. 109, n. D1, p. D01105. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003JD003662>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

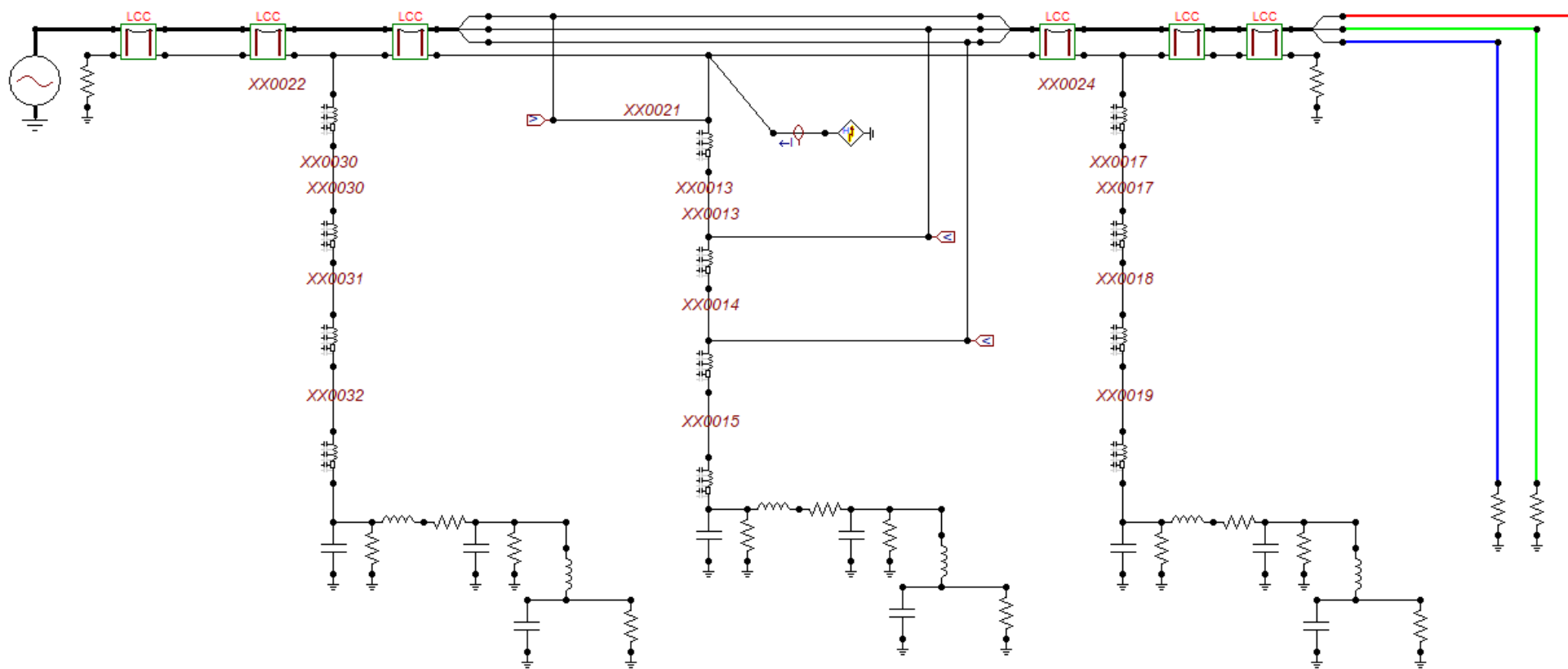
VISACRO FILHO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

VISACRO FILHO, S. Comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Transactions on power delivery**, 22, 2007. 381-386.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo. 2003.

ANEXO A – DISPOSITIVOS, PARÂMETROS E CIRCUITOS UTILIZADOS NO ATP

Figura 55 - Circuito elétrico base implementado no ATPDRAW



I. Fonte de tensão trifásica (138 kV AC)

Figura 56 – Dispositivo representativo da Fonte de Tensão Trifásica no ATPDRAW



Figura 57 – Tela de entrada de parâmetros da Fonte de Tensão Trifásica no ATPDRAW

Component: AC3PH

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Volt	138000
f	Hz	60
pha	Deg/Rad	0
A1		0
T start	s	0
T stop	s	1

NODE	PHASE	NAME
AC3	ABC	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source
 Current
 Voltage

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

II. Linha de Transmissão (Vão entre torres)

Figura 58 – Dispositivo representativo da Linha de Transmissão no ATPDRAW

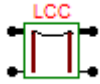


Figura 59 – Tela de configuração do modelo da Linha de Transmissão no ATPDRAW

Line/Cable Data: Lcc1

Model Data Nodes

System type
 Overhead Line #Ph: 4

Transposed
 Auto bundling
 Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix

Units
 Metric
 English

Standard data
 Rho [ohm*m] 500
 Freq. init [Hz] 200e3
 Length [km] 0.3
 Set length in icon

Model Type
 Bergeron
 PI
 JMarti
 Semlyen
 Noda

Comment: Order: 0 Label: Hide

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 60 – Tela de entrada de parâmetros elétricos e geométricos da Linha de Transmissão no ATPDRAW

Line/Cable Data: Lcc1

Model Data Nodes

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.2976	0.9155	0.2032	3.2	21.65	14.65
2	2	0.2976	0.9155	0.2032	-3.2	19.75	12.75
3	3	0.2976	0.9155	0.2032	3.2	17.85	10.85
4	4	0	0.476	3.81	0	25.1	21.1

III. Impedância de Surto do Trecho da Torre (Trecho Topo da Torre -> Fase A)

Figura 61 – Dispositivo representativo da Impedância de Surto (modelada por uma linha de transmissão sem perdas) no ATPDRAW



Figura 62 – Tela de entrada de parâmetros da Impedância de Surto no ATPDRAW

Component: LINEZT_1 ✕

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R/l	Ohm/m	0	From	1	
Z		180	To	1	
v		280000000			

entire data grid

 Order:
 Label:

Comment:

Lines

Length [m]

Output ▾

ILINE
 L', C'
 Z, v
 Z, tau

Conductance
 G=0
 G=R*C/L

Hide
 \$Vintage.1

IV. Fonte de Corrente da Descarga Elétrica

Figura 63 – Dispositivo representativo da Fonte de Corrente da Descarga Elétrica (modelada pela função de Heidler) no ATPDRAW



Figura 64 – Tela de entrada de parâmetros da Fonte de Corrente de Descarga no ATPDRAW

Component: HEIDLER

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Ampere	45000
T _f	s	5.6E-6
tau	s	6.5E-5
n		5
Tstart	s	0
Tstop	s	1

NODE	PHASE	NAME
HEI	1	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

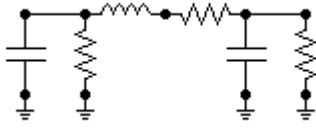
Type of source
 Current
 Voltage

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

V. Célula de Cabo Contrapeso (exemplo com $l = 1m$)

Figura 65 – Dispositivo representativo da Célula de Cabo Contrapeso no ATPDRAW



Cabo aço cobreado 4 AWG

$$\rho_c = 0,294\Omega.m$$

$$r = 0,02595m$$

$$h = 0,6m$$

$$l = 1m$$

Capacitor

Figura 66 – Tela de entrada de parâmetros do Capacitor no ATPDRAW

Component: CAP_RS					
Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C	μF	0.001819556	From	1	
Ks	Damp 0.1-0.2	0	To	1	

Resistor (paralelo)

Figura 67 – Tela de entrada de parâmetros do Resistor no ATPDRAW

Component: RESISTOR					
Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RES	Ohm	260.394819	From	1	
			To	1	

Indutor

Figura 68 – Tela de entrada de parâmetros do Indutor no ATPDRAW

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
L	mH	0.257196543
Kp	Damp. 5-10	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	××0007
To	1	××0006

Resistor (série)

Figura 69 – Tela de entrada de parâmetros do Resistor no ATPDRAW

Component: RESISTOR

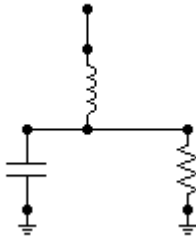
Attributes

DATA	UNIT	VALUE
RES	Ohm	13.89705363

NODE	PHASE	NAME
From	1	××0009
To	1	××0008

VI. Haste de Aterramento (exemplo 5/8''x2,4m)

Figura 70 – Dispositivo representativo da Haste de Aterramento no ATPDRAW



Indutor

Figura 71 – Tela de entrada de parâmetros do Indutor no ATPDRAW

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
L	mH	0.001425734	From	1	
Kp	Damp. 5-10	0	To	1	

Capacitor

Figura 72 – Tela de entrada de parâmetros do Capacitor no ATPDRAW

Component: CAP_RS

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C	μ F	0.000153168	From	1	
Ks	Damp 0.1-0.2	0	To	1	

Resistor

Figura 73 – Tela de entrada de parâmetros do Resistor no ATPDRAW

Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RES	Ohm	288.8977783	From	1	
			To	1	

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NOS ANAIS DO II CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS

AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA REDUÇÃO DE DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR *BACKFLASHOVER*

Felipe Vasconcellos; Fernando Moreira

Departamento de Engenharia Elétrica da UFBA, felipe.vasconcellos@ufba.com.br

Departamento de Engenharia Elétrica da UFBA, moreiraf@ufba.br

Introdução

As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de perturbações causadas em linhas de transmissão no Brasil, gerando sobretensões nas linhas de transmissão que podem levá-las ao seu desligamento. As faltas causadas por descargas atmosféricas causam sérios danos em componentes das linhas, a exemplo das cadeias de isoladores, além de problemas de estabilidade e *blackouts* (VISACRO FILHO, 2005).

Quando a descarga atmosférica atinge o cabo-guarda ou a torre, a intensidade do campo elétrico em torno da estrutura da torre se eleva significativamente. A partir de um dado instante, o campo elétrico em torno da estrutura pode atingir um valor crítico, causando o rompimento da rigidez dielétrica do ar, gerando um arco elétrico entre o cabo-guarda e a fase ou entre a torre e a fase, denominado de *backflashover*.

Os *backflashovers* exercem importante influência no desempenho de um sistema de transmissão, pois se estima que entre 40% a 70% dos desligamentos de linhas de transmissão são provocadas por tal fenômeno (SHUWEN, et al., 2011).

Assim, neste trabalho serão simulados e avaliados os efeitos da variação das características da corrente de descarga e da resistividade do solo no dimensionamento dos sistemas de aterramento das torres de uma linha de 138 kV com o objetivo de manter os níveis de sobretensão nas cadeias de isoladores da torre dentro do valor mínimo do Nível Básico de Isolamento (650 kV para essa classe de tensão) e evitar assim a disrupção sobre a cadeia de isoladores.

Metodologia

A análise do desempenho dos sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas se inicia pela modelagem adequada de cada elemento (torre de transmissão, linha de transmissão, sistema de aterramento, corrente da descarga atmosférica) considerando os aspectos transitórios inerentes ao fenômeno.

A descarga atmosférica foi representada utilizando-se uma fonte de corrente conforme modelo proposto por Heidler (HEIDLER, et al., 1999), disponível no ATPDraw como uma fonte de corrente tipo 15.

A torre foi modelada por linhas sem perdas. Nesse modelo a torre de transmissão é composta por linhas curtas sem perdas que representam a impedância de cada trecho da torre. Por sua vez esses valores são calculados em função das dimensões e configurações das torres.

Os vãos da linha de transmissão foram modelados pelo modelo de linha de transmissão Bergeron do ATP, considerando-se parâmetros distribuídos a frequência constante, linha não

transposta e efeito pelicular. Para o cálculo dos parâmetros são utilizados os dados físicos de cada um dos cabos, tais como: posição física relativa, diâmetro e resistência ôhmica.

O sistema de aterramento das torres de transmissão é composto por todos os elementos metálicos que compõem a torre e que mantém contato com o solo ou com as fundações e qualquer dispositivo de aterramento, tais como: hastes de aterramento, anéis horizontais, contrapesos, ou ainda qualquer combinação destes que estejam enterrados no solo. (KINDERMANN, et al.).

O modelo elétrico do condutor contrapeso será o modelo π , cujos valores dos parâmetros são obtidos por meio das formulações de Sunde (SUNDE, 1949). Cada célula de circuito π utilizado representa uma seção do cabo contrapeso. A representação generalizada do condutor contrapeso utilizada nas simulações é modelada por n células idênticas, correspondentes cada uma a um metro do referido condutor. O modelo elétrico da haste de aterramento é o proposto por Sunde (SUNDE, 1949).

Nas simulações a corrente de descarga incidirá diretamente no topo da torre central, considerando duas torres adjacentes e com dois “tipos” de corrente de descargas, resultado de medições na estação de Morro do Cachimbo-MG (VISACRO *et al.*, 2004).

A torre adotada nas análises tem uma configuração padrão para linhas de 138 kV circuito simples, sua altura é de 25,1 metros com impedância de surto de 180 Ω , nos seus quatro trechos que mede, respectivamente: 3,45; 1,90; 1,90 e 17,85 metros. A velocidade de propagação da onda de surto é de 280 Mm/s.

Foi considerada uma linha de transmissão com uma das suas extremidades conectada a uma fonte de tensão de 138 kV entre fases e implementada com comprimento de 20 km nas torres das extremidades para simular uma linha de transmissão infinita (neste caso, as reflexões não retornam antes do fim do tempo total de estudo, não afetando os resultados porque só há interesse nas sobretensões máximas).

Foram adotados os valores de permissividade dielétrica relativa igual a 10 e permeabilidade relativa igual a um para as simulações (LIMA, 2010).

Resultados e discussão

Neste item serão analisadas as amplitudes das sobretensões que determinam a ocorrência de interrupções devido ao fenômeno de backflashover e a análise da influência dos arranjos de aterramento nessas ocorrências. Em todos os casos o objetivo é alcançar os arranjos de aterramento suficientes para garantir que as sobretensões nos isoladores estejam abaixo de 650 kV.

Caso 1: Corrente de Descarga com amplitude de 45,3 kA, tempo de frente de 5,6 μ s, tempo de cauda de 53,5 μ s e resistividade de 500 Ω .m:

Foram testadas duas topologias utilizando apenas hastes de aterramento de 3/4’’x1,5m e 5/8’’x2,4m, com resultados de respectivamente 3500 kV e 3000 kV. Como os resultados não foram satisfatórios em relação ao objetivo, foram incrementadas as topologias para o uso de cabo contrapeso de aço-cobre 4 AWG, enterrados a 60cm da superfície do solo, no sentido longitudinal da linha conectados ao pé da torre e associados a hastes de aterramento ou não.

Foram comparados os resultados da associação de 1m de cabo contrapeso com a haste de 5/8’’x2,4m e 1m de cabo contrapeso apenas, para avaliar a eficiência da associação. As sobretensões máximas foram de 2500 kV e 2650 kV, respectivamente. A partir de 10 metros de cabo contrapeso, a influência da haste

passa a ser desprezível, pois em ambos os casos foram medidas sobretensões de 1300 kV, então a partir desta simulação, foi descartado o uso de tal associação. Por último foram comparados os resultados de uma topologia com um cabo contrapeso de 20m e outra utilizando

dois cabos conectados a dois pés da torre, com resultados de 900 kV e 565 kV respectivamente, sendo o último eficaz para a proteção da linha em relação ao fenômeno do *backflashover*.

Caso 2: Corrente de Descarga com amplitude de 85,2 kA, tempo de frente de 9,9 μ s, tempo de cauda de 145,2 μ s e resistividade de 500 Ω .m:

Em função da relação diretamente proporcional da corrente de descarga e dos valores de sobretensão, as simulações já se iniciaram com um sistema mais robusto do aterramento Utilizando um arranjo composto de quatro cabos contrapeso conectados a cada pé da torre. Assim sendo, foram simulados duas situações com 4x20m e 4x10m. Resultou-se, respectivamente, em 600kV e 800kV de tensão máxima. Assim sendo, a primeira topologia foi suficiente para evitar a descarga disruptiva de retorno.

Caso 3: Corrente de Descarga com amplitude de 45,3 kA, tempo de frente de 5,6 μ s, tempo de cauda de 53,5 μ s e resistividade de 1000 Ω .m:

Utilizando as mesmas configurações de 4x10 e 4x20, resultou-se em 750kV e 550kV, respectivamente. Deste modo, o último arranjo eficaz para proteger a linha da disrupção na cadeia de isoladores.

Caso 4: Corrente de Descarga com amplitude de 85,2 kA, tempo de frente de 9,9 μ s, tempo de cauda de 145,2 μ s e resistividade de 1000 Ω .m:

Sendo esse o caso mais crítico, os estudos já principiam utilizando a mesma topologia com quatro cabos, porém com arranjos de 4x40m e 4x30m, sendo os resultados, respectivamente, 630kV e 720kV. Desta forma, o primeiro arranjo se faz necessário para evitar o desligamento por *backflashover*.

Conclusões

Considerando uma linha de 138 kV típica, foram realizadas diversas simulações variando os valores dos parâmetros da corrente da descarga atmosférica e da resistividade do solo. Os resultados comprovam que, para os casos estudados, ao aumentar o comprimento do cabo contrapeso, reduz-se a impedância de aterramento das torres e conseqüentemente atenua-se as sobretensões nos isoladores.

Também foi verificado, que à medida que o comprimento dos cabos contrapeso aumenta, a influência das hastes de aterramento torna-se insignificante, corroborando assim as configurações usuais das concessionárias de energia, pois estas não apresentam tais associações.

Palavras-Chave: Descargas Atmosféricas; Backflashover; Sistemas de Aterramento; ATP; Desempenho de Linhas de Transmissão.

Referências

BABA, Y. e ISHII, M. 1999. Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2, abril de 1999, Vol. 14, pp. 630-635.

CHISHOLM, W. A., CHOW, Y. L. e SRIVASTAVA, K. D. 1983. Lightning Surge Response of Transmission Towers. *IEEE Trans.* 1983, Vols. PAS-102, pp. 3232-3242.

HEIDLER, F., CVETIC, J. M. e STANIC, B. V. 1999. Calculation of lightning current parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2, abril de 1999, Vol. 14, pp. 399-404.

KINDERMAN, G. e CAMPAGNOLO, J.M. 1995. *Aterramento Elétrico*. Porto Alegre : Editora Sagra;DCLuzzatto, 1995.

LIMA, A. B. 2010. *MÉTODO PARA CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE MALHAS DE ATERRAMENTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil : s.n., Setembro de 2010.

MOTOYAMA, H. e MATSUBARA, H. 2000. Analytical and experimental study on surge response of transmission tower. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2, abril de 2000, Vol. 15, pp. 812-819.

SHUWEN, W. e WENXIN, S. 2011. Back flashover protection performance analysis of 220 kV double circuit transmission line. *Proc. Power and Energy Engineering Conferece (APPEEC)*. Março de 2011.

SUNDE, E. D. 1949. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. New York : Dover Publ., 1949.

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

APÊNDICE B – ARTIGO ACEITO NA XII CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de uma Linha de Transmissão de 138 kV por *Backflashover*

Felipe Mendes de Vasconcellos, Fernando Augusto Moreira
Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, UFBA, Salvador, BA, Brasil
felipe.vasconcellos@ufba.br, moreiraf@ufba.br

Resumo — As descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão são uma das principais causas dos desligamentos repentinos no sistema de transmissão de energia. Quando uma descarga atmosférica atinge o cabo para-raios ou diretamente a torre, pode ocorrer um *backflashover*. Esse fenômeno consiste em um arco elétrico entre a cadeia de isoladores e os condutores de fase da linha. Este trabalho apresenta diversas simulações desenvolvidas com a utilização do *software* ATP para avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores em uma linha de 138kV quando atingida por uma descarga atmosférica direta na torre. A partir dos resultados das sobretensões envolvidas é feita a avaliação da eficiência e o dimensionamento de diversos arranjos do sistema de aterramento para assim reduzir as ocorrências de interrupção do fornecimento de energia elétrica por *backflashover*.

Palavras-chaves — Descargas Atmosféricas, Desligamentos, Sistemas de Aterramento, *Backflashover*, ATP, Desempenho de Linhas de Transmissão, Sobretensões.

I. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de perturbações causadas em linhas de transmissão no Brasil, gerando sobretensões nas linhas de transmissão que podem levá-las ao seu desligamento. As faltas causadas por descargas atmosféricas causam sérios danos em componentes das linhas, a exemplo das cadeias de isoladores, além de problemas de estabilidade e *blackouts*[1].

As descargas atmosféricas quando atingem diretamente uma fase da linha produzem uma sobretensão ao longo desta, com possibilidade de disrupção ao longo da cadeia de isoladores. Os cabos de blindagem desempenham a função de proteção contra desligamentos de linha devido ao fenômeno de *flashover*, ao evitar a ocorrência da descarga atmosférica diretamente sobre os cabos fase. [1]. Os cabos de blindagem são conectados à terra a partir de estruturas aterradas que são, geralmente, as torres de transmissão.

Quando a descarga atmosférica atinge o cabo-guarda ou a torre, a intensidade do campo elétrico em torno da estrutura da torre se eleva significativamente. A partir de um dado instante, o campo elétrico em torno da estrutura pode atingir um valor crítico, causando o rompimento da rigidez dielétrica do ar, gerando um arco elétrico entre o cabo-guarda e a fase ou entre a torre e a fase, denominado de *backflashover*. Os *backflashovers* exercem importante influência no desempenho de um sistema de transmissão, pois se estima que entre 40% a 70% dos desligamentos de linhas de transmissão são provocadas por tal fenômeno [2]. Para reduzir a ocorrência de *backflashovers*, é necessário dimensionar corretamente a estrutura da torre, prever a instalação de cabos-guarda e garantir a eficiência do sistema de aterramento da linha de transmissão. As sobretensões dependem basicamente da impedância de surto da torre, da impedância dos sistemas de aterramento e da descarga incidente [3]-[5].

Dada a importância do fornecimento ininterrupto de energia e ao grande valor financeiro associado à queima dos equipamentos presentes no sistema elétrico, é imprescindível investir no desenvolvimento de um estudo detalhado do impacto de descargas atmosféricas em sistemas de energia elétrica, buscando uma perfeita adequação dos níveis básicos de isolamentos dos equipamentos. Normalmente, um estudo dessa magnitude envolve intensos cálculos matemáticos e tem sido realizado com auxílio de programas computacionais que trabalham no domínio do tempo, como o ATP (Alternative Transients Program). Assim, neste trabalho serão avaliados os efeitos da variação das características da corrente de descarga e da resistividade do solo no dimensionamento dos sistemas de aterramento das torres de uma linha de 138 kV com o objetivo de manter os níveis de sobretensão nas cadeias de isoladores da torre dentro do valor mínimo do Nível Básico de Isolamento (NBI), que é de 650 kV para essa classe de tensão, e evitar assim a disrupção sobre a cadeia de isoladores.

II. MODELAGEM DOS ELEMENTOS

A análise do desempenho dos sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas se inicia pela modelagem adequada de cada elemento (torre de transmissão, linha de transmissão, sistema de aterramento, corrente da descarga atmosférica) considerando os aspectos transitórios inerentes ao fenômeno. Assim, nesta seção será feita uma apresentação sobre os modelos dos elementos citados anteriormente e que foram utilizados nas simulações computacionais objeto deste trabalho.

A. Corrente da Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica foi representada utilizando-se uma fonte de corrente conforme modelo proposto por Heidler[6], disponível no ATPDraw e definida por:

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (1)$$

onde:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right] \quad (2)$$

e:

I_0 = É a amplitude da corrente de descarga atmosférica (kA);

τ_1 = Constante de tempo de frente de onda (μ s);

τ_2 = Constante de tempo de decaimento da onda (μ s);

η = Fator de correção da amplitude;

n = Fator de inclinação da corrente.

Para ilustrar o comportamento da função de Heidler, exposta anteriormente, é apresentado um exemplo a partir da Fig. 1, cujos valores utilizados foram $I_0 = 45,2$ kA; $\tau_1 = 5,6$ μ s; $\tau_2 = 53,5$ μ s; $\eta = 1$ e $n = 5$. O fator n é estrategicamente escolhido para que, em função de $\tau_2/\tau_1 \gg 1$, garanta-se o valor de $\eta \approx 1$ [6]. Esses mesmos valores dos parâmetros n e η , foram utilizados em todas as simulações deste trabalho.

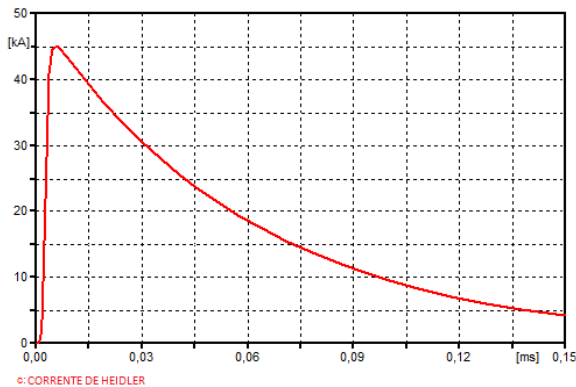


Fig. 1. Comportamento de um exemplo utilizando a função de Heidler.

A. Torres de Transmissão

A torre foi modelada por linhas sem perdas. Nesse modelo a torre de transmissão é composta por linhas curtas sem perdas que representam a impedância de cada trecho da torre. Por sua vez esses valores são calculados em função das dimensões e configurações das torres. O modelo está representado na Fig. 2 [7].

B. Linha de Transmissão

Os vãos da linha de transmissão foram modelados pelo modelo de linha de transmissão Bergeron do ATP, considerando-se parâmetros distribuídos a frequência constante, linha não transposta e efeito pelicular. O acoplamento entre todos os cabos modelados é inerente ao modelo. Para o cálculo dos parâmetros são utilizados os dados físicos de cada um dos cabos, tais como: posição física relativa, diâmetro e resistência ôhmica.

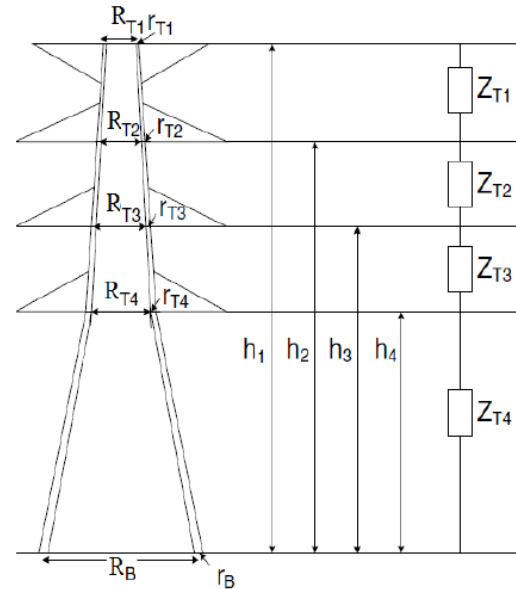


Fig. 2. Modelo da torre de transmissão por linhas sem perdas.

C. Sistema de Aterramento

O sistema de aterramento das torres de transmissão é composto por todos os elementos metálicos que compõem a torre e que mantém contato com o solo ou com as fundações, inclusive vergalhões, grelhas, parafusos, etc. e qualquer dispositivo de aterramento, tais como: hastes de aterramento, anéis horizontais, contrapesos, ou ainda qualquer combinação destes que estejam enterrados no solo. A resistividade do solo é uma das principais responsáveis pelo desempenho do sistema de aterramento de uma linha de transmissão, sendo este influenciado pelos seguintes fatores: tipo de solo, teor de umidade, temperatura, composição química, concentração dos sais da água retida, estratificação e compactação do solo [8]. As torres de uma linha de transmissão devem ser aterradas de maneira a tornar a impedância de aterramento compatível com o desempenho desejado e a segurança de terceiros.

i. Cabo de Aterramento ou Contrapeso

O modelo elétrico do condutor contrapeso será o modelo π , cujos valores dos parâmetros são obtidos por meio das formulações de Sunde [9]:

$$R = \frac{l}{\pi \cdot r^2} \cdot \rho_c \quad (3)$$

$$G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (4)$$

$$C = 2\pi \cdot \epsilon \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu \cdot l}{\alpha} \left[\ln \frac{2l}{\alpha} - 1 \right] \quad (6)$$

Em que:

- R - É a resistência do condutor contrapeso (Ω);
- G - É a condutância do condutor contrapeso (Ω^{-1});
- C - É a capacitância do condutor contrapeso (F);
- L - É a indutância do condutor contrapeso (H);
- ρ_c - É a resistividade do condutor contrapeso ($\Omega \cdot m$);
- ρ - É a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);
- l - É o comprimento do condutor contrapeso (m);
- r - É o raio do condutor contrapeso (m);
- α - É $\sqrt{2 \cdot r \cdot h}$ (m);
- h - É a profundidade em que ficará enterrado o condutor contrapeso (m);
- μ - É a permeabilidade magnética do solo (considerada igual à do ar) (H/m);
- ε - É a permissividade dielétrica do solo (F/m).

Cada célula de circuito π utilizado representa uma seção do cabo contrapeso, conforme ilustrado na Fig. 3. A representação generalizada do condutor contrapeso utilizada nas simulações é modelada por n células idênticas, correspondentes cada uma a um metro do referido condutor, como visto na Fig. 4 [10].

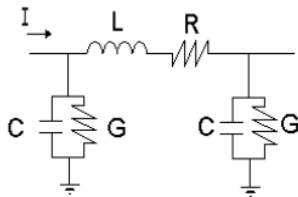


Fig. 3. Modelo de uma célula do cabo contrapeso [10].

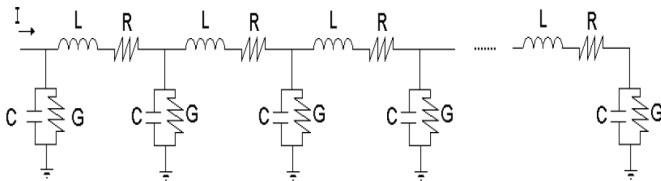


Fig. 4. Representação generalizada do condutor contrapeso [10].

ii. Haste de Aterramento

O modelo elétrico da haste de aterramento é o proposto por Sunde [9], conforme a Fig. 5, cujos valores dos parâmetros são obtidos por meio das seguintes equações:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right] \quad (7)$$

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot l \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$L = \frac{\mu \cdot l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{r} - 1 \right] \quad (9)$$

Em que:

- R - É a resistência de aterramento da haste (Ω);
- C - É a capacitância da haste (F);
- L - É a indutância da haste (H);

- l - É o comprimento da haste (m);
- r - É raio da haste (m);
- μ - É a permeabilidade magnética do solo (considerada igual à do ar) (H/m);
- ε - É a permissividade elétrica do solo (F/m);
- ρ - É a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

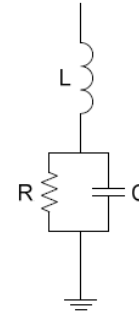


Fig. 5. Modelo da haste de aterramento [11].

III. METODOLOGIA E PARÂMETROS UTILIZADOS

Nas simulações a corrente de descarga incidirá diretamente no topo da torre central, considerando duas torres adjacentes, conforme Fig. 6 [12] e com dois “tipos” de corrente de descargas, resultado de medições na estação de Morro do Cachimbo-MG, conforme a Tabela I [13]. As classificações adotadas como mediana e crítica se relacionam com a característica probabilística das medições, na qual “mediana” se refere às medições em que os valores dos parâmetros associados às correntes de descarga são excedidos em 50% dos casos medidos e “crítica” às medições em que apenas 5% dos parâmetros excedem esse conjunto de valores.

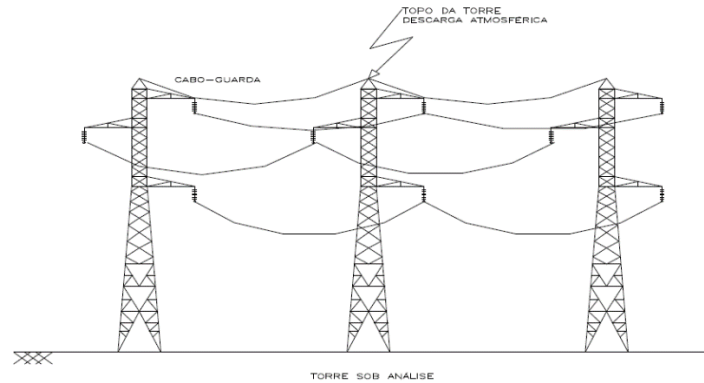


Fig. 6. Ilustração do ponto de incidência da corrente de descarga [12].

TABELA I. PARÂMETROS DA CORRENTE DE DESCARGA

Corrente de descarga (tipo)	I_p (kA)	τ_1 (μs)	τ_2 (μs)
Mediana	45,3	5,6	53,5
Crítica	85,2	9,9	145,2

A Fig. 7 apresenta a configuração da torre de transmissão que será adotada nas análises, além dos valores da impedância de surto Z_t por trecho e da velocidade de propagação da onda de surto implementados nas simulações.

Foi considerada uma linha de transmissão com uma das suas extremidades conectada a uma fonte de tensão de 138 kV entre fases e implementada com comprimento de 20 km nas torres das extremidades para simular uma linha de

transmissão infinita (neste caso, as reflexões não retornam antes do fim do tempo total de estudo, não afetando os resultados porque só há interesse nas sobretensões máximas).

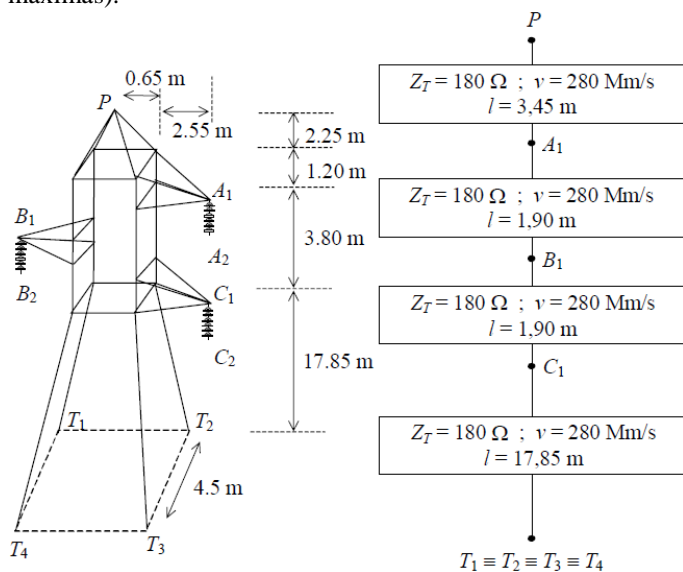


Fig. 7. Configuração da torre da linha de transmissão de 138kV, e circuito equivalente da torre [7].

Os dados físicos dos cabos e da linha de transmissão são apresentados na Tabela II.

TABELA II. DADOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS DOS CABOS

Nome do Cabo	LINNET	EHS 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe A
Comprimento do Vão (m)	300	300
Flechas (m)	7	4
Raio Interno (cm)	0,2976	0
Raio Externo (cm)	0,9155	0,476
Resistência em CC ($\Omega \cdot \text{km}$)	0,2032	3,81

Para os sistemas de aterramento, os valores das grandezas que não variam conforme os arranjos, para os casos simulados, são $\epsilon = 10 \cdot \epsilon_0$ e $\mu = \mu_0$ [14]. Os valores de comprimento e raio dos cabos contrapeso e hastes de aterramento que variam conforme os arranjos e das resistividades do solo utilizadas nas simulações serão apresentados na próxima seção antes de cada conjunto de resultados.

IV. RESULTADOS

Neste item serão apresentadas as amplitudes das sobretensões desenvolvidas nas cadeias dos isoladores da linha definida anteriormente e a análise da influência dos arranjos de aterramento nesses resultados. Para tanto os arranjos do sistema de aterramento foram representados por hastes de aterramento, cabos contrapeso ou associações desses elementos. No primeiro caso é feita uma avaliação da utilização das hastes de aterramento e da associação destas com os cabos contrapeso. Em todos os casos o objetivo é alcançar os arranjos de aterramento suficientes para manter os níveis de sobretensão abaixo dos 650 kV, valor mínimo do NBI para essa classe de tensão, com o objetivo de evitar a ocorrência de *backflashovers*.

Caso 1 – Corrente de Descarga Mediana e $\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$.

a) Sistemas de aterramento utilizando apenas hastes de aterramento

Foram determinadas as sobretensões utilizando apenas uma haste de aterramento de aço cobreado conectada às torres como sistema de aterramento e comparados os comportamentos utilizando hastes de 3/4" x 1,5m e 5/8" x 2,4m. Observa-se do gráfico da Fig. 8 que o melhor resultado compete a haste de 5/8" x 2,4m, porém ainda muito acima do valor mínimo do NBI da referida linha.

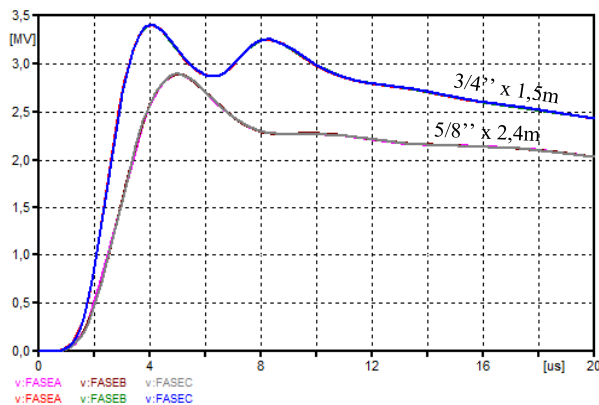


Fig. 8. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando haste de aterramento de 3/4" x 1,5m e 5/8" x 2,4m

b) Sistemas de aterramento utilizando cabo(s) contrapeso(s) associados ou não a hastes de aterramento

Posteriormente foram determinadas as sobretensões utilizando cabo(s) contrapeso de aço-cobre 4 AWG, enterrados a 60cm da superfície do solo, no sentido longitudinal da linha associado(s) ou não a uma haste de aterramento de aço cobreado de 5/8" x 2,4m como sistema de aterramento e comparados os resultados dessa associação.

- Um cabo contrapeso de 1m (com e sem haste de aterramento)

Foram comparados dois arranjos, ambos apenas com um cabo contrapeso, representado pela Fig. 9, diferenciados apenas pela associação com uma haste de aterramento conectada a extremidade do cabo.

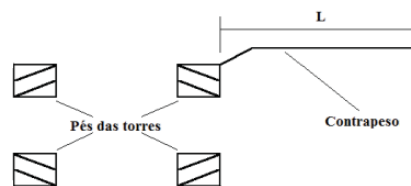


Fig. 9. Representação gráfica da topologia de aterramento descrita. Adaptado de [15].

Observa-se do gráfico da Fig. 10 que a associação de um cabo contrapeso de 1m com a haste de aterramento apresenta melhor resultado que a configuração apenas com o cabo, mas que também essa configuração não é capaz de manter os níveis de sobretensão abaixo de 650 kV.

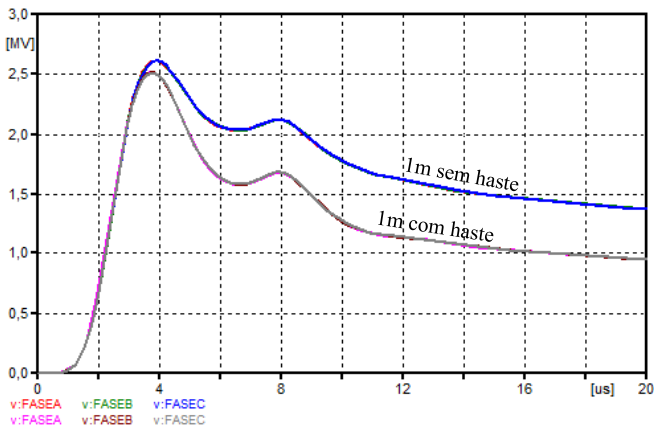


Fig. 10. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 1m com e sem haste de aterramento de 5/8"x2,4m.

- Um cabo contrapeso de 10m (com e sem haste de aterramento)

Do gráfico da Fig. 11 conclui-se que a associação do cabo contrapeso de 10m com a haste de aterramento não gera melhoria significativa e mais uma vez o arranjo se mostrou incapaz de conter a sobretensão abaixo do valor do NBI.

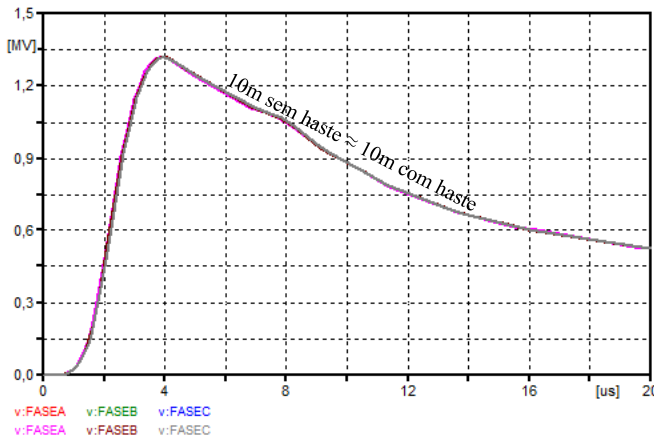


Fig. 11. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 10m com e sem haste de aterramento de 5/8"x2,4m.

- c) Sistemas de aterramento utilizando apenas cabo(s) contrapeso(s)

A partir da conclusão do resultado anterior não será mais utilizada a associação de cabo contrapeso com hastes de aterramento.

Foram simulados dois arranjos, um com um cabo de 20m, anteriormente apresentado na Fig. 8 e outro com dois cabos em paralelo de 20m, ilustrado na Fig. 12.

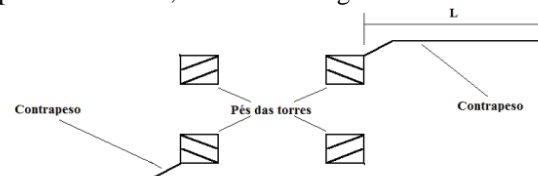


Fig. 12. Croqui do arranjo de aterramento descrito. Adaptado de [15].

Observa-se do gráfico da Fig. 13 os resultados para os dois arranjos, inclusive o arranjo com dois cabos foi o primeiro a apresentar valores de sobretensão menores que 650 kV, sendo assim suficiente para a proteção da linha.

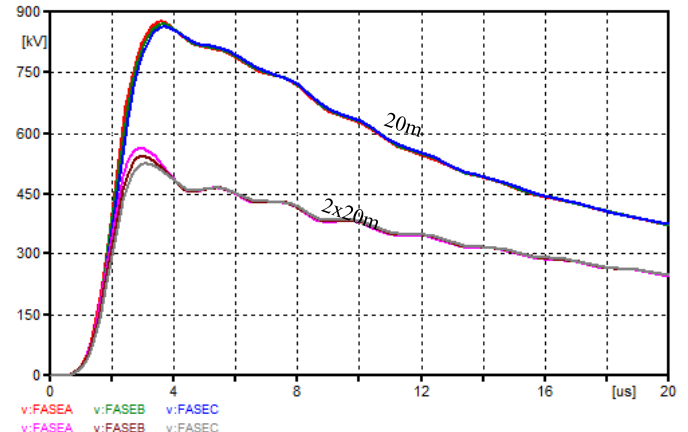


Fig. 13. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando um e dois cabo(s) contrapeso de 20m.

Caso 2 – Corrente de Descarga Crítica e $\rho = 500 \Omega \cdot m$.

Nesse caso a amplitude da corrente de descarga é quase o dobro da anterior, com a mesma resistividade do solo, então serão simuladas configurações de aterramento com maiores dimensões que no caso 1.

Foram simulados dois arranjos com quatro cabos contrapeso em paralelo, um com 10m e outro com cabos de 20m, conforme a Fig. 14.

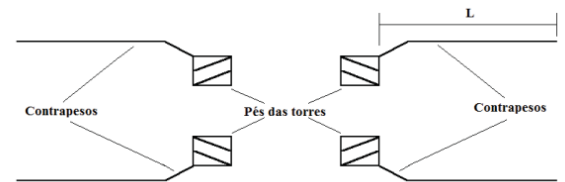


Fig. 14. Ilustração da configuração do aterramento descrito [15].

Na Fig. 15 é apresentada a comparação entre as sobretensões nas cadeias dos isoladores referentes a esses dois arranjos, pode-se concluir que apenas o arranjo com quatro cabos de 20m é suficiente para alcançar o objetivo de manter as sobretensões abaixo do valor mínimo do NBI.

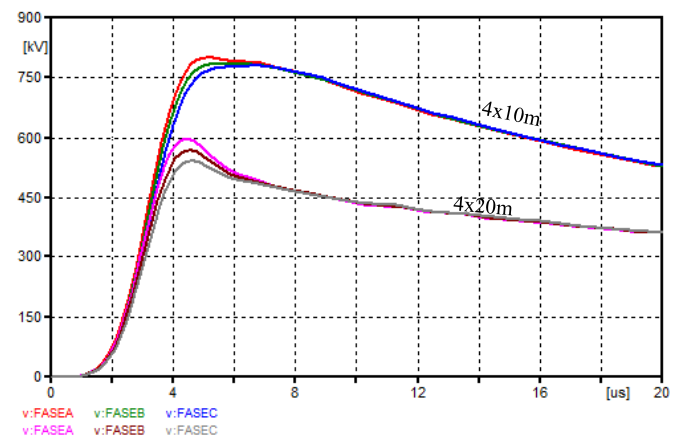


Fig. 15. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando quatro cabos contrapeso de 10m e 20m.

Caso 3 – Corrente de Descarga Mediana e $\rho = 1000 \Omega \cdot m$

No caso 3 o valor da resistividade do solo é o dobro do que no Caso 1, porém mantendo a mesma corrente de descarga. Assim sendo, serão testados arranjos de aterramento mais robustos que no Caso 1.

Comparados os valores das sobretensões a partir da Fig. 16 para um arranjo com quatro cabos contrapeso de 10m e

outro com 20m, já apresentados na Fig. 13, conclui-se que para alcançar valores abaixo do valor mínimo do NBI é necessário utilizar a topologia com quatro cabos de 20m.

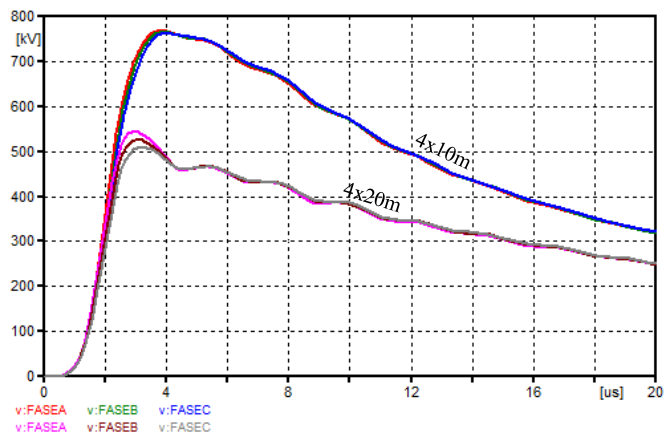


Fig. 16. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando quatro cabos contrapeso de 10m e 20m.

Caso 4 – Corrente de Descarga Crítica e $\rho = 1000 \Omega \cdot m$.
No último caso a amplitude da corrente de descarga é praticamente o dobro do caso 3 e a resistividade é mantida, portanto serão implementadas topologias de aterramento superiores a esse caso. A partir da leitura do gráfico da Fig. 17 que apresenta os resultados para um arranjo de quatro cabos contrapeso de 30m e 40m, vide Fig. 13, pode-se concluir que são necessários quatro cabos contrapeso de 40m para que o valor máximo das sobretensões não ultrapasse os 650 kV suficientes para proteção da linha.

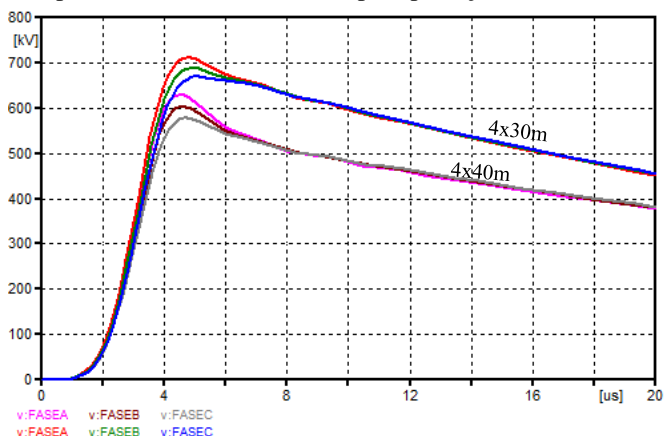


Fig. 17. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando quatro cabos contrapeso de 30m e 40m.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados de estudos da avaliação da eficiência e dimensionamento de sistemas de aterramento para reduzir os desligamentos de uma linha de transmissão provenientes de *backflashovers*, bem como foi realizada uma revisão dos modelos dos elementos envolvidos para a simulação deste fenômeno transitório.

Devido à natureza probabilística das descargas atmosféricas e dos diferentes valores de resistividade do solo encontrados em diferentes regiões, os estudos foram realizados através de várias simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o ATP. Este processo serve para definir a topologia ideal e o dimensionamento

adequado de forma a atender o desempenho da linha ao requerido pelo projeto ou legislação em diversas realidades.

Considerando uma linha de 138 kV típica, foram realizadas diversas simulações variando os valores dos parâmetros da corrente da descarga atmosférica e da resistividade do solo. Os resultados comprovam que, para os casos estudados, ao aumentar o comprimento do cabo contrapeso, reduz-se a impedância de aterramento das torres e consequentemente atenua-se as sobretensões nos isoladores.

Também foi verificado, que à medida que o comprimento dos cabos contrapeso aumenta, a influência das hastes de aterramento torna-se insignificante, corroborando assim as configurações usuais das concessionárias de energia, pois estas não apresentam tais associações.

Em suma, conclui-se que, para os casos analisados, as linhas de transmissão precisam ter o comprimento dos cabos contrapeso aumentados quando expostas a correntes de descarga com altos valores de amplitude e/ou instaladas em locais com solos que apresentam alta resistividade, para se atingir o objetivo de redução dos desligamentos em decorrência de *backflashover*.

V. REFERÊNCIAS

- [1] S. Visacro. "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005.
- [2] W. Shuwen; S. Wenxin, "Back flashover protection performance analysis of 220 kV double circuit transmission line", Proc. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Wuhan, China, Março 2011.
- [3] W. A. Chisholm; Y. L. Chow; K. D. Srivastava, "Lightning Surge Response of Transmission Towers," IEEE Trans., vol. PAS-102, pp.3232–3242, 1983.
- [4] H. Motoyama; H. Matsubara, "Analytical and experimental study on surge response of transmission tower", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no 2, pp. 812-819, abril, 2000.
- [5] Y. Baba; M. Ishii, "Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no 2, pp.630-635, abril, 1999.
- [6] F. Heidler, J. M. Cvetic, B. V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no 2, pp.399-404, abril, 1999.
- [7] J. C. Salari, C. Portela, "A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, pp. 527-536, Jan. 2007.
- [8] G. Kindermann, J.M. Campagnolo, "Aterramento Elétrico", Editora Sagra, DCLuzzatto, Porto Alegre, 1995.
- [9] E.D. Sunde, "Earth Conduction Effects in Transmission Systems" (Dover Publ. New York, 1949)
- [10] N.D. Hatzigryriou, M. Lorentzou, "Grounding Systems Design Using EMTP", 23rd European EMTP Users Group Meeting, Barcelona, 9-11 November 1997
- [11] R.S. Alípio, "Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência". Dissertação de Mestrado, CEFET-MG, Minas Gerais. 2008.
- [12] J. C. C. Viana, "Estudo de aplicação de para-raios ZnO em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [13] S. Visacro, A. Soares Jr. and M. A. O. Schroeder et al. "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station," J. Geophys. Res. (109), D01105, doi:10.1029/2003JD003662, 2004.
- [14] A. B. Lima, "Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- [15] B.L. Berardo, "Estudo do aterramento dos pés de torres de linha de transmissão frente às descargas atmosféricas". Dissertação de Mestrado, UNESP, São Paulo. 2012.