





## CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# IMPACTO DA REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO NO DESEMPENHO DE PARA-RAIOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Matheus Henrique Rosa Duarte

**Belo Horizonte** 

Março de 2018







# IMPACTO DA REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO NO DESEMPENHO DE PARA-RAIOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Matheus Henrique Rosa Duarte

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

Coorientador: Prof. Dr. Alberto Resende De Conti

Belo Horizonte

Março de 2018

Duarte, Matheus Henrique Rosa

# D812i Impacto da representação de sistemas de aterramento no desempenho de para-raios de linhas de transmissão / Matheus Henrique Rosa Duarte. - 2018.

102 f.: il., gráfs, tabs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.

Orientador: Rafael Silva Alípio.

Coorientador: Alberto Resende de Conti.

Banca examinadora: Rafael Silva Alípio, Alberto Resende De Conti, Marco Aurélio de Oliveira Schroeder e Ivan José da Silva Lopes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Aterramento elétrico – Teses. 2. Linhas elétricas – Teses. 3. Raio – Proteção – Teses. 4. Para-Raios – Teses. I. Alípio, Rafael Silva. II. De Conti, Alberto. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

#### CDD 621.31923



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Matheus Henrique Rosa Duarte

#### "Impacto da Representação de Sistemas de Aterramento no Desempenho de Para-Raios de Linhas de Transmissão"

Dissertação nº 157 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Éngenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João Del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 16 de Março de 2018 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Rafael-Silva Alípio (Orientador) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Df. Alberto Resende de Conti (Coorientador) Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Universidade Federal de São João Del-Rei

Prof. Dr. Ivan Jose da Silva Lopes Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Antônio Carlos Šiqueira de Lima Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico esse trabalho aos meus pais Inez Silvana e Luiz Henrique, e à minha irmã Anna Luiza, pelo incentivo incondicional.

## Agradecimentos

Das poucas convicções que tenho, uma é de que essa conquista não se consolidaria apenas por mim. Essa etapa da interminável, empolgante e árdua busca pelo conhecimento só foi finalizada em virtude dos incontáveis apoios, auxílios e amparos que tive ao longo dessa caminhada, cada um com sua particularidade e com a sua importância. Sintetizo uma pequena parcela da gratidão que nutro nessas palavras.

Antes de tudo, e sobretudo, agradeço à Deus pelos dons, pelas bênçãos e pela sabedoria. À Nossa Senhora de Fátima pela interseção e amparo nos momentos de turbulência.

A meus pais, Inez Silvana e Luiz Henrique pelo amor, apoio inabalável, pelos valores de seriedade, ética e trabalho; pelos incontáveis conselhos e direcionamentos. À minha irmã Anna Luiza, pela paciência, compreensão e amizade.

Aos meus familiares, pela torcida e pelo bom convívio de sempre, em especial aos meus avós Luiz Ribeiro, Dalcy Emilia (*in memoriam*), Marta de Paula e Manoel Rosa; e aos meus padrinhos Marcos Duarte, Olga Consuelo e Marta Luciene.

Ao meu orientador, Rafael Alípio, pela confiança, paciência e pelo aprendizado imensurável, tanto em sala de aula, como ao longo de todo o processo de orientação. Ocupa uma posição de expressivos respeito, gratidão, admiração e exemplo na minha vida acadêmica e profissional. Foi um privilégio ser aluno e orientando novamente. Levarei os ensinamentos transmitidos por toda a vida.

Aos meus colegas de trabalho de Cemig Distribuição, NSA Consultoria e Informática, Cemig Geração e Transmissão e Houer Consultoria, pelas oportunidades, confiança, paciência, reconhecimento e conhecimento transmitido. Em especial à Engenheira Janaína Costa, na condição de grande exemplo profissional; e ao Engenheiro Novack Henrique, pela confiança e parceria. Cada uma dessas experiências contribuiu profundamente na ainda curta carreira que orgulhosamente construí. Aos amigos e colegas que construí ao longo do mestrado, em especial Audine Sena, Deishi Santos, Daiane Rafael, Novack Henrique, Pedro Santos, Isabel Morais, Rafael Barroso e Guilherme Lopes, pelo bom convívio, pelo apoio ao longo dessa árdua caminhada, pela amizade e pelos momentos mágicos partilhados.

Aos incontáveis amigos que acumulei ao longo do curso de Engenharia Elétrica, em especial, Larissa Silva, Ana Pires, Fernando Almeida, Gustavo Costa, Renan Segantini, Bruno Barroso, Fernanda Lacerda, Matheus de Oliveira, Paula Martielle, entre muitos outros, que me proporcionaram os melhores anos da minha vida.

Ao CEFET-MG, minha segunda casa desde 2007, pela estrutura, professores e demais funcionários, por me permitir uma formação de excelência. Essa instituição me moldou não apenas como técnico, engenheiro, e agora mestre, mas como pessoa, profissional e pesquisador. Minha eterna gratidão, que pretendo retribuir honrando o nome dessa escola ao longo de toda a minha carreira.

Aos grandes amigos que construí, na Eletrotécnica, futebol, arte mágica, Crisma, Grupo de Jovens, entre outros; pelos momentos de reflexão e descontração, que refletiram em grande incentivo durante a caminhada.

Por fim, aos inúmeros pesquisadores cujos trabalhos serviram de base para essa dissertação.

A todos que contribuíram, direta e indiretamente para essa conquista, muito obrigado.

"Recria tua vida, sempre, sempre."

Cora Coralina

"Mas as coisas findas, Muito mais que lindas, Essas ficarão."

Carlos Drummond de Andrade

### Resumo

Descargas atmosféricas consistem na principal ameaça à continuidade de operação de linhas de transmissão. Para minimização dos riscos associados a esse fenômeno, busca-se o estabelecimento de sistemas de aterramento de pé de torre adequados, e eventualmente, a instalação de para-raios em paralelo com isoladores de linha. Nesse contexto, o presente trabalho avalia qualitativa e quantitativamente o comportamento de para-raios instalados em linhas de transmissão quando da incidência de descargas atmosféricas diretamente no topo de suas torres.

Essas avaliações são conduzidas a partir de simulações no domínio do tempo. Em adição, avalia-se o impacto da representação do aterramento de pé de torre nos resultados levantados. São comparados os resultados associados à consideração de representações simplificadas do aterramento – a resistência de aterramento em baixas frequências e a impedância impulsiva –, com os resultados decorrentes de uma representação mais rigorosa do comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento.

A interação entre linhas de transmissão, para-raios de linha e descargas atmosféricas é avaliada a partir de dois aspectos. Primeiramente, levanta-se o potencial de ruptura da rigidez dielétrica de isoladores. Em um segundo momento, avalia-se a energia acumulada no dispositivo para-raios da linha em virtude dessa descarga. Nas análises realizadas, são variados sistemas de aterramento de pé de torre, descargas atmosféricas de diferentes formas de onda e amplitude, entre outros. Essas variações correspondem a condições de incidência passíveis de ocorrência, considerando a realidade do sistema de transmissão brasileiro.

Observou-se que a impedância impulsiva pode ser uma boa representação para o sistema de aterramento submetido a correntes impulsivas em simulações cuja cauda da descarga não apresenta um papel relevante no comportamento estudado. Em simulações nas quais a influência da cauda da descarga é considerável, a representação a partir da impedância impulsiva pode incorrer em erros consideráveis, subestimando o potencial danoso de descargas atmosféricas em linhas de transmissão.

### Abstract

Lightning are the main threat to the continuity of transmission line operation. In order to reduce the risks associated with this phenomenon, it is a common practice to provide an appropriate tower-footing grounding, and eventually, to install surge arresters in parallel with the line insulators. In this context, the present work evaluates both quantitatively and qualitatively the behavior of surge arresters installed in transmission lines when subjected to direct first strokes at the top of transmission towers.

Time-domain simulations are used to evaluate this behavior. In addition, it is evaluated the impact of the representation of the tower-footing grounding in the results. Results obtained for simplified representations of the grounding, namely low-frequency grounding resistance and impulsive impedance, are compared with the results associated with a more rigorous representation of the frequency-dependent behavior of the grounding.

The interaction between transmission lines, surge arresters and lightning is evaluated from two points of view. First, it is assessed the potential of an insulation breakdown when lightning currents are injected at the top of the tower. Second, it is evaluated the energy in the surge arresters due to this lightning. Each analysis is carried out for different lightning incidence conditions, considering different tower-footing grounding arrangements, different lightning waveforms and amplitudes, among others. These variations are subject to occurrence, considering the reality of the Brazilian transmission system.

Tower-footing grounding may be represented by their impulsive impedance in lightning simulations, as long as the lightning tail does not represent a considerable influence on the behavior under analysis. In simulations in which the lightning tail is relevant, representing tower-footing grounding by their impulsive impedance may lead to considerable errors, underestimating the potential damage of lightning in transmission lines.

# Sumário

1	1 Introdução									
	1.1	Obj	ietivos	2						
	1.2	Cor	ntextualização	3						
	1.3	Org	ganização do texto	3						
2	2 Interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão5									
	2.1	Des	scargas atmosféricas	5						
	2.1	.1	Primeiras descargas e descargas subsequentes	6						
	2.1	.2	Parâmetros de descargas	7						
	2.1	.3	Características típicas de descargas	8						
	2.2	Inte	eração entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão	9						
	2.2	2.1	Flashover e Backflashover 1	0						
	2.2	2.2	Influência do sistema de aterramento no comportamento de linhas d	le						
	tra	nsmi	5500	. 2						
	2.3	Par	a-raios1	.4						
	2.3.1		Princípio de funcionamento 1	4						
	2.3	8.2	Critérios de especificação1	6						
	2.4	Cor	nsiderações finais1	.7						
3 p	3 Modelagem de sistemas de aterramento para estudos transitórios em programas do tipo ATP/EMTP19									
	3.1	Cor 19	nportamento de sistemas de aterramento de torres de transmissã	0						
	3.1.1		Efeitos eletromagnéticos do sistema de aterramento	21						
3.1.		.2	Variação de parâmetros do solo com a frequência	23						
3.1.		.3	Efeitos de propagação2	24						
	3.1	.4	Comportamento impulsivo de sistemas de aterramento2	?5						
3.2 Representações de sistemas de aterramento em simulações no don do tempo										
	3.2	2.1	Impedância harmônica	28						
	3.2.2		Resistência de aterramento	31						
3.2.3		2.3	Impedância impulsiva	32						

3.3 Considerações finais	35							
4 Avaliação de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissâ parcialmente protegidas por dispositivos para-raios	io 37							
4.1 Modelagem de elementos	37							
4.1.1 Condutores da linha de transmissão	37							
4.1.2 Torre de transmissão	38							
4.1.3 Descarga atmosférica	39							
4.1.4 Para-raios	40							
4.1.5 Sistema de aterramento	42							
4.2 Sobretensões em linhas de transmissão parcialmente protegidas por para-raios								
4.2.1 Para-raios instalado na fase C	51							
4.2.2 Para-raios instalados nas fases B e C	53							
4.3 Método DE: Efeito disruptivo de ondas de tensão	56							
4.3.1 Torre de transmissão sem para-raios	58							
4.3.2 Para-raios instalado na fase C	52							
4.3.3 Para-raios instalados nas fases B e C	56							
4.3.4 Análise de resultados6	59							
4.4 Considerações finais7	1							
5 Impacto da representação do aterramento na energia absorvida pe dispositivo para-raios	lo 73							
5.1 Simulações	74							
5.1.1 Onda 1: T-30 = 2,9 $\mu$ s, $T_{cauda}$ = 50 $\mu$ s	77							
5.1.2 Onda 2: T-30 = 2,9 $\mu$ s, $T_{cauda}$ = 150 $\mu$ s	34							
5.2 Considerações finais	<del>)</del> 0							
6 Conclusão								
6.1 Propostas de continuidade	<del>)</del> 5							
7 Referências	<del>)</del> 7							

## 1 Introdução

Linhas de transmissão são elementos fundamentais no fornecimento de energia elétrica. Em um país com dimensões continentais, como o Brasil, essa relevância tornase ainda maior. É, portanto, fundamental garantir a maior continuidade possível da operação dessas linhas. Nesse contexto, descargas atmosféricas constituem-se como a principal ameaça a essa continuidade, respondendo por mais de 75% dos desligamentos não-programados em linhas de transmissão brasileiras [1].

Descargas atmosféricas provocam em linhas de transmissão sobretensões elevadas nos terminais de seus isoladores. Essas sobretensões ameaçam a ruptura do isolamento da linha, conectando eletricamente a fase e a torre aterrada em curtocircuito, resultando em seu desligamento. Essas sobretensões ocorrem especialmente quando da direta incidência da descarga atmosférica na linha, a partir de descargas disruptivas no isolamento (*flashover*) e descargas disruptivas de retorno (*backflashover*), sendo a última a maior causa de desligamentos em linhas de transmissão [1].

Pode-se evitar a ocorrência de *backflashover* em linhas de transmissão mediante a implementação de um bom sistema de aterramento de pé de torre (baixa impedância de aterramento). Entretanto, a obtenção de um bom sistema de aterramento pode ser complexa e até mesmo inviável, especialmente quando da instalação de torres em locais de solo de elevada resistividade. Nesse contexto, a instalação de dispositivos para-raios em paralelo com os isoladores da linha de transmissão surge como alternativa para proteção da linha. O aprimoramento da confiabilidade da linha pode ser alcançado, inclusive, mediante instalação de para-raios em apenas uma ou duas de suas fases [2].

Na avaliação do impacto da instalação de para-raios na melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, programas de análises de transitórios no domínio do tempo são usualmente empregados para realização de simulações. Dispositivos não lineares, como os para-raios, são mais apropriadamente

1

modelados neste domínio. Esses programas, no entanto, não possuem modelos apropriados para representação do aterramento considerando o seu comportamento fortemente dependente da frequência. A maior parte dos trabalhos da literatura que avalia linhas protegidas por para-raios utiliza um modelo simplificado para o aterramento, representando-o como uma resistência concentrada com valor igual à sua resistência de aterramento e independente da frequência [3]-[11]. Tendo em conta o amplo espectro de frequências de descargas atmosféricas, que vai desde 0 Hz (CC) até alguns MHz, essa representação simplificada para o aterramento pode levar a resultados de simulação incorretos.

Tendo em conta esses comentários iniciais, este trabalho apresenta uma contribuição no tema *desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas*, particularmente em duas frentes principais:

- i) Avaliação do impacto da instalação de para-raios na melhoria do desempenho de linhas áreas.
- ii) Avaliação da influência da representação do sistema de aterramento em simulações no domínio do tempo, para avaliação do desempenho de pararaios de linha.

#### 1.1 Objetivos

O presente trabalho objetiva avaliar qualitativa e quantitativamente os seguintes aspectos pertinentes ao fenômeno físico sob estudo:

- Comportamento de dispositivos para-raios instalados em linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas, dissertando sobre a relevância do dispositivo na proteção da linha de transmissão contra *backflashover*.
- Energia absorvida por para-raios instalados em linhas de transmissão quando da incidência de descargas atmosféricas.
- Assertividade e segurança associadas a cada representação simplificada do sistema de aterramento de pé de torre – resistência de aterramento em baixas frequências e impedância impulsiva – para simulações no domínio do tempo de linhas de transmissão.

4. Influência das variadas condições passíveis de ocorrência do fenômeno sob estudo nos resultados levantados nos itens 1-3 acima. São consideradas variações no sistema de aterramento de pé de torre empregado, na amplitude da descarga atmosférica incidente, na forma de onda da descarga, entre outros.

#### 1.2 Contextualização

A presente dissertação de mestrado está inserida no projeto de pesquisa intitulado "Modelagem de sistemas elétricos com a consideração simultânea de elementos e fenômenos dependentes do tempo e da frequência", financiado pela FAPEMIG<sup>1</sup> (TEC-AP-02017-16) e coordenado pelo orientador deste trabalho. O projeto mencionado aborda a modelagem híbrida de sistemas elétricos incluindo simultaneamente elementos e/ou fenômenos dependentes do tempo (por exemplo, dispositivos pararaios) e da frequência (por exemplo, sistemas de aterramento), com a finalidade de avaliar de forma rigorosa o desempenho de sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas. Esta dissertação de mestrado constitui um dos produtos do projeto de pesquisa supracitado.

#### 1.3 Organização do texto

Este trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

O capítulo 2 descreve as interações entre linhas de transmissão e descargas atmosféricas. São apresentadas características básicas de descargas, bem como a forma como esses fenômenos ameaçam a continuidade da operação de linhas de transmissão. Em adição, são apresentadas características de comportamento e critérios de especificação de dispositivos para-raios.

O capítulo 3 trata das representações de sistemas de aterramento potencialmente empregáveis em simulações no domínio do tempo. É apresentada uma abordagem teórica a respeito do comportamento de sistemas de aterramento sob condições impulsivas. São descritas, ainda, as três representações do aterramento consideradas

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

neste trabalho – impedância harmônica, resistência de aterramento em baixas frequências e impedância impulsiva.

O capítulo 4 apresenta o primeiro conjunto de resultados deste trabalho, abordando os efeitos de sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. São apresentados resultados de simulação diversos, variando o número de para-raios instalados na torre, características do aterramento e amplitudes de descarga. Para cada simulação, é levantado o potencial de ruptura do isolamento da linha por meio do método DE (*Disruptive Effect*).

O capítulo 5 trata da energia absorvida por dispositivos para-raios quando da incidência de descargas atmosféricas diretamente em torres de transmissão. São consideradas variações nas características do aterramento e da descarga atmosférica, passíveis de ocorrência na realidade do sistema de transmissão brasileiro.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões levantadas a partir da realização do trabalho, além de abordar propostas de continuidade.

# 2 Interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão

Descargas atmosféricas consistem na maior ameaça à continuidade da operação de linhas de transmissão. A fim de avaliarem-se soluções viáveis para a proteção de linhas de transmissão ante esse fenômeno, é fundamental a compreensão dos conceitos físicos associados a descargas atmosféricas, bem como de sua interação com linhas de transmissão.

#### 2.1 Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas consistem na transferência de carga acumulada em nuvens. Podem ocorrer no interior de nuvens (descargas intra-nuvens), entre nuvens, entre a nuvem e a estratosfera, ascendentes entre nuvem e solo, e descendentes entre nuvem e solo. Nesse trabalho, avalia-se o comportamento de linhas de transmissão submetidas a descargas descendentes entre nuvem e solo. Dessa forma, para fins de simplificação, os termos descargas atmosféricas apresentados ao longo desse trabalho se referem a esse tipo específico de descarga.

O acúmulo de cargas elétricas negativas na extremidade inferior de nuvens induz uma concentração de cargas positivas de mesma magnitude no solo. Esse pareamento de cargas provoca um campo elétrico entre a nuvem e o solo de elevada intensidade, que favorece a criação de canais ionizados descendentes. Caso configurado um canal ionizado entre a nuvem e a terra, tem-se o escoamento da carga acumulada em direção ao solo por este canal, antes de seu fechamento, o que consiste na descarga atmosférica [3].

Esse fenômeno é caracterizado por ondas de corrente de elevada intensidade e curta duração. A Figura 2.1 ilustra uma forma de onda de corrente de uma descarga atmosférica real, medida na estação Morro do Cachimbo.



Figura 2.1 – Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo. Adaptado de [12].

Nota-se o comportamento impulsivo da onda de corrente da descarga atmosférica. A corrente atinge elevados valores de pico em poucos microssegundos. Posteriormente, a magnitude da corrente decai mais lentamente, até a completa extinção da descarga.

#### 2.1.1 Primeiras descargas e descargas subsequentes

Como mencionado, o acúmulo de cargas negativas na extremidade de nuvens provoca o surgimento de um intenso campo elétrico entre nuvem e solo, criando canais ionizados que podem incorrer em descargas atmosféricas. As ondas de corrente que primeiramente fluem por meio destes canais consistem nas primeiras descargas de retorno.

Outras descargas podem, ainda, ocorrer a partir do mesmo canal, sendo denominadas descargas subsequentes. Essas descargas aproveitam-se do caminho ionizado entre nuvem e solo, e são alimentadas por outros centros de cargas negativas eventualmente existentes na nuvem. As ondas de corrente associadas são, em geral, mais rápidas, em virtude do aproveitamento de um caminho ionizado existente; e

menos intensas, em razão de, normalmente, estarem associadas a centro de cargas da nuvem de menor intensidade, resultando em um processo de carregamento do canal menos intenso que o processo associado ao canal precursor da primeira descarga [3].

Descargas subsequentes são fenômenos recorrentes. A partir de amostras referentes à realidade brasileira, constatou-se que cada canal ionizado produz, em média, 4,6 descargas atmosféricas. De acordo com essas amostras, notou-se que apenas em 17% dos casos não houve a formação de descargas subsequentes [13].

O presente trabalho avalia o comportamento de dispositivos para-raios instalados em linhas de transmissão quando da incidência de primeiras descargas de retorno.

#### 2.1.2 Parâmetros de descargas

Descritos os aspectos físicos básicos associados a descargas atmosféricas, faz-se necessária a caracterização de seus parâmetros. Em geral, as características de ondas de primeiras descargas podem ser definidas tendo como referência a curva estilizada apresentada na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Típica forma de onda de primeiras descargas. Adaptado de [14]

Os parâmetros indicados na figura, que descrevem o comportamento dessa forma de onda, são apresentados a seguir:

- I<sub>P1</sub>: Valor de corrente no primeiro pico da descarga.
- I<sub>P2</sub>: Valor máximo de corrente da descarga (Valor de pico ou amplitude da descarga).
- T10: Tempo compreendido entre os instantes em que a descarga alcança os valores de corrente de 10% e 90% de I<sub>P1</sub>.
- T30: Tempo compreendido entre os instantes em que a descarga alcança os valores de corrente de 30% e 90% de I<sub>P1</sub>.
- T<sub>cauda</sub>: Tempo compreendido entre o início da descarga até o instante em que a descarga alcança 50% do seu valor de I<sub>P2</sub>, após já ter atingido seu valor de pico.
- S10: Taxa média de crescimento da amplitude da corrente de descarga entre 10% e 90% de I<sub>P1</sub>.
- S30: Taxa média de crescimento da amplitude da corrente de descarga entre 30% e 90% de I<sub>P1</sub>.
- di/dt<sub>max</sub>: Máxima inclinação da onda de corrente de descarga.

Pode-se estimar o tempo de frente da onda de descarga (tempo entre o início da onda e o instante em que a onda de corrente alcança o primeiro pico) a partir dos tempos T10 e T30 supracitados. Td10 é o tempo de frente estimado a partir do valor de T10, dado por Td10=T10/0,8. Analogamente, Td30 é o tempo de frente estimado a partir de T30, dado por Td30=T30/0,6 [15].

#### 2.1.3 Características típicas de descargas

O comportamento de descargas atmosféricas é variado, conforme tipo de descarga (primeiras descargas ou descargas subsequentes), características geográficas, meteorológicas, entre outros. Essas variações são refletidas nos parâmetros previamente descritos. Ressalta-se, ainda, que os parâmetros de descargas atmosféricas não são independentes entre si.

Visacro et al. [16] apresentaram um estudo acerca da análise estatística dos parâmetros de descargas atmosféricas, a partir de medições realizadas na estação do

Morro do Cachimbo. A Tabela 2.1 apresenta dados estatísticos dos parâmetros de descargas, tendo como base funções densidades de probabilidade log-normal, levantadas a partir de uma amostra composta por 31 medições de primeiras descargas de retorno.

	Percentual de medições que não			
Parâmetro da descarga	excedeu os valores apresentados			
	5%	50%	95%	
I <sub>P1</sub> (kA)	22,2	40,4	73,3	
I <sub>P2</sub> (kA)	24,0	45,3	85,2	
T10 (μs)	3,1	5,6	9,9	
T30 (μs)	1,4	2,9	5,9	
T <sub>cauda</sub> (μs)	19,7	53 <i>,</i> 5	145,2	
S10 (kA/μs)	3,5	5,8	9,6	
S30 (kA/μs)	5,1	8,4	13,7	
di/dt <sub>max</sub> (kA/μs)	11,9	19,4	31,4	

Tabela 2.1 – Parâmetros de primeiras descargas [16]

Em 2010, Visacro et. al atualizaram as estatísticas acerca de alguns dos parâmetros acima a partir da medição de sete nova amostras de primeiras descargas de retorno [17]. Entretanto, os percentuais atualizados pouco diferem dos apresentados na Tabela 2.1.

#### 2.2 Interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão

Descrito o fenômeno físico, é necessária a caracterização da forma de interação desse fenômeno com linhas de transmissão. Como previamente mencionado, descargas atmosféricas podem prejudicar o funcionamento e a continuidade de operação de linhas de transmissão, configurando-se como causa mais frequente de desligamentos não programados.

Descargas atmosféricas podem atingir linhas de transmissão direta ou indiretamente. Quando da incidência de descargas atmosféricas nos arredores de linhas de transmissão, é estabelecido um campo magnético que induz na linha uma força eletromotriz que eleva seu potencial. Essa elevação, entretanto, é de baixa amplitude, de forma que descargas indiretas não se configuram como uma ameaça significativa para linhas de transmissão, em virtude das elevadas tensões nominais envolvidas (a partir de 138 kV) e dos níveis de isolamento associados.

Por outro lado, a incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão ameaça essa continuidade, em virtude das expressivas magnitudes de corrente envolvidas. Em adição, as torres de transmissão e os condutores aéreos configuram-se como forte alvo potencial para incidência de descargas atmosféricas, especialmente pelo fato de linhas de transmissão serem usualmente instaladas em campo aberto.

#### 2.2.1 Flashover e Backflashover

A descarga atmosférica diretamente incidente na linha de transmissão resulta em ondas de sobretensão elevadas. Essas sobretensões podem resultar no rompimento do isolamento existente na linha, provocando o seu desligamento. Quando da ocorrência de descargas atmosféricas diretas em linhas de transmissão, há basicamente dois meios a partir dos quais se pode ocorrer a ruptura de seu isolamento – *flashover* ou *backflashover* [1], [18].

#### 2.2.1.1 Flashover

Quando da incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos fase de linhas de transmissão, a onda de corrente que se propaga ao longo da linha ocasiona expressiva onda de sobretensão resultante. Essa onda pode provocar o rompimento da rigidez dielétrica da cadeia de isoladores da linha, estabelecendo um arco elétrico entre a fase e a estrutura aterrada, configurando-se um curto-circuito. Trata-se de uma descarga disruptiva no isolamento, também denominada *flashover*.

Como alternativa para se evitar o desligamento por *flashover*, é realizada a blindagem dessa linha de transmissão a partir da instalação de condutores no topo de suas estruturas, acima dos cabos fase. Esses condutores protegem a linha de transmissão contra incidências de descargas atmosféricas diretamente nos cabos fase da linha, tornando-se um alvo preferencial para eventuais descargas. Tratam-se dos cabos para-raios, também conhecidos como cabos guarda ou de blindagem.

Cabos de blindagem são eletricamente conectados às torres de transmissão, que conduzem as correntes advindas de descargas atmosféricas em direção ao sistema de aterramento de pé de torre. Em geral, linhas de transmissão são providas de um ou dois cabos para-raios, embora haja ocasiões em que mais cabos de blindagem sejam empregados.

A Figura 2.3 apresenta uma ilustração de uma linha de transmissão, indicando-se o cabo para-raios nela instalado.



Figura 2.3 – Representação ilustrada de uma linha de transmissão. Adaptado de [19]

#### 2.2.1.2 Backflashover

Uma linha de transmissão adequadamente blindada evita a incidência de descargas atmosféricas diretamente em seus cabos fase. Ainda assim, descargas atmosféricas incidentes em cabos para-raios ou na própria torre de transmissão podem resultar em elevadas sobretensões entre os terminais dos isoladores da linha, podendo ocasionar seu desligamento. Essas sobretensões são decorrentes do fenômeno de *backflashover*, ou descarga disruptiva de retorno. Esse fenômeno é a maior causa de desligamentos não programados em linhas de transmissão [1].

Descargas atmosféricas que atingem linhas de transmissão no topo de suas torres ou em seus cabos de blindagem são conduzidas em direção ao aterramento pela torre de transmissão. Propaga-se pela torre uma onda de tensão aproximadamente igual ao produto da parcela da onda de corrente da descarga efetivamente injetada na torre pela impedância de surto da torre. Essa onda de tensão viaja ao longo de toda a torre até seu aterramento, onde encontra um ponto de descontinuidade. Parte da onda que atinge esse ponto de descontinuidade é transmitida para os eletrodos de aterramento, enquanto parte é refletida. A onda de tensão refletida viaja novamente pela torre somando-se à onda de tensão incidente. A tensão resultante dessa superposição pode ser tal que o campo elétrico associado provoque a ruptura da rigidez dielétrica dos isoladores instalados na linha, conectando eletricamente os condutores de fase e a torre de transmissão aterrada, resultando em uma condição de curto-circuito.

### 2.2.2 Influência do sistema de aterramento no comportamento de linhas de transmissão

Sistemas de aterramento de linhas de transmissão possuem um papel fundamental na minimização do potencial de dano associado a descargas atmosféricas mediante condições de *backflashover*. Como mencionado, a onda de tensão disruptiva de retorno ocorre a partir da superposição das ondas de tensão incidente e refletida. O fator que associa a onda incidente e refletida é o coeficiente de reflexão, calculado por:

$$\Gamma = \frac{Z_{\rm T} - Z_S}{Z_{\rm T} + Z_S} \tag{2.1}$$

em que  $\Gamma$  é o coeficiente de reflexão,  $Z_S$  é a impedância de surto da torre de transmissão e  $Z_T$  é a impedância de aterramento. A impedância de surto é a razão entre as ondas de tensão e corrente que propagam em uma linha, sob condições de

surto, em qualquer ponto da linha [20]. O conceito de impedância de aterramento é posteriormente descrito. Salienta-se, entretanto, que quanto melhor a qualidade do sistema de aterramento, menor o valor de sua impedância de aterramento.

Para fins de avaliação do impacto de sistemas de aterramento no comportamento de linhas de transmissão, suponha-se a incidência de uma descarga atmosférica em uma torre que possui um sistema de aterramento ideal, com impedância de aterramento nula. A onda de tensão incidente encontra um ponto de descontinuidade entre torre e aterramento, cujo coeficiente de reflexão associado é  $\Gamma = -1$ . A onda é, portanto, refletida em sua totalidade, porém com polaridade invertida. Dessa forma, a superposição das ondas de tensão incidente e refletida resulta em uma tensão cuja taxa de crescimento é bastante reduzida, em comparação à onda de tensão original incidente. Nesse caso, os isoladores da linha ficam submetidos a níveis de tensão menos severos, e a probabilidade de ruptura de sua rigidez dielétrica é baixa, tendo-se em conta primeiras descargas de retorno típicas.

Como contraponto, suponha-se a incidência de uma descarga atmosférica em uma torre com impedância de aterramento de valor infinito. A onda de tensão incidente encontra um ponto de descontinuidade entre torre e aterramento cujo coeficiente de reflexão associado é  $\Gamma = +1$ . A onda é, portanto, refletida em sua totalidade com mesma polaridade da onda incidente. Dessa forma, em virtude da superposição das ondas de tensão incidente e refletida, a tensão à qual os isoladores são submetidos se aproxima do dobro da já expressiva onda de tensão incidente, estando, portanto, sujeitos à ruptura de sua rigidez dielétrica.

Nota-se, portanto, que para sistemas de aterramento com baixos valores de impedância associados, as chances de ocorrência de backflashover são significativamente reduzidas. Em um cenário no qual ondas disruptivas de retorno consistem na principal causa de desligamentos não programados na linha, bons sistemas de aterramento estão diretamente associados à confiabilidade de linhas de transmissão. Por outro lado, a obtenção de baixos valores de impedância de aterramento nem sempre é viável, especialmente em regiões de altas resistividades elétricas do solo. Essas condições são especialmente comuns no Brasil. Nesse cenário, faz-se necessária a utilização de outras estratégias para se evitarem desligamentos em linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas. Entre essas possíveis estratégias, destaca-se a utilização de dispositivos para-raios.

#### 2.3 Para-raios

Para-raios são dispositivos utilizados na proteção de sistemas elétricos de potência contra surtos de tensão. Essas sobretensões podem estar associadas a surtos de manobra ou a descargas atmosféricas.

#### 2.3.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de para-raios se baseia no de resistores não lineares. Sua resistência interna varia conforme tensão aplicada entre seus terminais. São instalados em paralelo com cadeias de isoladores do sistema, e atuam por meio da limitação das tensões sobre estas. Quando dispositivos para-raios são submetidos a tensões inferiores a determinado valor de projeto, atuam idealmente como um circuito aberto, impedindo a circulação de corrente em seu interior. Quando submetidos a tensões superiores ao valor projetado, sua resistência interna é significativamente reduzida, permitindo a condução de corrente e limitando o valor de tensão na cadeia de isoladores. A Figura 2.4 ilustra o comportamento tensão-corrente de um dispositivo para-raios ideal.



Figura 2.4 – Característica tensão-corrente de para-raios ideal.

Os resistores não lineares empregados na fabricação de para-raios são, em geral, fabricados a partir de óxidos metálicos, geralmente o óxido de zinco (ZnO). Esses elementos possuem uma característica fortemente não linear, favorecendo sua utilização em dispositivos para-raios. A Figura 2.5 ilustra a característica tensão versus corrente de resistores não lineares de ZnO.



Figura 2.5 – Característica tensão-corrente de resistores não lineares de ZnO [21]

#### 2.3.2 Critérios de especificação

Embora os aspectos básicos relativos ao comportamento de dispositivos para-raios sejam relativamente simples, sua especificação deve ser criteriosa, na intenção de proporcionar o adequado cumprimento de suas funções de proteção. Abaixo são apresentados alguns dos principais parâmetros considerados na especificação de pararaios para linhas de transmissão.

#### 2.3.2.1 Tensão nominal e máxima tensão de operação contínua

A tensão nominal consiste no máximo valor de tensão eficaz aplicável entre os terminais do para-raios, em frequência industrial, que garanta sua correta operação quando sob condições de sobretensão. Trata-se de um parâmetro de referência, que caracteriza a capacidade operativa de dispositivos para-raios. Ressalta-se que os para-raios não devem estar submetidos ao seu valor nominal de tensão indefinidamente, sendo o período limite de tempo definido pelo fabricante (10 segundos, segundo ABNT [22]), a fim de manter a estabilidade térmica do equipamento e sua capacidade de operação [22], [23].

Nesse cenário, a máxima tensão de operação contínua dos para-raios consiste no máximo valor de tensão que pode ser continuamente aplicado nos terminais do para-raios, também em frequência industrial [21], [22].

Em linhas de transmissão de 138 kV (máxima tensão entre fase e neutro 83,72 kV [24]), são empregados, em geral, para-raios de tensão nominal de 120 kV e máxima tensão de operação contínua de 98 kV.

#### 2.3.2.2 Correntes nominais de descarga

Correntes nominais de descargas consistem em valores de crista de impulso de corrente usado para classificar o para-raios. Tratam-se das máximas correntes que podem circular nos resistores não lineares de para-raios quando em condição de surto. Ressalta-se que esse parâmetro não se relaciona ao valor de pico de descargas atmosféricas no sistema, mas à corrente no próprio dispositivo. Para-raios do tipo

estação aplicados em linhas de transmissão possuem correntes nominais de descarga iguais a 10 kA e 20 kA.

Em ensaios para avaliação da capacidade de escoamento do dispositivo, é empregada uma onda de corrente normalizada do tipo 8/20 μs [21], [22], [25].

#### 2.3.2.3 Energia específica

Quando da ocorrência de uma falta ou uma descarga atmosférica, dispositivos pararaios são submetidos a severas condições de operação, estando expostos a elevadas correntes e sobretensões. Nesse sentido, a energia específica do para-raios diz respeito ao máximo valor de energia que pode ser absorvido pelo dispositivo em condições de surto, sem que suas características de operação sejam comprometidas.

Esse parâmetro relaciona a tensão nominal do equipamento à sua capacidade de absorção de energia. Dispositivos para-raios de linhas de transmissão, em geral, possuem energia específica entre 2,7 e 3,4 kJ/kV [21]. Ressalta-se que, usualmente, os valores de capacidade de absorção de energia de para-raios são extremamente conservativos, a fim de considerar uma série de incertezas, tais como envelhecimento do dispositivo frente a surtos, entre outros [21].

#### 2.4 Considerações finais

Descargas atmosféricas consistem na principal ameaça ao comportamento de linhas de transmissão, respondendo pela maior parte de seus desligamentos não programados. Podem possuir características variadas, desde multiplicidade, tempos de crescimento e decaimento, valores de pico, entre outros.

Os desligamentos decorrentes de descargas atmosféricas podem ocorrer por *flashover*, quando a descarga atinge diretamente os cabos de fase; ou por *backflashover*, quando a descarga atinge a torre de transmissão ou os cabos de blindagem. Em particular, a maior parte dos desligamentos não programados em linhas de transmissão é provocada por *backflashover*. Sistemas de aterramento de torres de transmissão apresentam papel decisivo na ocorrência ou não desses desligamentos, de forma que

quanto melhor a qualidade do aterramento empregado, menor a possibilidade de ocorrência de *backflashover*.

Ainda assim, a obtenção de baixos valores de impedância de aterramento ao longo de linhas de transmissão nem sempre é viável, especialmente em locais de alta resistividade elétrica do solo. Nestes casos, a instalação de dispositivos para-raios consiste em alternativa usualmente empregada para a melhoria da confiabilidade de linhas de transmissão. Quando da ocorrência de sobretensões na linha (de origem de manobra ou descarga atmosférica), esses dispositivos limitam a tensão na cadeia de isoladores, evitando o rompimento de sua rigidez dielétrica e consequente desligamento da linha.

## 3 Modelagem de sistemas de aterramento para estudos transitórios em programas do tipo ATP/EMTP

Esse trabalho objetiva avaliar o comportamento de para-raios de linhas de transmissão quando submetidas a descargas atmosféricas incidentes em suas torres de transmissão ou em seus cabos para-raios. Esse comportamento é avaliado por meio de simulações em programas de simulação de transitórios no domínio do tempo, como o Alternative Transients Program (ATP) ou Electromagnetic Transients Program (EMTP).

Sabe-se que o comportamento dessas linhas é sensivelmente afetado pelo aterramento de suas torres. Esse impacto se faz presente tanto quando da ocorrência de curtos-circuitos, como quando da incidência de descargas atmosféricas. Logo, a fim de obterem-se resultados adequados nas simulações conduzidas, é fundamental que os sistemas de aterramento sejam adequadamente modelados. Esses modelos devem refletir com fidedignidade o comportamento do aterramento frente às solicitações impulsivas oriundas de descargas atmosféricas, sendo na medida do possível de simples implementação.

Neste capítulo, é detalhado o comportamento de sistemas de aterramento submetidos a diversos fenômenos, diferenciando, sobretudo, o comportamento desses sistemas frente a fenômenos de baixas e altas frequências. A partir disso, são descritas representações de sistemas de aterramento usual e potencialmente aplicáveis em simulações em programas do tipo ATP/EMTP.

# 3.1 Comportamento de sistemas de aterramento de torres de transmissão

Sistemas de aterramento são formados por condutores de aterramento, conexões com os elementos protegidos e o solo ao redor. O arranjo de aterramento usualmente empregado em torres de transmissão consiste em eletrodos radialmente dispostos, referidos como cabos contrapeso. A Figura 3.1 ilustra um arranjo de aterramento tipicamente utilizado em torres de transmissão do tipo autoportante.



Figura 3.1 – Arranjo de aterramento de torres de transmissão autoportantes

As dimensões L dos cabos contrapeso apresentados na Figura 3.1 variam conforme a resistividade do solo ao redor da torre.

Sistemas de aterramento de torres de transmissão podem ser solicitados especialmente sob duas condições: curtos-circuitos e descargas atmosféricas. O comportamento de sistemas de aterramento frente a essas duas naturezas de solicitação é distinto. As frequências de ondas de corrente de curto-circuito são relativamente baixas, alcançando até alguns kHz. Já as ondas de corrente advindas de descargas atmosféricas possuem um amplo espectro de frequências associado, que vai desde CC até algumas centenas de kHz. Essa distinção dos valores de frequência implica um efeito também distinto de fenômenos eletromagnéticos presentes no sistema de aterramento.

Nas avaliações acerca do comportamento de sistemas de aterramento realizadas neste trabalho, não são considerados os efeitos associados ao processo de ionização do solo. Em sistemas de aterramento de pé de torre, a ionização do solo é pouco expressiva, em virtude dos longos cabos contrapeso usualmente empregados. Nesse contexto, os efeitos associados ao processo de ionização do solo podem ser desprezados sem prejuízo de consistência nos resultados levantados [26], [27].

#### 3.1.1 Efeitos eletromagnéticos do sistema de aterramento

A interação entre a corrente injetada em um sistema de aterramento e o sistema em si ocorre a partir da manifestação de diferentes efeitos eletromagnéticos. Tratam-se dos efeitos condutivo e capacitivo do solo, além do efeito indutivo e resistivo do cabo contrapeso [28], [29].

#### 3.1.1.1 Efeito condutivo do solo

O solo é um material que reúne ao mesmo tempo características condutivas e dielétricas. O efeito condutivo de um sistema de aterramento consiste no escoamento de uma corrente injetada para o solo de maneira conduzida, aproveitando-se das características condutivas do material. Esse efeito varia diretamente com a resistividade do solo. Quanto mais condutivo o solo, mais pronunciado é o efeito condutivo do aterramento [28], [29].

Esse efeito é impactante no comportamento do sistema de aterramento para ondas de corrente de baixas e altas frequências, e favorece o escoamento das correntes injetadas no solo.

#### 3.1.1.2 Efeito capacitivo do solo

Como mencionado, o solo é um material que também possui características dielétricas. Quando da variação de um campo elétrico em relação ao tempo em um meio com características dielétricas, tem-se a denominada corrente de deslocamento, ou corrente capacitiva. Esse fenômeno consiste no efeito capacitivo de sistemas de aterramento.

Quanto maior a frequência da onda de corrente associada, maior a variação do campo elétrico no meio, tornando mais pronunciado o efeito capacitivo no sistema de aterramento. Dessa forma, o efeito capacitivo, não muito significativo para correntes de baixas frequências, representa influência considerável no comportamento de sistemas de aterramento submetidos a correntes de altas frequências [28], [29].

21

Ressalta-se que o efeito capacitivo favorece o desempenho do aterramento, uma vez que permite o escoamento da corrente injetada no eletrodo a partir de uma corrente de natureza capacitiva.

#### 3.1.1.3 Efeito indutivo do eletrodo

A circulação de correntes elétricas em condutores provoca um campo magnético no seu interior e ao seu redor. Esse campo magnético, por sua vez, provoca um fluxo magnético no interior do eletrodo e no meio circunvizinho. Tem-se, portanto, um fluxo magnético provocado pela circulação de uma corrente. Esse fluxo magnético produzido caracteriza o efeito indutivo em sistemas de aterramento, normalmente quantificado por meio do conceito de indutância parcial [28], [29].

A variação desse fluxo magnético com o tempo induz uma força contraeletromotriz. Quanto maior a frequência da onda de corrente associada, maior a variação do campo magnético em relação ao tempo, e mais pronunciado torna-se o efeito indutivo no sistema de aterramento. Dessa forma, o efeito indutivo, não muito pronunciado para correntes de baixas frequências, tem uma influência expressiva no comportamento de sistemas de aterramento submetidos a correntes de altas frequências.

Ressalta-se que o efeito indutivo dificulta o escoamento da corrente injetada para o solo, representando oposição à circulação dessa corrente pelo condutor de aterramento.

#### 3.1.1.4 Efeito resistivo do eletrodo

Basicamente, eletrodos de aterramento fornecem caminhos de baixa impedância para dispersão da corrente de falta. Embora os materiais utilizados em aterramentos sejam constituídos de bons condutores, eles possuem resistividade elétrica diferente de zero. Nesse sentido, os eletrodos apresentam para a corrente injetada uma resistência longitudinal, o que caracteriza o efeito resistivo.

Esse efeito torna-se mais pronunciado em altas frequências, em virtude do efeito pelicular em condutores, fenômeno caracterizado pela tendência de circulação de corrente elétrica próximo à superfície de um condutor. Dessa forma, o efeito pelicular

22

impõe dificuldade adicional à circulação da corrente injetada no eletrodo, uma vez que reduz a seção útil para essa condução. Quanto maior o valor de frequência, menor a área de circulação à qual a corrente elétrica fica limitada.

Eletrodos de aterramento possuem características fortemente condutivas, diferentemente do solo no seu entorno. A resistividade dos materiais empregados nesses eletrodos tem ordem de grandeza de  $10^{-8} \Omega m$ . Já a resistividade média de solos possui ordem de grandeza de  $10^3 \Omega m$  ou superior, considerando solos típicos do Brasil. Nesse cenário, mesmo com sua área para condução de corrente limitada, o efeito resistivo do meio em que os eletrodos estão inseridos (solo) é muito mais pronunciado do que o efeito resistivo nos próprios eletrodos. Isso torna desprezível a influência do efeito resistivo longitudinal no comportamento de sistemas de aterramento, mesmo se submetidos a correntes de altas frequências. Dessa forma, o efeito resistivo não será considerado nas avaliações doravante realizadas a respeito do comportamento do sistema de aterramento [28], [29].

#### 3.1.2 Variação de parâmetros do solo com a frequência

Os efeitos eletromagnéticos presentes no sistema de aterramento são diretamente dependentes dos parâmetros eletromagnéticos que caracterizam o solo. O efeito indutivo é diretamente influenciado pela permeabilidade magnética  $\mu$ , enquanto o efeito capacitivo é impactado pela permissividade elétrica  $\epsilon$ , e o efeito condutivo é diretamente afetado pela condutividade elétrica  $\sigma$  do solo.

O valor de permeabilidade magnética do solo  $\mu$  se aproxima do valor de permeabilidade magnética do vácuo  $\mu_0$ , e tem seu comportamento aproximadamente constante com a frequência. Essa condição é observada para a maior parte dos solos [28]. Já a permissividade elétrica do solo  $\varepsilon$  e a condutividade elétrica do solo  $\sigma$  variam conforme o tipo de solo, além de também serem fortemente dependentes da frequência [28]. Em particular, a condutividade aumenta e a permissividade diminui com o aumento da frequência.

A dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo decorre dos processos de polarização e perdas associadas que ocorrem nesse meio. Detalhes sobre a

determinação experimental da resistividade e da permissividade ao longo da faixa típica de frequências de descargas atmosféricas podem ser encontrados em [30], [31]. Ainda, a estimativa de tais parâmetros entre 100 Hz e 4 MHz pode ser realizada com base em fórmulas práticas propostas em [31] ou com base em um modelo físico causal proposto em [32].

Vale mencionar que, de acordo com Alipio, Visacro e outros [33]-[35], considerar o efeito da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo em simulações de transitórios em aterramentos elétricos implica uma melhoria do desempenho do aterramento, sendo tal melhoria mais expressiva para solos de maior resistividade. Ainda segundo esses autores, desprezar esse fenômeno para solos de resistividade moderada e, sobretudo, solos de resistividade elevada pode incorrer em erros significativos na avaliação da resposta do aterramento quando submetido a correntes de altas frequências.

#### 3.1.3 Efeitos de propagação

O objetivo da instalação de eletrodos de aterramento é fornecer caminho de baixa impedância para escoamento da corrente elétrica injetada, além de garantir uma distribuição suave de potenciais no nível do solo, protegendo equipamentos e seres vivos nas proximidades do ponto de injeção de corrente. Essa onda de corrente elétrica injetada viaja pelo eletrodo de aterramento, estando, portanto, sujeita a efeitos de propagação.

O solo é um meio que reúne concomitantemente características condutivas e dielétricas, configurando-se como um meio dielétrico com perdas [20]. Dessa forma, ondas de corrente que se propagam em um condutor imerso no solo sofrem dois fenômenos de propagação – a atenuação e a distorção.

Uma onda viajante em um eletrodo imerso em um meio dielétrico com perdas sofre alterações em sua forma à medida que se propaga, configurando-se sua distorção. Adicionalmente, essa onda de corrente tem sua amplitude também variada, tornandose menor à medida que se propaga ao longo do eletrodo, o que consiste em sua atenuação. Em virtude desses dois fenômenos, quanto maior a distância em relação ao

24
ponto de injeção de corrente, maiores são as deformações e atenuações sofridas pelas ondas de corrente e de tensão.

A Figura 3.2 ilustra a propagação de uma onda de corrente ao longo de um eletrodo, onde nota-se a ocorrência de ambos os efeitos descritos.



Figura 3.2 - Atenuação e distorção de uma onda de corrente ao longo de um eletrodo. Adaptado de [26]

Em particular, os efeitos de atenuação em sistemas de aterramento variam expressivamente conforme o solo, tornando-se mais pronunciados em solos de elevada condutividade. Adicionalmente, os efeitos de atenuação são tão mais pronunciados quanto maior for a frequência da onda de corrente [28].

# 3.1.4 Comportamento impulsivo de sistemas de aterramento

O comportamento de sistemas de aterramento varia consideravelmente conforme a solicitação em termos da forma de onda de corrente injetada. Em sistemas de aterramento submetidos a correntes de baixas frequências, como correntes de curtocircuito, apenas o efeito condutivo do sistema de aterramento é relevante, sendo os efeitos indutivo e capacitivo desprezíveis. Os efeitos de propagação tampouco são relevantes, uma vez que os comprimentos de onda em baixas frequências são muito elevados, chegando à ordem de milhares quilômetros. Assume-se, portanto, sem perda de consistência física, que uma onda de corrente de baixa frequência injetada em um eletrodo de aterramento alcança todo o seu comprimento instantaneamente. Uma vez que em baixas frequências os efeitos reativos no aterramento são desprezíveis, este pode ser representado por uma resistência pura, denominada resistência de aterramento. Por outro lado, ondas de corrente advindas de descargas atmosféricas possuem componentes de alta frequência, de forma que, para essa natureza de solicitação os efeitos indutivo e capacitivo tornam-se relevantes. Em um cenário no qual efeitos reativos influenciam o comportamento de sistemas de aterramento, o termo resistência de aterramento torna-se inadequado. Nesse caso, o aterramento é mais adequadamente representando por uma impedância complexa.

Essa impedância, normalmente chamada de impedância harmônica de aterramento, depende basicamente da geometria e das características eletromagnéticas do aterramento, e é fortemente dependente da frequência. Essa dependência se dá pela variação com a frequência da relevância dos efeitos indutivo e capacitivo do aterramento, e especialmente da considerável variação dos parâmetros elétricos do solo.

Adicionalmente, os efeitos de propagação também são presentes no comportamento de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas. Os fenômenos de distorção e, sobretudo, de atenuação, apresentam influência significativa no comportamento do aterramento, uma vez que os comprimentos de onda associados aos componentes de frequência mais elevados possuem ordem de grandeza comparável às dimensões de eletrodos de aterramento tipicamente empregados em torres de transmissão.

Uma onda de corrente de alta frequência injetada no eletrodo de aterramento sofre consideráveis atenuações à medida que se propaga. Essas atenuações podem ser tão expressivas, que é possível que não haja considerável circulação de corrente em parcelas do eletrodo distantes do ponto de injeção. Nesse cenário, tem-se o comprimento efetivo do sistema de aterramento, que como o próprio nome sugere, consiste em um valor limite de comprimento de eletrodos efetivamente utilizados no escoamento de correntes impulsivas. Parcelas de eletrodos além do comprimento efetivo seriam, portanto, subutilizadas. Por ser oriundo de fenômenos de propagação, o comprimento efetivo é tão menor quanto maior for a frequência das ondas de

26

corrente injetadas, e tão menor quanto mais condutivo for o solo. Em termos práticos, eletrodos de aterramento com comprimento superior ao efetivo não implicam melhoria do desempenho impulsivo do sistema de aterramento [28], [29].

Ressalta-se que essa condição não é observada quando da avaliação de sistemas de aterramento submetidos a correntes de baixas frequências. Nessas ocasiões, quanto maiores os eletrodos de aterramento empregados, necessariamente menores serão os valores de resistência de aterramento em baixas frequências, uma vez que para essa faixa de frequências os efeitos de propagação não influenciam o comportamento do sistema.

Como previamente descrito, descargas atmosféricas consistem em ondas impulsivas de corrente de curta duração, tendo, portanto, ao seu espectro associadas componentes de frequência variando desde C.C. até frequências da ordem de centenas de kHz. Dessa forma, para avaliação de sistemas de aterramento submetidos a descargas atmosféricas, devem ser considerados todos os fenômenos eletromagnéticos presentes em seu comportamento sob essas solicitações de corrente. Nesse cenário, a fim de se obter resultados consistentes a partir dessas avaliações, deve-se considerar a influência, não apenas do efeito condutivo, mas também dos efeitos capacitivo e indutivo presentes no sistema de aterramento. Além disso, a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo e os efeitos de propagação também devem ser considerados em avaliações do comportamento transitório de aterramentos frente a correntes impulsivas.

# 3.2 Representações de sistemas de aterramento em simulações no domínio do tempo

Foi descrito no item anterior o comportamento de sistemas de aterramento submetidos a correntes advindas de descargas atmosféricas, bem como os principais efeitos eletromagnéticos associados. A partir disso, são levantadas representações de sistema de aterramento usual e potencialmente aplicáveis na realização de simulações desses fenômenos. Essas representações são avaliadas sob uma série de aspectos, desde a confiabilidade dos resultados apresentados até a complexidade de implementação e simulação em programas de simulação do tipo ATP/EMTP.

### 3.2.1 Impedância harmônica

A impedância harmônica  $Z(\omega)$  é a representação rigorosa do comportamento dependente da frequência de um sistema de aterramento, ao longo da faixa de interesse para o transitório em questão. Por definição, a impedância harmônica é a razão entre os fasores da elevação de potencial no ponto de injeção  $V(\omega)$  e da corrente  $I(\omega)$  injetada [26], [28], ou seja:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}$$
(3.1)

Como mencionado, o comportamento do sistema de aterramento varia significativamente com a frequência da onda de corrente injetada em função dos aspectos previamente detalhados. Uma representação rigorosa do sistema de aterramento deve, portanto, contemplar essas variações.

O gráfico da Figura  $3.3^2$  ilustra a variação da impedância harmônica de um típico sistema de aterramento utilizado em torres de transmissão em função da frequência. Ressalta-se que a impedância harmônica Z( $\omega$ ) é um número complexo, com módulo e ângulo associados. O ângulo da impedância permite identificar o pronunciamento de um efeito eletromagnético em detrimento de outro. Ângulos positivos indicam um pronunciamento mais significativo nos efeitos indutivos no aterramento, enquanto ângulos negativos demonstram que os efeitos capacitivos se mostram mais relevantes. Valores de ângulo próximos de zero mostram que o comportamento do sistema de aterramento se aproxima de uma resistência.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> A Figura 3.3 foi gerada a partir de um rigoroso modelo para avaliação do comportamento variável na frequência de sistemas de aterramento, denominado Modelo Eletromagnético Híbrido. Detalhes acerca da metodologia adotada constam no item 4.1.5.



Figura 3.3 – Impedância harmônica de um sistema de aterramento.

O sistema de aterramento da Figura 3.3 corresponde a um conjunto de quatro eletrodos de 80 m radialmente dispostos (ver Figura 3.1) em um solo homogêneo de resistividade igual a 5000 Ωm.

Esse gráfico permite o levantamento de uma série de importantes constatações. Primeiramente confirma a característica fortemente dependente da frequência do sistema de aterramento como um todo. Por outro lado, nota-se que até aproximadamente 1 kHz essa dependência da frequência não é tão considerável. Observa-se que o valor de impedância de aterramento pouco varia. Trata-se da faixa de frequência para a qual os efeitos capacitivo e indutivo não influenciam significativamente no comportamento do sistema de aterramento. Nessa faixa, apenas o efeito condutivo do solo é relevante, de forma que o comportamento do sistema de aterramento se aproxima de sua resistência de aterramento em baixas frequências. O ângulo nulo da impedância de aterramento corrobora essa constatação.

Esse modelo representa o rigoroso comportamento do sistema de aterramento para solicitações diversas, incluindo faltas de baixa frequência e transitórios, desde que a impedância harmônica seja determinada em uma faixa de frequências apropriada. É, portanto, adequado para avaliações envolvendo sistemas de aterramento sob solicitações de descargas atmosféricas, contemplando todas as faixas envolvidas no

29

típico espectro de frequência desses fenômenos. O processo necessário para implementação rigorosa desse modelo em simulações em programas do tipo ATP/EMTP é, entretanto, complexo.

Programas do tipo ATP/EMTP não possuem modelos de aterramento que contemplem sua resposta dependente da frequência. Uma alternativa para a representação do comportamento variável na frequência do sistema de aterramento é por meio de redes elétricas equivalentes, compostas por elementos lineares de circuitos.

Nesse cenário, o *Vector Fitting* pode ser utilizado no processo de representação. O *Vector Fitting* consiste em uma poderosa ferramenta numérica de domínio público, muito utilizada para incorporar elementos dependentes da frequência em estudos de transitórios em plataformas de simulação no domínio do tempo, como ATP/EMTP. Por meio dessa ferramenta, é possível obter um modelo de polos e resíduos que represente um dado comportamento medido ou calculado no domínio da frequência. A partir desse modelo, obtém-se uma rede elétrica composta por elementos lineares de circuitos, que traduz o comportamento dependente da frequência do dispositivo em questão. Essa rede pode ser prontamente incluída em programas do tipo ATP/EMTP, permitindo a representação do rigoroso comportamento dependente da frequência de sistemas de aterramento. Detalhes acerca dessa ferramenta, bem como metodologia de determinação de parâmetros, são descritos em [36] e [37]. O algoritmo do *Vector Fitting* consta em [38].

Salienta-se que, ainda que o *Vector Fitting* enquanto ferramenta viabilize a representação do comportamento dependente da frequência de sistemas de aterramento, o processo de determinação desse comportamento com aceitável exatidão é complexo. Aspectos geométricos e materiais do sistema de aterramento influenciam significativamente esse comportamento, cuja determinação exige aplicação de complexas metodologias de cálculo, baseadas em teoria de campo.

A impedância harmônica consiste em uma rigorosa representação do comportamento de sistemas de aterramento para diversas naturezas de solicitações. Em princípio, por meio dessa representação, obter-se-iam resultados fiéis em simulações que envolvam

30

sistemas de aterramento em programas do tipo ATP/EMTP. Ainda assim, a complexidade acerca do processo de determinação do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento torna essa forma de representação em programas do tipo ATP/EMTP ainda pouco usual para sistemas de aterramento reais. Nesse sentido, para fins de simulações no domínio do tempo, representações de sistemas de aterramento de implementação menos complexa são alternativamente empregadas. Essas representações, muitas vezes referidas como representações compactas, são descritas a seguir.

#### 3.2.2 Resistência de aterramento

Entre as possíveis formas de representação do sistema de aterramento em simulações em programas do tipo ATP/EMTP, a representação por meio da resistência de aterramento em baixas frequências RLF é, provavelmente, a mais utilizada, a exemplo de [3]-[11].

A resistência em baixas frequências RLF de um sistema de aterramento é, por definição, a razão entre a elevação de potencial  $V_T$  de um sistema de aterramento e a corrente de baixa frequência injetada no aterramento  $I_T$  que provocou essa elevação, conforme:

$$RLF = \frac{V_{\rm T}}{I_{\rm T}}$$
(3.2)

Nessa representação, o sistema de aterramento é simulado como um resistor, cuja resistência é igual ao valor de resistência de aterramento em baixas frequências RLF. Essa representação despreza os fenômenos reativos presentes no sistema de aterramento, considerando apenas o efeito condutivo do solo.

Entre as principais vantagens de se adotar esse modelo, destaca-se sua simples implementação. Esse modelo permite concentrar o comportamento de todo sistema de aterramento em um único elemento linear, condição favorável para simulações em

programas de simulação de transitórios do tipo ATP/EMTP. Adicionalmente, os parâmetros do sistema de aterramento são resumidos em um valor de resistência de relativa simples determinação, tanto por meio de medições locais, como por meio de cálculos.

Essa representação apresenta resultados satisfatórios em simulações que envolvam sistemas de aterramento submetidos a correntes de baixas frequências, tais como correntes de curto-circuito. Como previamente descrito, para ondas em baixas frequências, os efeitos reativos – desprezados nessa representação – de fato não apresentam uma relevância significativa no comportamento do aterramento. Isso é notado no gráfico da impedância harmônica (ver Figura 3.3), que demonstra que para frequências inferiores a 1 kHz, o sistema de aterramento comporta-se, de fato, praticamente como uma resistência.

Por outro lado, a desconsideração dos efeitos indutivo e capacitivo do aterramento, ainda que razoável para correntes de baixas frequências, pode levar a erros consideráveis em avaliações que envolvam sistemas de aterramento submetidos a ondas de corrente com componentes de altas frequências, tais como descargas atmosféricas.

### 3.2.3 Impedância impulsiva

Buscam-se representações de sistemas de aterramento que proporcionem maior assertividade em simulações de fenômenos impulsivos em programas do tipo ATP/EMTP e que possuam implementação simplificada. Nesse contexto, é alternativa representar o sistema de aterramento por meio de sua impedância impulsiva em simulações no domínio do tempo.

Uma onda de corrente impulsiva injetada em um sistema de aterramento provoca nele uma elevação de potencial. A impedância impulsiva é, por definição, a razão entre o valor máximo da elevação de potencial do aterramento e o valor de crista da onda de corrente impulsiva injetada, ou seja:

$$Zp = \frac{Vp}{Ip}$$
(3.3)

em que Zp é a impedância impulsiva, Vp é a máxima elevação de potencial do aterramento, e Ip é o valor de pico da onda de corrente advinda da descarga atmosférica.

A fim de ilustrar esse conceito, foi simulada a injeção de uma típica onda de corrente das primeiras descargas atmosféricas medidas no Morro do Cachimbo [14], reproduzindo seus parâmetros medianos. Essa onda de corrente foi injetada em típico sistema de aterramento de torres de transmissão, imerso em solo homogêneo de resistividade 3000  $\Omega$ m, com configuração radial de eletrodos de 60 m de extensão (ver Figura 3.1).

A Figura 3.4 apresenta os gráficos resultantes dessa simulação, apresentando o gráfico da onda de corrente de descarga atmosférica juntamente com o gráfico da onda de tensão resultante. São apresentados os valores de Vp e Ip supracitados, cuja razão consiste no valor de Zp.



Figura 3.4 – Simulação de onda de corrente impulsiva e elevação de potencial do sistema de aterramento.  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m.

Nota-se que os picos de tensão e corrente não necessariamente ocorrem em mesmo instante de tempo. Para o exemplo supracitado, foi obtido um valor de Zp = 23,55  $\Omega$ . Para esse mesmo arranjo de aterramento, o valor da resistência em baixa frequências é RLF = 33,68  $\Omega$ . Observam-se, portanto, as expressivas diferenças entre os comportamentos impulsivo e em baixas frequências de sistemas de aterramento.

Esse parâmetro possui grande potencial de aplicação sob o ponto de vista prático em estudos de proteção contra descargas atmosféricas. A partir da impedância impulsiva, é possível estimar o máximo potencial elétrico que um sistema de aterramento pode assumir para injeção de uma conhecida corrente impulsiva.

Em relação à representação do sistema de aterramento por meio de sua impedância harmônica, a representação por sua impedância impulsiva permite uma representação compacta do comportamento impulsivo do sistema de aterramento, favorecendo sua utilização em plataformas de simulação no domínio do tempo. Adicionalmente, o levantamento de valores de impedâncias impulsivas com razoável confiabilidade é simplificado, em comparação ao levantamento do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento. Em [34], por exemplo, são apresentadas equações práticas para determinação da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramentos, considerando-se resultados de simulação aplicando-se um modelo eletromagnético rigoroso.

Ainda que não seja uma representação rigorosa do comportamento do sistema de aterramento, a impedância impulsiva considera de maneira aproximada todos efeitos eletromagnéticos presentes em sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas de corrente, diferentemente da representação pela resistência de aterramento em baixas frequências. Observa-se, portanto, que essa simplificação considera em seu processo de levantamento o comportamento impulsivo do sistema de aterramento descrito no item 3.1.4. A exemplo do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento, o valor de impedância impulsiva depende do sinal de corrente injetado e do ponto de injeção dessa corrente.

Visacro e Silveira realizaram simulações comparando o comportamento de sistemas de aterramento de linhas de transmissão representados por sua impedância harmônica e por sua impedância impulsiva [39]. Para cada forma de representação do aterramento, foram simuladas as máximas tensões registradas na cadeia de isoladores quando da incidência de descargas atmosféricas. Os resultados de simulações apresentaram valores semelhantes de máximas tensões registradas, para ambas as representações de aterramento.

Essas avaliações sugerem o potencial de utilização da impedância impulsiva como representação de sistemas de aterramento em simulações no domínio do tempo envolvendo correntes advindas de descargas atmosféricas. Essa representação reúne simplicidade de implementação, ao passo que sugere assertividade na avaliação da interação de linhas de transmissão e descargas atmosféricas, especialmente no que se refere à avaliação das máximas sobretensões em linhas. Ainda assim, certas limitações devem ser observadas.

Diferentemente da impedância harmônica, a impedância impulsiva não reflete um conceito físico. Trata-se de uma representação essencialmente estática do comportamento impulsivo do sistema de aterramento, condensando essas características em um único elemento. Adicionalmente, o valor de impedância impulsiva varia com as características da onda de descarga atmosférica. Dessa forma, a impedância impulsiva calculada para certa onda de corrente não necessariamente representará com razoável exatidão o comportamento deste mesmo sistema para demais solicitações em termos de descargas atmosféricas, notadamente tendo-se em conta sua natureza estatística.

# 3.3 Considerações finais

A fim de se obterem resultados consistentes a partir de simulações, é fundamental a compreensão do real comportamento de sistemas de aterramento submetidos a solicitações impulsivas. A partir disso, buscam-se formas de representação de sistemas de aterramento que contemplem esse comportamento, a fim de empregá-las nas simulações conduzidas.

35

A impedância harmônica consiste na rigorosa representação do sistema de aterramento, contemplando seu rigoroso comportamento dependente da frequência diante de diversas solicitações de ondas de corrente. Entretanto, a complexidade de sua implementação torna seu emprego em simulações de programas do tipo ATP/EMTP pouco usual.

Já a representação do sistema de aterramento por meio de sua resistência em baixas frequências é de simples implementação. Por outro lado, pode não ser adequada para simulações que envolvam descargas atmosféricas, uma vez que essa representação despreza uma série de fenômenos eletromagnéticos relevantes no comportamento impulsivo de sistemas de aterramento.

Nesse cenário, a representação do sistema de aterramento por meio de sua impedância impulsiva proporciona facilidade de implementação em programas de simulação, ao passo que sugere assertividade em avaliações, tomando como referência o rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento. Entretanto, a simulação do aterramento a partir de sua impedância impulsiva requer cautelas, uma vez que se trata de uma representação puramente estática.

# 4 Avaliação de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão parcialmente protegidas por dispositivos para-raios

A partir da contextualização teórica apresentada nos capítulos anteriores, são conduzidas simulações para avaliação do comportamento de para-raios instalados em linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas. Em um primeiro momento, são consideradas as sobretensões nos isoladores de torres de transmissão, a partir das quais são levantados os potenciais de ruptura do isolamento da linha. Essas avaliações são conduzidas para as três representações do sistema de aterramento abordadas no trabalho – impedância harmônica, resistência de aterramento em baixas frequências e impedância impulsiva.

As sobretensões consideradas são levantadas a partir de simulações no domínio do tempo, uma vez que fenômenos atmosféricos e dispositivos para-raios são mais bem representados nesse domínio. É simulada no programa ATP a incidência de uma descarga atmosférica no topo de uma torre de transmissão, para diversas condições passíveis de ocorrência. São consideradas variações nas condições de aterramento, em amplitudes da descarga e na forma de proteção da torre por dispositivos para-raios.

# 4.1 Modelagem de elementos

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é um fenômeno físico que envolve uma série de elementos. São descritos a seguir os modelos adotados para representação de cada elemento nas simulações conduzidas.

# 4.1.1 Condutores da linha de transmissão

No presente estudo foi considerada uma linha de transmissão trifásica, de 138 kV, circuito simples, 400 m de vão entre torres. A linha possui 3 condutores fase do tipo CAA – LINNET com flecha de 7 m, e um cabo de blindagem (cabo para-raios) do tipo 3/8" EHS com flecha de 4 m. Os condutores são simulados a partir do modelo de linha de parâmetros dependentes da frequência JMarti [40], para variações na frequência

entre 1 Hz e 10 MHz. A matriz de transformação modal foi calculada na frequência de 200 kHz.

Os condutores são posicionados na torre de transmissão conforme as seguintes coordenadas (distâncias em metros):

- Fase A: (-2,9; 28,72)
- Fase B: (2,9; 26,86)
- Fase C: (-2,9; 25)
- Cabo de blindagem: (0; 31,61)

As coordenadas correspondem, respectivamente, à posição horizontal e à altura na torre de transmissão. O ponto (0,0) está situado no centro da torre, à altura do solo.

# 4.1.2 Torre de transmissão

A Figura 4.1 apresenta a geometria da torre de transmissão de 138 kV considerada no estudo.



Figura 4.1 - Geometria da torre de transmissão. Adaptado de [41]

A torre de transmissão é modelada como um conjunto de linhas de transmissão sem perdas ligadas em série, conectando o cabo de blindagem ao sistema de aterramento. A cada linha de transmissão simulada está associada uma impedância de surto Z<sub>s</sub>, que varia conforme a geometria do trecho da torre. A impedância de surto associada a cada linha é calculada a partir da fórmula de Jordan revisada, que foi estendida para multicondutores verticais, como é o caso de torres de transmissão. A exatidão do método proposto foi aferida por comparação com resultados decorrentes da aplicação de um rigoroso modelo eletromagnético [42].

A torre de transmissão em questão é simulada como um sistema de quatro condutores verticais e, adicionalmente, é dividida em quatro linhas de transmissão conectadas em série para se ter em conta a variação dos efeitos mútuos entre esses condutores, desde a base da torre até o seu topo. Essas linhas têm seus parâmetros abaixo descritos.

- Linha 1: Z<sub>s</sub> = 289,75 Ω; Comprimento: 6,75 m
- Linha 2: Z<sub>s</sub> = 235,24 Ω; Comprimento: 8,86 m
- Linha 3: Z<sub>s</sub> = 182,20 Ω; Comprimento: 9,00 m
- Linha 4: Z<sub>s</sub> = 130,64 Ω; Comprimento: 9,00 m

Na representação utilizada, a 'Linha 1' corresponde ao trecho mais alto da torre de transmissão. Em todas as linhas de transmissão, a velocidade de propagação da onda considerada foi de 2,4x10<sup>8</sup> m/s.

### 4.1.3 Descarga atmosférica

As descargas atmosféricas são simuladas a partir de forma de onda de corrente proposta pelo grupo de estudos do CIGRÉ em desempenho de linhas de transmissão frente a descargas em [4]. A partir dessa representação, são contempladas importantes características do fenômeno físico, tais como a natureza côncava na frente da onda e a máxima taxa de crescimento de corrente (S<sub>MAX</sub>) ocorrendo próximo ao valor de pico. Essas características são especialmente importantes no caso de primeiras descargas de retorno, as quais são de maior interesse na avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

39

Esse modelo de forma de onda de corrente está implementado no ATP (CIGRE TYPE 15). Nele, a onda de corrente é implementada a partir dos parâmetros Amplitude, T30, T<sub>cauda</sub> e di/dt<sub>max</sub>, conforme descrição apresentada no item 2.1.2.

# 4.1.4 Para-raios

Nas avaliações conduzidas, é considerado o dispositivo para-raios 3EL1 132 - 1P.2, fabricado pela Siemens. Trata-se de um para-raios de ZnO empregável em linhas de transmissão de 138 kV. As principais especificações técnicas do equipamento são apresentadas na Tabela 4.1.

Classe de descarga de LT	2
Energia específica (kJ/kV)	5
Corrente nominal de descarga (kA)	10
Altura (m)	1.24
Número de colunas ZnO em paralelo	1
Tensão nominal (kV)	132
Máxima tensão de operação contínua (kV)	106
Tensão residual para corrente de 1 kA 30/60 μs (kV)	269
Tensão residual para corrente de 10 kA 8/20 µs (kV)	337

Para as simulações realizadas, os dispositivos para-raios são simulados a partir de seu modelo dinâmico dependente da frequência proposto pelo grupo de estudo do IEEE em [44]. A Figura 4.2 ilustra o circuito equivalente desse modelo.



Figura 4.2 – Representação do modelo de para-raios. Adaptado de [44]

Nesse circuito, A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub> são resistores não lineares. Os valores dos resistores, indutores e do capacitor apresentados dependem de aspectos geométricos do dispositivo, conforme critério descrito em [44]. Para o modelo de para-raios adotado, os valores dos parâmetros do circuito acima são:

- L<sub>0</sub> = 0,248 μH
- L<sub>1</sub> = 26,76 μH
- R<sub>0</sub> = 124 Ω
- R<sub>1</sub> = 80,56 Ω
- C = 8,06 µF

A Figura 4.3 apresenta as curvas que ilustram o comportamento tensão-corrente dos resistores não-lineares  $A_0$  e  $A_1$ , também determinadas de acordo com procedimento descrito em [44].



Figura 4.3 – Comportamento tensão-corrente dos resistores não-lineares

A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub>

# 4.1.5 Sistema de aterramento

Como previamente descrito, avalia-se o comportamento de dispositivos para-raios instalados em linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas para três diferentes representações do sistema de aterramento. Tem-se primeiramente a impedância harmônica, que representa rigorosamente o comportamento dependente da frequência do aterramento, da qual decorrem suas representações simplificadas – a impedância impulsiva e a resistência em baixas frequências. A fim de levantar os comportamentos rigorosamente dependentes da frequência dos aterramentos avaliados, é empregado o Modelo Eletromagnético Híbrido – HEM (do inglês, *Hybrid Electromagnetic Model*).

## 4.1.5.1 Modelo híbrido eletromagnético

Como mencionado no capítulo anterior, a determinação do comportamento variável na frequência de sistemas de aterramento requer a aplicação de metodologias de cálculo baseadas em teoria de campo. O HEM se baseia na direta aplicação das equações de campo no domínio da frequência.

Nesse modelo, os eletrodos de aterramento são discretizados em uma série de condutores cilíndricos, os quais, quando excitados, comportam-se como fontes de corrente de dois tipos, uma fonte longitudinal (I<sub>L</sub>), cuja corrente circula ao longo do condutor; e uma transversal (I<sub>L</sub>), cuja corrente dispersa do condutor para o meio circunvizinho. A Figura 4.4 ilustra esse comportamento.



Figura 4.4 – Condutor comportando-se como fonte de correntes. Adaptado

de [45]

Essa ideia foi originalmente proposta por Visacro para modelagem de aterramentos elétricos e, posteriormente, expandida por Visacro e Soares para modelagem de condutores genéricos solicitados por descargas atmosféricas, idealizando o denominado Modelo Híbrido Eletromagnético (HEM) [45].

As fontes de corrente transversais apresentam efeitos puramente elétricos, em razão de sua natureza divergente. Por outro lado, as fontes longitudinais, cuja natureza da corrente associada é solenoidal, apresentam efeitos eletromagnéticos. A cada fonte de corrente transversal está associado um campo elétrico de natureza conservativa, o qual produz uma elevação de potencial em relação ao infinito em pontos genéricos do meio (no caso de sistemas de aterramento, o solo), no próprio condutor e em demais condutores do aterramento. Quanto às fontes de corrente longitudinais, a cada uma há um campo magnético associado, cuja variação no tempo gera um campo elétrico não conservativo. Esse campo elétrico induz uma força eletromotriz no próprio condutor fonte e em demais condutores.

Nesse contexto, as tensões associadas a cada condutor podem ser equacionadas a partir de formulações matriciais, como se segue:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_{\mathbf{T}} \mathbf{I}_{\mathbf{T}} \tag{4.1}$$

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{Z}_{\mathbf{L}} \mathbf{I}_{\mathbf{L}} \tag{4.2}$$

Em (4.1), a matriz V corresponde ao potencial médio em cada elemento, a matriz  $I_T$  às correntes que dispersam de cada elemento, e a matriz  $Z_T$  às impedâncias transversais que quantificam os acoplamentos condutivo e capacitivo entre os elementos.

Em (4.2), a matriz  $\Delta V$  corresponde à força eletromotriz induzida em cada elemento, a matriz I<sub>L</sub> às correntes que circulam ao longo de cada elemento, e a matriz Z<sub>L</sub> às impedâncias longitudinais que quantificam os acoplamentos resistivo e indutivo entre os elementos sob avaliação.

A partir do estabelecimento de relações entre V e  $\Delta V$  com os potenciais nodais V<sub>N</sub>, e entre I<sub>T</sub> e I<sub>L</sub> com as correntes I<sub>N</sub> injetadas nos nós, esses dois sistemas matriciais são condensados em um único:

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{g}}\mathbf{V}_{\mathbf{N}} = \mathbf{I}_{\mathbf{N}} \tag{4.3}$$

em que  $Y_g$  é uma matriz admitância determinada a partir de  $Z_T$  e  $Z_L$ ,  $V_N$  é o vetor de potenciais nodais (em relação ao terra remoto) e  $I_N$  é o vetor de correntes injetadas nos nós. A partir de (4.3) tem-se uma relação entre os fasores de tensão e corrente no aterramento que ilustram seu comportamento para uma dada frequência da avaliação. Estendendo-se essa avaliação para uma faixa de frequências de interesse, tem-se o comportamento variável na frequência do sistema de aterramento [41]. No presente trabalho, o comportamento do aterramento foi levantado para frequências entre 1 Hz e 10 MHz, contemplando a faixa típica de frequências presentes no espectro de descargas atmosféricas.

Cabe ressaltar que o modelo híbrido eletromagnético apresentou resultados consistentes quando da avaliação do comportamento transitório de aterramentos de diferentes arranjos, entre os quais hastes [34], malhas [35], além de eletrodos horizontais [30], arranjo empregado em sistemas de aterramento de pé de torres de transmissão.

#### 4.1.5.2 Variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência

O comportamento rigorosamente dependente da frequência levantado para o sistema de aterramento considera a variação dos parâmetros elétricos do solo (condutividade<sup>3</sup> e permissividade) com a frequência. A dependência da frequência desses parâmetros é considerada com base na aplicação de um modelo físico causal desenvolvido por Alipio e Visacro, baseado em um grande número de medições de campo, nas relações de

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> A condutividade elétrica do solo é dada pelo inverso da resistividade elétrica do solo.

Kramers-Kronig e nas Equações de Maxwell [32]. Esse modelo é expresso resumidamente pelas equações a seguir:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \times h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1 \text{ MHz}}\right)^{\gamma}$$
(4.4)

$$\varepsilon_{\rm r} = \frac{\varepsilon_{\infty}'}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) \times 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0 (1 \text{ MHz})^{\gamma}} \sigma_0 \times h(\sigma_0) f^{\gamma-1}$$
(4.5)

Em (4.4) e (4.5),  $\sigma$  é a condutividade do solo em mS/m,  $\sigma_0$  é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) em mS/m,  $\varepsilon_r$  é a permissividade relativa do solo,  $\varepsilon'_{\infty}/\varepsilon_0$  é a permissividade relativa em altas frequências,  $\varepsilon_0$  é a permissividade do vácuo ( $\varepsilon_0 \cong$ 8,854×10<sup>-12</sup> F/m) e f é a frequência em Hz. Segundo recomendação em [32], os seguintes parâmetros são adotados de modo a se ter um efeito médio do fenômeno de dependência da frequência:  $\gamma = 0,54$ ,  $\varepsilon'_{\infty}/\varepsilon_0 = 12$  e h( $\sigma_0$ ) = 1,26× $\sigma_0^{-0,73}$ .

# 4.1.5.3 Representações de sistemas de aterramento em programas de simulação no domínio do tempo

Foi descrito o mecanismo de levantamento do comportamento variável na frequência de sistemas de aterramento. Esse comportamento deve ser implementado em plataformas de simulação de transitórios no domínio do tempo.

Para cada frequência, a impedância harmônica de aterramento  $Z(j\omega)$  corresponde à relação entre o fasor da elevação de potencial (com relação ao terra remoto) no ponto de injeção de corrente e o fasor da corrente injetada. A partir da impedância harmônica, determina-se a admitância de aterramento  $Y(j\omega) = 1/Z(j\omega)$ , que pode ser ajustada ao longo da faixa de frequências de interesse com um modelo de polos e resíduos [41]. O modelo de ajuste é equacionado conforme:

$$Y(s = j\omega) \cong Y_{fit}(s = j\omega) = \sum_{m=1}^{N} \frac{r_m}{s - a_m} + d + se$$
(4.6)

Em (4.6),  $r_m$  são os resíduos,  $a_m$  são os polos, d e e são termos opcionais, e N corresponde à ordem do modelo (número de polos). Considerando um sistema físico real, o modelo descrito por (4.6) deve atender alguns requisitos, sendo os principais:

- Os polos e os resíduos são reais ou aparecem em pares de complexos conjugados.
- ii. Os termos d e e, se presentes, são números reais.
- iii. Os polos estão no semiplano esquerdo do plano complexo.
- iv. O modelo é passivo, isto é, não deve gerar energia.

Uma vez obtido o modelo de aterramento baseado em uma soma de funções racionais é possível sintetizar um circuito equivalente, composto por uma série de ramos conectados entre um dado nó e o nó de referência (terra). Os termos d e e de (4.6) correspondem, respectivamente, a uma condutância e uma capacitância. Os demais termos são empregados para sintetizar ramos RL, no caso de polos reais, ou ramos RLC, no caso de polos complexos conjugados. Esse circuito equivalente pode ser prontamente incluído em programas de cálculo de transitórios no domínio do tempo.

As representações simplificadas do aterramento decorrem da impedância harmônica obtida. Como descrito no item 3.2.2, a resistência de aterramento consiste na razão entre a elevação de potencial do sistema de aterramento e a corrente injetada que provocou essa elevação de potencial, conforme equação (3.2), em baixas frequências. Nesse sentido, simula-se no ATP a injeção de um degrau unitário de corrente no aterramento representado pela impedância harmônica (circuito equivalente sintetizado) e registra-se a elevação de potencial resultante; o valor da resistência de aterramento corresponde a essa elevação de potencial em regime permanente.

Em processo análogo, é levantada a impedância impulsiva do aterramento para as simulações conduzidas. Como descrito no item 3.2.3, a impedância impulsiva consiste na razão entre a máxima elevação de potencial do sistema de aterramento e a corrente de natureza impulsiva que provocou essa elevação de potencial, conforme equação (3.3). Nesse sentido, foi simulada a injeção de uma corrente impulsiva no aterramento representado pela impedância harmônica e registrada sua máxima

46

elevação de potencial, a partir da qual é obtida a impedância impulsiva. Ressalta-se que a impedância impulsiva varia conforme a onda de corrente injetada no aterramento. Dessa forma, o valor de impedância impulsiva foi levantado para a injeção da mesma forma de onda empregada nas simulações deste trabalho.

Neste trabalho, o comportamento do sistema de aterramento é considerado linear. Não linearidades no sistema de aterramento estão associadas ao processo de ionização do solo, cujos efeitos são desprezados (ver Item 3.1). Dessa forma, as magnitudes de correntes injetadas não influenciam os valores levantados de impedância impulsiva ou de resistência em baixas frequências.

# 4.2 Sobretensões em linhas de transmissão parcialmente protegidas por para-raios

São levantadas sobretensões nas cadeias de isoladores da linha de transmissão simulada quando da incidência de descargas atmosféricas diretamente em suas torres. Esse levantamento ocorre para as três representações do aterramento abordadas, bem como para variações nas condições no aterramento e no número de para-raios instalados na torre de transmissão.

Em um primeiro momento, as sobretensões são avaliadas considerando a incidência no topo da torre de uma descarga atmosférica de parâmetros medianos, conforme medições na estação Morro do Cachimbo [16]. Para representar essa forma de onda, são empregados os seguintes parâmetros de descarga no modelo adotado para a onda de corrente:

- Amplitude: 45 kA
- **T30:** 2,9 μs (Td30 = 4,83 μs)
- **T**CAUDA: 50 μs
- **S**<sub>MAX</sub>: 31,03 kA/μs

A Figura 4.5 ilustra a onda de corrente de parâmetros medianos empregada nas simulações.



Figura 4.5 – Descarga atmosférica de parâmetros medianos representada a partir de forma de onda de corrente proposta pelo grupo de estudos do CIGRE [4]

A Tabela 4.2 apresenta os sistemas de aterramento considerados nas simulações, juntamente com seus respectivos valores de resistência de aterramento RLF e impedância impulsiva Zp. Os valores de impedância impulsiva foram calculados para a onda de tensão de parâmetros medianos, apresentada na Figura 4.5.

Sistema de aterramento	RLF	Zp
Aterramento 1: $\rho_{solo}$ = 1000 $\Omega$ m, L = 40 m	15,44 Ω	11,64 Ω
<b>Aterramento 2:</b> ρ <sub>solo</sub> = 3000 Ωm, L = 60 m	33,68 Ω	22,59 Ω
<b>Aterramento 3:</b> $ρ_{solo}$ = 5000 Ωm, L = 80 m	44,62 Ω	27,38 Ω
Aterramento 4: $\rho_{solo}$ = 10000 $\Omega$ m, L = 130 m	60,19 Ω	31,53 Ω

Tabela 4.2 – Sistemas de aterramento

Em que  $\rho_{solo}$  é a resistividade do solo e L é o comprimento de cada um dos cabos contrapeso empregados no aterramento de pé de torre, conforme Figura 3.1. Esses comprimentos basearam-se em práticas usualmente adotadas por concessionárias de transmissão.

Os sistemas de aterramento acima são apresentados em ordem crescente de impedância de aterramento, isto é, entre os aterramentos apresentados, o

Aterramento 1 ( $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m) possui o menor valor de impedância de aterramento, enquanto o Aterramento 4 ( $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m) possui a maior impedância de aterramento associada. Ressalta-se que quanto menor o valor da impedância de aterramento, melhor o desempenho do sistema de aterramento frente a solicitações diversas, inclusive descargas atmosféricas, objetos do presente trabalho. Essa condição é justificada pelos valores de resistividade do solo. O desempenho do aterramento é tão melhor quanto menor é a sua resistência de aterramento e sua impedância impulsiva. Nota-se que, a despeito dos longos contrapesos utilizados nos solos de resistividade mais elevada, os valores de impedância impulsiva e resistência de aterramento nesses solos ainda são superiores aos valores levantados para solos menos resistivos. Isso denota a necessidade de técnicas alternativas para melhoria do desempenho de LTs instaladas em regiões de solo de alta resistividade, entre as quais a utilização de dispositivos para-raios.

Nas simulações realizadas, dispositivos para-raios são instalados apenas na torre atingida pela descarga. Um par de torres adjacentes é incluído, a fim de considerar os efeitos de propagação das ondas de sobretensão nos condutores da linha, além das reflexões em vãos adjacentes [41]. A partir das torres de transmissão adjacentes, são inseridos trechos de linhas suficientemente longos, de forma que as reflexões das ondas de corrente e tensão nas extremidades da linha não alcancem a torre atingida, o que impactaria os resultados levantados.

A título de exemplo, a Figura 4.6 apresenta um dos circuitos simulados no ATP. Nesse circuito, é calculada a tensão nas três fases da linha quando da incidência de uma descarga atmosférica na torre, considerando dispositivos para-raios instalados na fase C. Nessa condição, o sistema de aterramento é representado por meio de sua impedância harmônica.



Figura 4.6 – Circuito de simulação da incidência de descarga atmosférica em linha de transmissão para avaliação de sobretensões nos terminais de isoladores

São avaliadas sobretensões considerando linhas de transmissão protegidas por pararaios instalados na fase C (fase inferior da linha de transmissão) e nas fases B e C. Esses posicionamentos são justificados pelo fato de para-raios instalados em fases mais baixas proporcionarem maior nível confiabilidade a linhas de transmissão parcialmente protegidas [2].

Nos gráficos apresentados nas seções 4.2.1 e 4.2.2 a seguir,  $Z(\omega)$ , Zp e RLF correspondem às ondas de tensão associadas, respectivamente, à representação do aterramento por meio de sua impedância harmônica, de sua impedância impulsiva e de sua resistência de aterramento em baixas frequências.

# 4.2.1 Para-raios instalado na fase C

Para essa condição de proteção, as sobretensões nas fases A e B apresentam formas de onda semelhantes, diferenciando-se pelo valor de pico alcançado. Nesse sentido, são apresentados os gráficos das ondas de tensão na fase B (fase desprotegida com valores de tensão mais críticos) e na fase C (fase protegida por para-raios) da linha de transmissão simulada.

As ondas de tensão são levantadas para diferentes condições de aterramento, entre a Figura 4.7 e a Figura 4.10. Ressalta-se que o valor inicial de tensão em cada uma das curvas abaixo é nulo.



Figura 4.7 – Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m. Sobretensão nas fases B (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados na fase C.





Figura 4.9 – Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m. Sobretensão nas fases B (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados na fase C.



Figura 4.10 – Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m. Sobretensão nas fases B (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados na fase C.

Nota-se que, em fases protegidas, prevalece o efeito limitador de tensão do dispositivo para-raios. Não há diferenças significativas entre as máximas tensões alcançadas nos terminais do isolador para diferentes representações do sistema de aterramento, tampouco para as variadas condições no aterramento de pé de torre, elucidando o papel impactante do para-raios na proteção da linha. Nota-se que as curvas inicialmente permanecem praticamente superpostas. Por outro lado, durante a cauda da onda observam-se diferenças consideráveis nas ondas de tensão simuladas, variando conforme condições do aterramento de pé de torre, e forma de representação desse aterramento. Piores sistemas de aterramento mantiveram tensões mais elevadas no dispositivo para-raios durante a cauda da onda de descarga. Em adição, a representação do aterramento por sua impedância impulsiva resultou em tensões menores no para-raios durante a cauda da descarga em comparação às tensões avaliadas para a representação do aterramento por sua impedância harmônica e pela resistência de aterramento, cujos resultados associados aproximaram-se entre si.

Já em fases não protegidas por para-raios, confirma-se a influência do aterramento de pé de torre na interação de linhas de transmissão com descargas atmosféricas. Quanto pior o aterramento, maiores as sobretensões observadas em isoladores não protegidos. Em adição, observa-se que as sobretensões levantadas para cada representação do aterramento são distintas. Em todos os casos simulados, a sobretensão decorrente da representação do aterramento a partir de sua resistência em baixas frequências foi a mais elevada, seguida da sobretensão associada à representação do aterramento a partir de sua impedância impulsiva. As menores sobretensões levantadas são decorrentes da representação do aterramento a partir de seu rigoroso comportamento dependente da frequência, dado pela impedância harmônica  $Z(\omega)$ . Essas diferenças tornam-se mais pronunciadas à medida que o solo se torna mais resistivo.

## 4.2.2 Para-raios instalados nas fases B e C

Para essa condição de proteção, as sobretensões nas fases protegidas por para-raios (fases B e C) são semelhantes. Nesse sentido, são apresentados gráficos das tensões da fase A (fase desprotegida por para-raios) e da fase C da linha de transmissão simulada.

As ondas de tensão são levantadas para diferentes condições de aterramento, entre a Figura 4.11 e a Figura 4.14.



Figura 4.11 – Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m. Sobretensão nas fases A (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados nas fases B e C.



Figura 4.12 – Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m. Sobretensão nas fases A (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados nas fases B e C.



Figura 4.13 – Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m. Sobretensão nas fases A (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados nas fases B e C.



Figura 4.14 – Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m. Sobretensão nas fases A (esq.) e C (dir.) da torre com para-raios instalados nas fases B e C.

As curvas acima confirmam as observações levantadas no item 4.2.1. As ondas de tensão em fases protegidas e não protegidas por para-raios apresentam comportamentos semelhantes no que se refere às variações no sistema de aterramento de pé de torre e na forma de representação desse aterramento.

Observa-se, ainda, o papel importante de para-raios na proteção de linhas de transmissão. A instalação de um segundo para-raios reduziu significativamente as sobretensões na fase não protegida da linha. Essa condição foi observada para todas

as representações do aterramento e para todas as condições de aterramento de pé de torre simuladas.

### 4.3 Método DE: Efeito disruptivo de ondas de tensão

Sobretensões podem impactar a continuidade da operação de linhas de transmissão mediante ameaça à ruptura da rigidez dielétrica de seus isoladores. É, portanto, necessário critério de avaliação do potencial de ruptura do isolamento de uma linha em virtude da onda de tensão aplicada nos terminais de seus isoladores. Nesse contexto, o Método DE (*Destructive Effect*) permite essa avaliação.

Esse método considera a existência de um efeito disruptivo crítico (DE<sub>C</sub>) associado ao isolador, de acordo com suas características materiais e construtivas. Ao mesmo tempo, considera a existência de um efeito disruptivo (DE) associado a cada onda de tensão. O Método DE consiste na comparação entre esses dois efeitos disruptivos, a partir de uma avaliação probabilística. Caso o efeito disruptivo da onda de tensão seja superior ao efeito disruptivo crítico do isolador, tem-se a ruptura do isolamento [46].

O efeito disruptivo (DE) de uma onda de tensão é dado por:

$$DE = \int_{t_0}^{t} [e(t) - V_0]^k dt$$
(4.7)

Em que e(t) é a onda de tensão aplicada no isolador,  $V_0$  é o valor limiar de tensão a partir do qual inicia-se a ruptura da rigidez dielétrica do isolador,  $t_0$  é o instante de tempo em que o valor instantâneo de e(t) supera a tensão  $V_0$ . Já k é um fator adimensional dependente do valor assumido para  $V_0$ , e determina o quão rápido ocorre o processo de ionização a partir da superação do valor limiar de tensão  $V_0$ .

Um isolador de 138 kV tipicamente empregado em linhas de transmissão possui as seguintes constantes [46]:

- Tensão disruptiva crítica (CFO): 650 kV<sup>4</sup>
- k = 1,36
- V<sub>0</sub> = 0,77CFO = 500,5 kV
- DE<sub>C</sub> = 1,1506(CFO)<sup>k</sup> = 92,5735

O Método DE permite avaliar se as ondas de tensão levantadas a partir de simulações no ATP podem ou não provocar a ruptura da rigidez dielétrica de isoladores, e o consequente desligamento da linha.

É avaliado o efeito disruptivo para variadas condições de incidência de descarga. São consideradas as seguintes condições de simulação:

- Amplitude da onda de corrente entre 1 kA e 150 kA, em passos de 1 kA.<sup>5</sup>
- Sistemas de aterramento:
  - Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m
  - Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m
  - Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m
  - Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m

Como demonstrado no item 4.2, os dispositivos para-raios limitam a tensão entre os terminais de isoladores por eles protegidos, mantendo essa tensão abaixo do limiar de 500,5 kV, valor a partir do qual inicia-se o processo de ruptura do isolamento. Dessa forma, o efeito disruptivo de isoladores protegidos por para-raios será zero.

Adicionalmente, sabe-se que as fases inferiores da linha são expostas a condições mais severas de sobretensão [2], resultando em maiores efeitos disruptivos em seus isoladores, em comparação aos efeitos disruptivos em isoladores instalados mais acima na torre de transmissão. Nesse sentido, são apresentados nas seções a seguir gráficos com os efeitos disruptivos (DE) observados nas fases mais baixas não protegidas por dispositivos para-raios.

 $<sup>^4</sup>$  Valor de CFO levantado para forma de onda 1,2/50  $\mu s$  padronizada.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>A despeito das variações na amplitude, a forma da onda da descarga permanece a mesma, mantendo os parâmetros T30 e T<sub>cauda</sub>, conforme os valores medianos medidos na estação Morro do Cachimbo [16].

A exemplo dos gráficos apresentados no item anterior, os efeitos disruptivos são levantados para as três representações do sistema de aterramento abordadas no trabalho – a resistência de aterramento em baixas frequências, a impedância impulsiva e a impedância harmônica.

Nos gráficos das seções a seguir, a linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) dos isoladores considerados. Analogamente aos gráficos anteriores,  $Z(\omega)$ , Zp e RLF correspondem aos efeitos disruptivos associados, respectivamente, à representação do aterramento por meio de sua impedância harmônica, de sua impedância impulsiva e de sua resistência de aterramento em baixas frequências.

## 4.3.1 Torre de transmissão sem para-raios

O presente trabalho objetiva a avaliação do comportamento de para-raios instalados em linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas. Ainda assim, são apresentadas análises de circuitos cujas torres não possuem para-raios instalados, na intenção de demonstrar o efeito da proteção (ainda que parcial) de linhas de transmissão por esses dispositivos.

São avaliados os efeitos disruptivos no isolador da fase C da torre para diferentes condições de aterramento, entre a Figura 4.15<sup>6</sup> e a Figura 4.18.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Na Figura 4.15, as curvas de efeito disruptivo para sistemas de aterramento representados a partir da impedância impulsiva e da impedância harmônica são praticamente coincidentes.



Figura 4.15 – Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m. Efeito disruptivo na fase C de torre de transmissão sem dispositivos para-raios. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.16 – Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m. Efeito disruptivo na fase C de torre de transmissão sem dispositivos para-raios. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.17 – Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m. Efeito disruptivo na fase C de torre de transmissão sem dispositivos para-raios. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.18 – Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m. Efeito disruptivo na fase C de torre de transmissão sem dispositivos para-raios. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.
Com base nos resultados apresentados nas figuras anteriores, a Tabela 4.3 apresenta amplitudes críticas de descarga<sup>7</sup> para cada condição de aterramento simulada, destacando o impacto do sistema de aterramento de pé de torre e da representação do aterramento no valor de amplitude crítica levantado.

Tabela 4.3 – Amplitude crítica de descarga segundo o método DE.

Torre de transmissão sem para-raios

	Z(ω)	RLF	RLF		
Amplitude (kA)	Amplitude crítica (kA)	Amplitude crítica (kA)	erro (%)	Amplitude crítica (kA)	erro (%)
<b>Aterramento 1:</b> ρ <sub>solo</sub> = 1000 Ωm, L = 40 m	72	63	-12,5%	72	0,0%
<b>Aterramento 2:</b> $ρ_{solo}$ = 3000 Ωm, L = 60 m	53	38	-28,3%	50	-5,7%
<b>Aterramento 3:</b> $ρ_{solo} = 5000 Ωm$ , L = 80 m	49	31	-36,7%	44	-10,2%
<b>Aterramento 4:</b> ρ <sub>solo</sub> = 10000 Ωm, L = 130 m	47	25	-46,8%	40	-14,9%

Como observado a partir dos gráficos, nota-se que as amplitudes críticas foram tão menores quanto pior a qualidade do aterramento, como esperado. Principalmente, observou-se a expressividade dos erros associados à representação do aterramento por meio de sua resistência em baixas frequências. Por outro lado, observaram-se erros consideravelmente menores para a representação do aterramento por meio de sua impedância impulsiva. Em ambos os casos, os erros foram tão maiores quanto mais resistivo o solo.

A partir dos valores de impedância crítica levantados, avaliou-se a probabilidade de uma descarga atmosférica exceder esses valores críticos, considerando a distribuição cumulativa das primeiras descargas registradas na estação Morro do Cachimbo [2], [16]. Essa distribuição é aproximada por:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{45}\right)^{3,9}}$$
(4.8)

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Valor de amplitude a partir do qual ocorre a ruptura da rigidez dielétrica de isoladores, levantado a partir do método DE, considerando forma de onda de parâmetros medianos, segundo medições na estação Morro do Cachimbo.

Onde P(I) é a probabilidade de uma descarga atmosférica exceder um dado valor I de amplitude, em kA. A partir de (4.8), a Tabela 4.4 apresenta a probabilidade de uma dada descarga atmosférica atingir um valor superior a cada amplitude crítica de descarga levantada na Tabela 4.3, para cada sistema de aterramento de pé de torre e representação desse aterramento em simulações no domínio do tempo.

Tabela 4.4 – Probabilidade de uma descarga exceder a amplitude crítica de descarga segundo o método DE. Torre de transmissão sem para-raios.

Aterramento	Z(ω)	RLF	Zp
<b>Aterramento 1</b> : ρ <sub>solo</sub> = 1000 Ωm, L = 40 m	13,8%	21,2%	13,8%
<b>Aterramento 2:</b> ρ <sub>solo</sub> = 3000 Ωm, L = 60 m	34,6%	65,9%	39,9%
<b>Aterramento 3:</b> ρ <sub>solo</sub> = 5000 Ωm, L = 80 m	41,8%	81,1%	52,2%
<b>Aterramento 4:</b> ρ <sub>solo</sub> = 10000 Ωm, L = 130 m	45,8%	90,8%	61,3%

As expressivas diferenças observadas na Tabela 4.3 se refletiram nas probabilidades levantadas na Tabela 4.4. Observa-se que as probabilidades de uma descarga alcançar a amplitude crítica de descarga para uma determinada condição de simulação são consideravelmente majoradas para a representação do sistema de aterramento por sua impedância em baixas frequências. Já as probabilidades associadas à representação do aterramento pela impedância impulsiva foram ligeiramente maiores às levantadas para a impedância harmônica.

#### 4.3.2 Para-raios instalado na fase C

Neste conjunto de simulações, são consideradas torres de transmissão com para-raios instalados na fase C. São avaliados os efeitos disruptivos no isolador da fase B da torre de transmissão, fase mais baixa não protegida por dispositivos para-raios. Os efeitos disruptivos são avaliados para diferentes condições de aterramento, entre a Figura 4.19<sup>8</sup> e a Figura 4.22.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Na Figura 4.19, as curvas de efeito disruptivo para sistemas de aterramento representados a partir da impedância impulsiva e da impedância harmônica são praticamente coincidentes.



Figura 4.19 – Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m. Efeito disruptivo na fase B de torre de transmissão com para-raios na fase C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.20 – Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m. Efeito disruptivo na fase B de torre de transmissão com para-raios na fase C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.21 – Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m. Efeito disruptivo na fase B de torre de transmissão com para-raios na fase C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.22 – Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m. Efeito disruptivo na fase B de torre de transmissão com para-raios na fase C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.

Analogamente, para essa condição de proteção da linha, a Tabela 4.5 apresenta amplitudes críticas de descarga para cada sistema de aterramento de pé de torre avaliado e representação desse aterramento em simulações. Tabela 4.5 – Amplitude crítica de descarga segundo o método DE.

	Ζ(ω)	ω) RLF Zp			
Amplitude (kA)	Amplitude crítica (kA)	Amplitude crítica (kA)	erro (%)	Amplitude crítica (kA)	erro (%)
<b>Aterramento 1:</b> ρ <sub>solo</sub> = 1000 Ωm, L = 40 m	89	77	-13,5%	89	0,0%
<b>Aterramento 2:</b> $ρ_{solo}$ = 3000 Ωm, L = 60 m	66	47	-28,8%	61	-7,6%
<b>Aterramento 3:</b> $ρ_{solo} = 5000 Ωm$ , L = 80 m	62	39	-37,1%	55	-11,3%
<b>Aterramento 4:</b> ρ <sub>solo</sub> = 10000 Ωm, L = 130 m	59	32	-45,8%	50	-15,3%

Para-raios instalados na fase C.

As observações levantadas no item anterior são confirmadas para torres de transmissão com para-raios instalados na fase C. Novamente, os resultados associados ao aterramento representado por sua resistência em baixas frequências foram majorados, enquanto os associados à impedância impulsiva aproximaram-se dos resultados decorrentes da consideração do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento. Os erros foram tão maiores quanto mais resistivo o solo. Observa-se, ainda, o efeito positivo da instalação do para-raios. Todas as amplitudes críticas de descarga levantadas foram superiores às observadas no item anterior.

A Tabela 4.6 apresenta a probabilidade de uma dada descarga atmosférica atingir um valor de amplitude superior à amplitude crítica de descarga, levantada para cada sistema de aterramento e representação do aterramento avaliados no presente trabalho.

Aterramento	Ζ(ω)	RLF	Zp
<b>Aterramento 1:</b> ρ <sub>solo</sub> = 1000 Ωm, L = 40 m	6,5%	11,0%	6,5%
<b>Aterramento 2:</b> ρ <sub>solo</sub> = 3000 Ωm, L = 60 m	18,3%	45,8%	23,4%
<b>Aterramento 3:</b> ρ <sub>solo</sub> = 5000 Ωm, L = 80 m	22,3%	63,6%	31,4%
<b>Aterramento 4:</b> ρ <sub>solo</sub> = 10000 Ωm, L = 130 m	25,8%	79,1%	39,9%

Tabela 4.6 – Probabilidade de uma descarga exceder a amplitude crítica de descarga segundo o método DE. Para-raios instalados na fase C.

#### 4.3.3 Para-raios instalados nas fases B e C

Neste conjunto de simulações, são consideradas torres de transmissão com para-raios instalados nas fases B e C. São avaliados os efeitos disruptivos no isolador da fase A da torre de transmissão, única fase não protegida por dispositivos para-raios. Os efeitos disruptivos são avaliados para diferentes condições de aterramento, entre a Figura 4.23<sup>9</sup> e a Figura 4.26.



Figura 4.23 – Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m. Efeito disruptivo na fase A de torre de transmissão com para-raios nas fases B e C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Na Figura 4.23, as curvas de efeito disruptivo para sistemas de aterramento representados a partir da impedância impulsiva e da impedância harmônica são praticamente coincidentes.



Figura 4.24 – Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m. Efeito disruptivo na fase A de torre de transmissão com para-raios nas fases B e C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>C</sub>) de isoladores.



Figura 4.25 – Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m. Efeito disruptivo na fase A de torre de transmissão com para-raios nas fases B e C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.



Figura 4.26 – Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m. Efeito disruptivo na fase A de torre de transmissão com para-raios nas fases B e C. Linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (DE<sub>c</sub>) de isoladores.

Novamente a Tabela 4.7 apresenta amplitudes críticas de descarga para cada sistema de aterramento de pé de torre avaliado, para para-raios instalados nas fases B e C da torre de transmissão.

Tabela 4.7 – Amplitude crítica de descarga segundo o método DE.

	Ζ(ω)	RLF		Zp	
Amplitude (kA)	Amplitude crítica (kA)	Amplitude crítica (kA)	erro (%)	Amplitude crítica (kA)	erro (%)
<b>Aterramento 1:</b> ρ <sub>solo</sub> = 1000 Ωm, L = 40 m	118	102	-13,6%	118	0,0%
<b>Aterramento 2:</b> ρ <sub>solo</sub> = 3000 Ωm, L = 60 m	86	62	-27,9%	81	-5,8%
<b>Aterramento 3:</b> ρ <sub>solo</sub> = 5000 Ωm, L = 80 m	78	51	-34,6%	71	-9,0%
<b>Aterramento 4:</b> ρ <sub>solo</sub> = 10000 Ωm, L = 130 m	74	42	-43,2%	65	-12,2%

Para-raios instalados nas fases B e C

Nessas avaliações, observam-se amplitudes críticas de descarga ainda maiores, em virtude da instalação de um segundo dispositivo para-raios.

A Tabela 4.8 apresenta a probabilidade de uma dada descarga atmosférica atingir um valor de amplitude superior à amplitude crítica de descarga, levantada para cada representação do aterramento avaliada no presente trabalho.

descarga segundo o método DE. Para-raios instalados nas fases B e C.					
Aterramento	Z(ω)	RLF	Zp		
<b>Aterramento 1:</b> ρ <sub>solo</sub> = 1000 Ωm, L = 40 m	2,3%	4,0%	2,3%		

7,4%

10,5%

12,6%

22,3%

38,0%

56,7%

9,2%

14,5%

19,3%

Tabela 4.8 – Probabilidade de uma descarga exceder a amplitude crítica de descarga segundo o método DE. Para-raios instalados nas fases B e C.

#### 4.3.4 Análise de resultados

**Aterramento 2:** ρ<sub>solo</sub> = 3000 Ωm, L = 60 m

**Aterramento 3:** ρ<sub>solo</sub> = 5000 Ωm, L = 80 m

**Aterramento 4:**  $ρ_{solo}$  = 10000 Ωm, L = 130 m

Essa seção apresenta resultados estendidos em relação aos levantados no item 4.2. Avaliou-se o efeito disruptivo em isoladores quando da incidência de descargas atmosféricas de diversas amplitudes, considerando variações nos sistemas de aterramento de pé de torre e nas condições de proteção da linha, para as três representações do aterramento abordadas no trabalho.

Confirmou-se que descargas atmosféricas consistem em significativa ameaça à continuidade da operação de linhas de transmissão, ainda que não diretamente incidentes em suas fases. As sobretensões decorrentes dessas descargas a partir de *backflashover* podem, de fato, provocar a ruptura da rigidez dielétrica de isoladores. Essa ruptura pode ocorrer mesmo para descargas de amplitudes inferiores a 50 kA, no caso de solos mais resistivos e de linhas de transmissão não protegidas por para-raios.

Atestou-se o efeito positivo da proteção parcial de linhas de transmissão a partir da instalação de dispositivos para-raios em uma ou duas de suas fases, como exposto em [2]. Nota-se que, em comparação à condição de linhas não protegidas, as amplitudes críticas de descarga de todas as condições de aterramento foram significativamente maiores quando da instalação de dispositivos para-raios na fase C, e ainda maiores quando da proteção das fases B e C da torre. Observou-se, ainda, a relevância do aterramento de pé de torre. Em todas as simulações conduzidas, os efeitos disruptivos

nos isoladores foram tão maiores quanto pior a qualidade do aterramento de pé de torre.

Principalmente, os gráficos apresentados nesse capítulo permitem importantes análises a respeito da influência da representação do aterramento nos resultados de simulações no domínio do tempo de linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas. Os impactos simulados considerando a representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências foram superestimados, comparando-se com os decorrentes da representação do aterramento por seu rigoroso comportamento dependente da frequência. Os efeitos disruptivos associados à representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências forquências são significativamente maiores que os associados à representação pela impedância harmônica, incorrendo em amplitudes críticas de descarga subdimensionadas.

Como previamente demonstrado, a representação do sistema de aterramento por meio de sua resistência em baixas frequências despreza uma série de efeitos eletromagnéticos, relevantes para fenômenos impulsivos, além de não considerar variações na permissividade e resistividade elétricas do solo. Quando o solo é submetido a campos variáveis no tempo, a variação de seus parâmetros elétricos com a frequência melhora o desempenho do aterramento. Justificam-se, portanto, os maiores efeitos disruptivos levantados em simulações de fenômenos impulsivos nas quais o aterramento é representado por sua resistência em baixas frequências, uma vez que essa representação assume para o aterramento um comportamento pior que seu comportamento real. Nesse contexto, essa representação do aterramento pode incorrer em erros consideráveis em análises de fenômenos impulsivos, especialmente para solos de maior resistividade.

Já no que se refere à representação do sistema de aterramento por sua impedância impulsiva, os resultados dela decorrentes aproximaram-se dos obtidos a partir da representação do aterramento pela impedância harmônica, comparando-se às divergências observadas quando da representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências. Em adição, a representação do aterramento a partir de sua impedância impulsiva levou a resultados desejavelmente conservativos. Nota-se que,

em todas as condições simuladas, os efeitos disruptivos associados à representação do aterramento pela impedância impulsiva mantiveram-se superiores (ainda que relativamente próximos) aos associados à impedância harmônica.

Observa-se, portanto, que em comparação à representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências, a representação pela impedância impulsiva proporciona maior proximidade com os resultados associados ao rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento, mantendo a segurança nas avaliações conduzidas acerca das máximas sobretensões em linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas.

#### 4.4 Considerações finais

Foi realizada uma série de simulações de sobretensões em linhas de transmissão diretamente atingidas por descargas atmosféricas em suas torres, a partir das quais foram calculados os efeitos disruptivos correspondentes. Observou-se que os efeitos disruptivos de ondas de sobretensão em isoladores não protegidos por para-raios variam significativamente conforme o aterramento de pé de torre e com o número de para-raios instalados na torre.

Observou-se, sobretudo, que a forma de representação do sistema de aterramento impacta consideravelmente em análises de sobretensões, sobretudo em solos mais resistivos. Demonstrou-se que a representação do aterramento a partir de sua resistência em baixas frequências resulta em erros consideráveis em relação ao rigoroso comportamento variável na frequência do aterramento, superestimando o impacto de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Em contrapartida, representar o aterramento por meio de sua impedância impulsiva leva a resultados de sobretensões mais próximos aos decorrentes da representação do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento, sem prejuízo de conservatividade nas análises conduzidas.

Esses resultados reforçam proposta de Visacro e Silveira [39] de utilização da impedância impulsiva para representar o aterramento de pé de torre quando da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Essa dissertação

estendeu a avaliação conduzida para linhas de transmissão protegidas por dispositivos para-raios. A consistência dos resultados decorrentes dessa representação se manteve para a avaliação das máximas sobretensões em fases não protegidas, e do efeito disruptivo associado.

Por outro lado, observações nas tensões em fases protegidas por para-raios merecem destaque. Foram observadas diferenças consideráveis entre as tensões no dispositivo durante a cauda da onda de descarga para diferentes aterramentos de pé de torre. Em torres instaladas em solos mais resistivos, os níveis de tensão se mantiveram mais elevados durante a cauda da descarga. Em adição, representações do sistema de aterramento também influenciaram esses níveis de tensão. As tensões simuladas a partir da representação do aterramento por meio de sua impedância impulsiva foram consideravelmente inferiores aos resultados decorrentes da representação do aterramento por sua impedância harmônica e pela resistência em baixas frequências, que por sua vez se aproximaram. Essas diferenças se mostraram tão maiores quanto mais resistivo o solo. Ainda que os níveis de tensão simulados em fases protegidas não ameaçassem a rigidez dielétrica de isoladores, diferenças nas tensões registradas em para-raios podem incorrer em erros quando da avaliação da energia absorvida pelo dispositivo.

# 5 Impacto da representação do aterramento na energia absorvida pelo dispositivo para-raios

Como previamente descrito, descargas atmosféricas ameaçam a continuidade da operação de linhas de transmissão, resultando em elevadas sobretensões em seus isoladores. Nesse contexto, o capítulo anterior contemplou o comportamento de dispositivos para-raios instalados nas linhas, atuando na limitação dessas sobretensões. Abordou-se o impacto positivo da instalação de para-raios, ainda que apenas em algumas fases. Foram consideradas diversas condições de aterramento de pé de torre e de incidência de descargas atmosféricas. Avaliou-se, em especial, a influência da representação do aterramento elétrico em simulações no domínio do tempo de sobretensões atmosféricas em linhas, protegidas ou não por para-raios.

Essas avaliações ancoraram-se em simulações das tensões em fases protegidas e não protegidas por dispositivos para-raios, levantando os efeitos disruptivos associados, e comparando-os ao efeito disruptivo crítico de isoladores tipicamente empregados em linhas de 138 kV. Ainda assim, o estudo do comportamento de para-raios em linhas de transmissão não se limita à ruptura ou não da rigidez dielétrica de isoladores. Como descrito no item 2.3.2.3, a capacidade de absorção de energia de dispositivos para-raios é parâmetro relevante na especificação desses equipamentos.

A energia absorvida por para-raios é dada por:

$$E = \int_{t=0}^{\infty} v(t)i(t)dt$$
(5.1)

em que v(t) e i(t) são, respectivamente, a tensão e a corrente no dispositivo.

#### 5.1 Simulações

São conduzidas simulações a fim de avaliar a energia absorvida por para-raios instalados em linhas de transmissão. Novamente, são simuladas linhas de transmissão parcialmente protegidas por para-raios quando da incidência de descargas atmosféricas no topo de suas torres.

Essas simulações contemplam basicamente os mesmos elementos presentes nas simulações do capítulo anterior. Nesse conjunto de simulações, foram considerados os mesmos modelos de elementos do capítulo anterior, para linhas, para-raios, torres e descarga atmosférica.

Também é mantida a forma de representação desses elementos para as simulações no domínio do tempo. Para os condutores da linha utiliza-se o modelo desenvolvido por J. Marti, que considera a dependência da frequência dos parâmetros longitudinais dos condutores aéreos e da impedância de retorno pelo solo [40]. As torres são modeladas por meio de um sistema de multicondutores verticais, sendo cada condutor representado por uma linha monofásica sem perdas [42]. A corrente de descarga é representada pela onda proposta em brochura do CIGRE, que contempla a natureza côncava das primeiras descargas de retorno, bem como a ocorrência da máxima derivada próxima ao pico [4]. Os dispositivos para-raios de ZnO são representados pelo modelo dinâmico proposto pelo IEEE [44].

Essas simulações avaliam a absorção de energia por dispositivos para-raios considerando diversas condições de aterramento de pé de torre e de incidência de descargas atmosféricas. Novamente, são conduzidas simulações para as três representações do sistema de aterramento avaliadas neste trabalho – resistência de aterramento em baixas frequências, impedância impulsiva e impedância harmônica.

Nas simulações, a energia absorvida pelo para-raios é determinada por meio da ferramenta Power&Energy, do ATP, aplicada nos resistores não lineares que compõem o modelo de representação do dispositivo para-raios, conforme Figura 5.1.



Figura 5.1 – Mecanismo de avaliação da energia absorvida no para-raios a partir de seu modelo de representação no ATP

Ressalta-se que os resistores lineares que constam no modelo de representação do para-raios não respondem pela energia absorvida pelo dispositivo, razão pela qual a energia não é avaliada nestes elementos. No modelo, o resistor da direita compõe um filtro RL destinado à atuação frente a surtos de rápida frente de onda, enquanto o resistor da esquerda é empregado para estabilizar a integração numérica [18].

Nas simulações do capítulo anterior, a consideração de um par de torres adjacentes foi suficiente para o levantamento de resultados consistentes. Já para avaliações da energia absorvida por para-raios, é necessária a consideração de mais torres adjacentes à torre atingida pela descarga atmosférica [47]. Nas simulações desse capítulo são consideradas doze torres adjacentes, sendo seis posicionadas em cada lado da torre atingida.

A absorção de energia por para-raios é avaliada considerando os dispositivos instalados apenas na fase C (fase inferior) da torre de transmissão atingida.

São considerados os seguintes parâmetros de simulação.

- Formas de onda da descarga:
  - **Onda 1:** T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 50  $\mu$ s
  - **Onda 2:** T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 150  $\mu$ s
- Amplitude da onda de corrente entre 1 kA e 150 kA, em passos de 1 kA.

- Sistemas de aterramento:
  - Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m
  - Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m
  - Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m
  - Aterramento 4:  $ρ_{solo}$  = 10000 Ωm, L = 130 m

em que L é o comprimento de cada um dos quatro cabos contrapeso radialmente instalados no pé das torres de transmissão (ver Figura 3.1). A resistência de aterramento em baixas frequências e a impedância impulsiva associadas a cada aterramento são as mesmas apresentadas na Tabela 4.2.

A Figura 5.2 apresenta exemplo de um circuito simulado. Nessa condição, o sistema de aterramento é representado por meio de sua impedância impulsiva.



Figura 5.2 – Circuito de simulação da incidência de descarga atmosférica em linha de transmissão para avaliação da energia no para-raios

A partir da última torre de transmissão considerada, são inseridos trechos de linhas de transmissão suficientemente longos, de forma que as reflexões das ondas de corrente e tensão nas extremidades da linha não alcancem a torre atingida, o que impactaria os resultados levantados.

#### 5.1.1 Onda 1: T-30 = 2,9 $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 50 $\mu$ s

São apresentados a seguir, entre a Figura 5.3 e a Figura 5.6, gráficos que relacionam a energia absorvida pelo dispositivo para-raios com a amplitude da descarga atmosférica incidente, para diversas condições de aterramento e para as três representações do sistema de aterramento avaliadas – resistência em baixas frequências, impedância impulsiva e impedância harmônica.

Adicionalmente, da Tabela 5.1 à Tabela 5.4 apresenta-se a energia absorvida por pararaios para alguns valores de amplitude, a partir de valores extraídos dos gráficos. Nestas, são levantados os erros percentuais decorrentes das representações simplificadas do sistema de aterramento, assumindo como referência o modelo rigorosamente dependente da frequência.



Figura 5.3 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 1: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 50  $\mu$ s. Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m

Tabela 5.1 – Energia absorvida	a pelo para-raios.	Onda 1: T-30 = 2,9 μs,
--------------------------------	--------------------	------------------------

Amplitude	Z(ω)	RI	_F	Z	р
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ) erro (%)		Energia (kJ)	erro (%)
50	1,31	1,99	51,9%	1,18	-9,9%
75	4,13	5,31	28,6%	3,42	-17,2%
100	7,92	9,42	18,9%	6,53	-17,6%
125	12,23	13,99	14,4%	10,11	-17,3%
150	16,89	18,89	11,8%	14,04	-16,9%

 $T_{cauda}$  = 50 μs. Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000 Ωm, L = 40 m



Figura 5.4 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 1: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 50  $\mu$ s. Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m

Tabela 5.2 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 1: T-30 = 2,9  $\mu$ s,

Amplitude	Z(ω)	RLF		Z	כ
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ) erro (%)		Energia (kJ)	erro (%)
50	3,82	5 <i>,</i> 63	47,4%	3,2	-16,2%
75	9,2	11,7	27,2%	7,54	-18,0%
100	15,4	18,49	20,1%	12,61	-18,1%
125	22,06	25,71	16,5%	18,11	-17,9%
150	29,06	33,26	14,5%	23,93	-17,7%

 $T_{cauda}$  = 50 µs. Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m



Figura 5.5 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 1: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 50  $\mu$ s. Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m

Tabela 5.3 -	- Energi	a absorv	ida pel	o pa	ara-raios. Onda 1: T-30 = 2,9 μ	s,
-				•		

Amplitude	Ζ(ω)	RI	_F	Z	ס
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ) erro (%) E		Energia (kJ)	erro (%)
50	5,12	7,75	51,4%	4,29	-16,2%
75	11,57	15,2	31,4%	9,43	-18,5%
100	18,84	23,39	24,2%	15,3	-18,8%
125	26,58	32,03	20,5%	21,59	-18,8%
150	34,66	41,07	18,5%	28,2	-18,6%

$T_{cauda} = 50 \ \mu s. \ Aterramento$	3: ρ <sub>solo</sub> = 500	0 Ωm, L = 80 m
---	----------------------------	----------------



Figura 5.6 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 1: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 50  $\mu$ s. Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m

Amplitude	Z(ω)	RLF		Zp	
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ)	erro (%)	Energia (kJ)	erro (%)
50	6,13	10,38	69,3%	5,19	-15,3%
75	13,57	19,51	43,8%	10,95	-19,3%
100	21,86	29,43	34,6%	17,44	-20,2%
125	30,63	39,9	30,3%	24,36	-20,5%
150	39,77	50,87	27,9%	31,6	-20,5%

Tabela 5.4 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 1: T-30 = 2,9 μs,

As simulações do capítulo anterior demonstraram que a qualidade do sistema de aterramento de pé de torre influencia os níveis de tensão aos quais os dispositivos para-raios ficam expostos. Quanto pior a qualidade do aterramento, maiores esses valores de tensão, especialmente durante a cauda da descarga atmosférica. Esses maiores níveis de tensão podem manter o dispositivo em condições de condução de corrente por mais tempo, aumentando a energia absorvida. Essa condição é constatada nos resultados de simulação apresentados. Demonstrou-se que a energia absorvida por para-raios foi tão maior quanto pior a qualidade do sistema de aterramento de pé de torre considerado. Conclui-se a partir disso que a cauda da onda

 $T_{cauda}$  = 50 µs. Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000 Ωm, L = 130 m

de descarga também pode desempenhar papel decisivo no comportamento de pararaios, especialmente em solos mais resistivos.

Principalmente, observaram-se diferenças nas simulações de energia absorvida conforme representação adotada para o sistema de aterramento. Nessas simulações, a representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências incorreu em uma avaliação superdimensionada da energia absorvida pelo para-raios, em comparação à energia avaliada para a representação do aterramento a partir de seu rigoroso comportamento dependente da frequência. Por outro lado, os resultados decorrentes da representação do aterramento por sua impedância impulsiva foram subdimensionados.

Essas diferenças são justificadas pelos variados comportamentos que o aterramento assume durante a descarga atmosférica. O espectro de frequências de descargas é amplo, apresentando componentes que vão desde CC até alguns MHz. A frente da onda possui um comportamento fortemente impulsivo, de forma que em seu espectro prevaleçam componentes de frequência elevada. Por outro lado, o comportamento mais lento durante a cauda da onda demonstra prevalecimento de menores frequências no espectro da descarga durante esses instantes da onda. Essa alternância de frequências no espectro da onda provoca comportamentos diferenciados do sistema de aterramento. Em cada instante da descarga atmosférica, o rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento se aproxima mais de uma de suas representações simplificadas.

Como descrito no item 3.2.3, a impedância impulsiva, como o nome sugere, resume em um único elemento o comportamento impulsivo da descarga. Dessa forma, essa representação se aproxima do rigoroso comportamento variável na frequência do aterramento nos instantes iniciais da descarga atmosférica. Por outro lado, durante a cauda da onda de corrente, a descarga possui um comportamento mais lento, de forma que a impedância impulsiva não é mais uma boa representação do real comportamento do sistema de aterramento. Durante a cauda da descarga, o comportamento do aterramento se aproxima mais de sua resistência em baixas frequências.

Na intenção de ilustrar esse comportamento e de demonstrar as consequências da representação simplificada do aterramento, a Figura 5.7 ilustra duas curvas de potência no dispositivo para-raios, juntamente com a onda de corrente de descarga associada. Essas curvas correspondem ao Aterramento 3 ( $\rho_{solo} = 5000 \ \Omega m$ , L = 80 m), representado por meio de sua impedância harmônica e por sua resistência em baixas frequências. É considerada a incidência de uma onda de corrente de parâmetros medianos, ilustrada na Figura 4.5. A energia absorvida pelo dispositivo é dada pela área sob a curva de potência.



Figura 5.7 – Potência no para-raios e descarga atmosférica associada. Levantamento para representação do sistema de aterramento por sua impedância harmônica e por sua resistência em baixas frequências

Observa-se que grande parte da energia absorvida pelo dispositivo é concentrada na frente da onda de descarga, momento no qual o comportamento do sistema de aterramento se aproxima mais de sua impedância impulsiva. Nesses instantes, a representação do sistema de aterramento por sua resistência em baixas frequências assume para o aterramento um comportamento pior que seu rigoroso comportamento dependente da frequência. Em razão disso, a potência registrada no

dispositivo para-raios é majorada. Essa constatação se estende para variadas condições de incidência, justificando os maiores valores de energia absorvida associados a essa representação do aterramento em todas as simulações conduzidas. Em adição, sabe-se que quanto maior a resistividade do solo, maiores as diferenças entre o real comportamento do aterramento nos instantes iniciais da onda e a representação por sua resistência em baixas frequências, razão pela qual os erros foram tão maiores quanto mais resistivo o solo.

Analogamente, a Figura 5.8 ilustra duas curvas de potência no dispositivo para-raios, juntamente com a onda da descarga associada. Essas curvas correspondem ao Aterramento 3 ( $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m), representado por meio de sua impedância harmônica e por sua impedância impulsiva. Novamente, é considerada a incidência de uma descarga de parâmetros medianos.



Figura 5.8 – Potência no para-raios e descarga atmosférica associada. Levantamento para representação do sistema de aterramento por sua impedância harmônica e por sua impedância impulsiva

Observa-se que a impedância impulsiva, de fato, representa bem o comportamento do aterramento durante a frente da onda de descarga. Por outro lado, essa representação não é adequada para fenômenos nos quais a cauda da onda apresenta papel relevante, instante no qual o aterramento é mais bem representado por sua resistência em baixas frequências. Durante a cauda da onda de corrente, a representação pela impedância impulsiva assume para o aterramento um desempenho superior ao seu desempenho real. Essa condição é notada no gráfico da Figura 5.8, em que se observa que parte considerável da energia acumulada no pararaios durante a cauda da descarga é desprezada quando da representação do aterramento a partir de sua impedância impulsiva, justificando resultados subestimados de energia acumulada registrados nas simulações realizadas.

#### 5.1.2 Onda 2: T-30 = 2,9 μs, T<sub>cauda</sub> = 150 μs

São apresentadas simulações análogas às da seção anterior, considerando nessa análise ondas de descargas atmosféricas de cauda mais longa. Da Figura 5.9 à Figura 5.12 apresentam-se os gráficos que relacionam a amplitude da descarga com a energia no dispositivo, enquanto da Tabela 5.5 à Tabela 5.8 apresentam-se valores de energia para algumas amplitudes de corrente, extraídos a partir dos gráficos levantados, a fim de levantar os erros associados às representações simplificadas do aterramento.



Figura 5.9 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 150  $\mu$ s. Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega$ m, L = 40 m

Tabela 5.5 – Energia absorvida pelo	o para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9 μs,
-------------------------------------	--------------------------------------

Amplitude	Z(ω)	RLF		Zp	
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ)	erro (%)	Energia (kJ)	erro (%)
50	1,69	2,46	45,6%	1,34	-20,7%
75	5,82	7,05	21,1%	4,46	-23,4%
100	11,36	12,95	14,0%	8,96	-21,1%
125	17,43	19,43	11,5%	14,15	-18,8%
150	23,8	26,21	10,1%	19,69	-17,3%

 $T_{cauda}$  = 150  $\mu s.$  Aterramento 1:  $\rho_{solo}$  = 1000  $\Omega m$  , L = 40 m



Figura 5.10 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 150  $\mu$ s. Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m

Tabela 5.6 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9 µs,

Amplitude	Z(ω)	RLF		Zp	
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ)	erro (%)	Energia (kJ)	erro (%)
50	6,2	8,15	31,5%	4,81	-22,4%
75	14,81	17,52	18,3%	11,54	-22,1%
100	25,07	28,47	13,6%	19,69	-21,5%
125	36,41	40,46	11,1%	28,77	-21,0%
150	48,52	53,24	9,7%	38,55	-20,5%

 $T_{cauda}$  = 150 µs. Aterramento 2:  $\rho_{solo}$  = 3000  $\Omega$ m, L = 60 m



Figura 5.11 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 150  $\mu$ s. Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m

Tabela 5.7 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9 µs,

Amplitude	Z(ω)	RLF		Zp	
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ)	erro (%)	Energia (kJ)	erro (%)
50	8,21	11,08	35,0%	6,31	-23,1%
75	18,63	22,7	21,8%	14,25	-23,5%
100	30,89	36,05	16,7%	23,67	-23,4%
125	44,31	50,56	14,1%	34,07	-23,1%
150	58,53	66	12,8%	45,21	-22,8%

 $T_{cauda}$  = 150  $\mu s.$  Aterramento 3:  $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega m,$  L = 80 m



Figura 5.12 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9  $\mu$ s, T<sub>cauda</sub> = 150  $\mu$ s. Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m

Tabela 5.8 – Energia absorvida pelo para-raios. Onda 2: T-30 = 2,9 µs,

Amplitude	Z(ω)	RLF		Zp	
(kA)	Energia (kJ)	Energia (kJ)	erro (%)	Energia (kJ)	erro (%)
50	10,05	14,85	47,8%	7,54	-25,0%
75	22,43	29,33	30,8%	16,44	-26,7%
100	36,87	45,76	24,1%	26,88	-27,1%
125	52,51	63,59	21,1%	38,34	-27,0%
150	68,82	82,45	19,8%	50,58	-26,5%

 $T_{cauda}$  = 150 µs. Aterramento 4:  $\rho_{solo}$  = 10000  $\Omega$ m, L = 130 m

Esses resultados confirmam as observações levantadas no item 5.1.1. Novamente, a energia absorvida pelo para-raios foi tão maior quanto pior a qualidade do aterramento de pé de torre. Em adição, foram registrados níveis maiores de energia absorvida pelo dispositivo, em razão do maior tempo de cauda da descarga manter o para-raios conduzindo por mais tempo.

A Figura 5.13 ilustra esse comportamento. São apresentadas duas condições de potência elétrica no dispositivo para-raios, juntamente com as ondas de descarga associadas. A partir dessas condições, compara-se a potência no dispositivo quando da

incidência de descargas atmosféricas com diferentes tempos de cauda. Novamente, essas simulações correspondem ao Aterramento 3 ( $\rho_{solo}$  = 5000  $\Omega$ m, L = 80 m), representado a partir de sua impedância harmônica. Os tempos de frente e a amplitude da descarga para as duas simulações foram mantidos, conforme parâmetros medianos [16].



Figura 5.13 – Potência elétrica no dispositivo para-raios para onda de corrente com  $T_{cauda}$  = 50 µs (esq.) e  $T_{cauda}$  = 150 µs (dir.)

Nota-se que as curvas de potência nos para-raios não se diferenciam consideravelmente para as duas descargas na frente da onda. Por outro lado, durante as caudas das descargas, observa-se maior potência no dispositivo quando da incidência de uma onda com T<sub>cauda</sub> = 150 µs, justificando os maiores valores de energia simulados. Reforça-se, portanto, que a cauda da descarga apresenta papel relevante na energia absorvida pelo dispositivo para-raios.

Principalmente, a exemplo das simulações conduzidas no item anterior, os registros de energia no dispositivo para-raios se diferenciaram conforme a representação do sistema de aterramento nas simulações conduzidas. Novamente, a representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências incorreu em uma avaliação superdimensionada da energia absorvida pelo para-raios, em comparação à energia avaliada a partir da consideração do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento. Os resultados decorrentes da representação do aterramento por sua impedância impulsiva também foram subestimados.

Nesse contexto, algumas observações a respeito dos erros registrados em cada conjunto de simulações merecem destaque. Nas simulações da incidência de descargas atmosféricas de tempo de cauda longo ( $T_{cauda} = 150 \ \mu s$ ), os erros decorrentes da representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências foram menores em comparação aos registrados no item 5.1.1, a partir de descargas atmosféricas de tempos de cauda menor ( $T_{cauda} = 50 \ \mu s$ ). Por outro lado, os erros associados à representação do aterramento por sua impedância impulsiva foram maiores, quando simulada a incidência de descargas atmosféricas com maior tempo de cauda.

Nas simulações do item 5.1.2, a cauda da descarga apresenta um papel ainda mais relevante na energia absorvida pelo dispositivo, mantendo-o em condução por ainda mais tempo em um período da onda no qual prevalecem relativas baixas frequências em seu espectro. Isso mantém a representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências próxima de seu comportamento rigorosamente dependente da frequência por maior período de tempo, justificando os menores erros registrados para essas simulações. O oposto é observado quando da representação do aterramento por sua impedância impulsiva, em que por um período de tempo maior é assumido para o aterramento um desempenho superior ao seu desempenho real, razão pela qual os erros decorrentes dessa simplificação foram maiores nesse conjunto de simulações.

#### 5.2 Considerações finais

Foi registrada a energia absorvida por para-raios sob uma série de condições de simulação, variando o sistema de aterramento de pé de torre, além da amplitude e do tempo de cauda da onda de descarga atmosférica incidente.

Em princípio, confirmou-se a conservatividade da energia específica de dispositivos para-raios. Os níveis de energia mais expressivos simulados se mantiveram distantes da máxima capacidade de absorção do dispositivo. Ainda assim, a energia absorvida por para-raios mantém-se como aspecto relevante em avaliações de seu comportamento. Ressalta-se que as simulações conduzidas não consideraram a

corriqueira ocorrência de descargas subsequentes, que podem ocasionar em níveis ainda maiores de energia absorvida pelo dispositivo. Em adição, as solicitações em termos de energia às quais o dispositivo é exposto podem impactar sua vida útil.

Confirmou-se ainda o impacto da cauda da onda de corrente no comportamento do para-raios, sendo esta responsável por parcela considerável da energia acumulada no dispositivo. Essa condição foi corroborada pelos maiores valores de energia registrados no para-raios quando da incidência de uma onda com tempo de cauda maior ( $T_{cauda} = 150 \ \mu$ s). As simulações ainda confirmaram que a qualidade do aterramento impacta também na severidade à qual o dispositivo para-raios fica exposto.

Sobretudo, confirmou-se que a forma de representação do aterramento também influencia os resultados de energia acumulada pelo para-raios. Em relação ao comportamento rigorosamente dependente da frequência do sistema de aterramento, a representação por sua resistência de baixas frequências incorreu em resultados superdimensionados da energia absorvida pelo para-raios, enquanto os resultados decorrentes da representação do aterramento por sua impedância impulsiva foram subdimensionados. Essas diferenças são justificadas pelo diferente comportamento que o aterramento assume ao longo da descarga atmosférica, aproximando-se mais de sua impedância impulsiva na frente e de sua resistência em baixas frequências durante a cauda. Logo, a representação do aterramento por meio de sua resistência em baixas frequências assume para o aterramento um desempenho inferior ao seu real desempenho na frente de onda da descarga. Já a representação do aterramento por sua impedância impulsiva assume para o aterramento um desempenho superior ao seu desempenho real durante a cauda da descarga. Essas constatações foram observadas em todas as simulações conduzidas, e justificam os erros registrados.

Esses resultados demonstram uma limitação da representação simplificada do aterramento por meio de sua impedância impulsiva. Quando da avaliação de uma condição de simulação na qual a cauda da descarga é relevante no fenômeno observado (como absorção de energia por para-raios), a representação pela impedância impulsiva pode levar a erros consideráveis, sendo esses erros tão mais significativos quanto mais relevante for o papel da cauda da descarga na avaliação.

Essa limitação é ainda mais considerável em um cenário no qual os erros associados à representação pela impedância impulsiva subestimam o potencial danoso da descarga atmosférica, uma vez que assume para o aterramento um desempenho melhor que seu real desempenho durante a cauda da descarga, considerando um comportamento rigorosamente dependente da frequência do aterramento.

## 6 Conclusão

O presente trabalho abordou uma série de aspectos a respeito do comportamento de dispositivos para-raios instalados em linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas. Atestou-se que, de fato, descargas atmosféricas incidentes em torres ou em cabos de blindagem da linha de transmissão ameaçam sua continuidade, ocasionando sobretensões que podem provocar a ruptura do isolamento da linha. Nesse contexto, demonstrou-se que dispositivos para-raios apresentam papel relevante na proteção da linha, limitando essas sobretensões. Confirmou-se, ainda, a relevância da qualidade do sistema de aterramento no comportamento de dispositivos para-raios em linhas de transmissão. Observou-se que quanto pior a qualidade do aterramento de pé de torre, mais severas as condições às quais tanto os isoladores, como os próprios os para-raios são expostos.

Em adição, este trabalho avaliou três possíveis formas de representação do sistema de aterramento de pé de torre em simulações no domínio do tempo. A impedância harmônica, que traduz o rigoroso comportamento variável na frequência do aterramento, além da impedância impulsiva e da resistência em baixas frequências, que consistem em representações compactas do aterramento potencialmente empregáveis em simulações. Nesse contexto, foram comparados os resultados decorrentes de cada uma dessas representações, avaliando a assertividade de cada representação simplificada do aterramento, em comparação ao seu rigoroso comportamento dependente da frequência.

Os resultados decorrentes da representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências diferenciaram-se consideravelmente dos resultados associados ao aterramento representado por seu rigoroso comportamento dependente da frequência, especialmente no caso de solos mais resistivos. Isso ocorreu em virtude de o desempenho impulsivo do aterramento ser melhor que o seu desempenho em baixas frequências. Dessa forma, a representação pela resistência de aterramento em baixas frequências assume para o aterramento um desempenho pior do que seu desempenho real quando da avaliação de fenômenos impulsivos. Em virtude disso, o

potencial danoso da descarga atmosférica é superestimado. Essa condição foi observada em todas as simulações conduzidas para essa representação do aterramento, tanto em avaliações de sobretensões em isoladores, como em avaliações da energia absorvida por para-raios. Por outro lado, os resultados associados a essa representação, ainda que incorretos, são conservativos.

Nesse contexto, a impedância impulsiva credencia-se como potencial representação do aterramento em avaliações de descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão. Quando da simulação de condições nas quais apenas a frente da onda de descarga apresenta papel relevante, essa representação incorreu em resultados satisfatórios. Comparando-se com os resultados associados à representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências, os resultados associados à impedância impulsiva do aterramento se mostraram mais próximos àqueles obtidos quando da consideração do rigoroso comportamento dependente da frequência do aterramento. Além disso, é mantida a conservatividade nas avaliações. Todos os resultados associados à representação do aterramento por sua impedância impulsiva se mantiveram inferiores (ainda que próximos) aos resultados associados à impedância harmônica. Essas observações foram constatadas quando da avaliação das máximas sobretensões nos isoladores das linhas, e nos efeitos disruptivos associados.

Por outro lado, a representação do aterramento por sua impedância impulsiva não apresentou resultados satisfatórios quando da simulação de condições nas quais a cauda da descarga apresenta um papel relevante no comportamento avaliado. Essa condição foi observada nas simulações da energia absorvida por dispositivos pararaios. O processo de decaimento da descarga é lento (comparando-se ao seu tempo de frente), de forma que, durante a cauda da onda, o aterramento deixe de estar sujeito a uma condição impulsiva que aprimore o seu desempenho. Nesse sentido, a representação pela impedância impulsiva assume para o aterramento um desempenho superior ao seu desempenho real, subestimando, portanto, o potencial danoso da descarga. Dessa forma, quando da avaliação de condições nas quais a cauda da descarga é relevante, entre as representações simplificadas do aterramento, é mais prudente a representação a partir da resistência de aterramento em baixas

frequências, uma vez que os resultados a ela associados são conservativos, ainda que errôneos.

### 6.1 Propostas de continuidade

Há variadas condições sob as quais linhas de transmissão podem estar expostas quando da incidência de descargas atmosféricas. Trata-se de diferenças nas características de linhas, bem como nas naturezas de descargas atmosféricas que ameaçam o seu funcionamento. Nesse contexto, as análises conduzidas nesse trabalho podem ser estendidas para avaliação de outras situações de ocorrência. São apresentadas algumas propostas de continuidade para o trabalho.

- Avaliações análogas às apresentadas no presente trabalho, contemplando outras características de linhas de transmissão, tais como outros níveis de tensão, outras disposições de condutores fases e de blindagem nas torres, linhas de circuito duplo, torres estaiadas, entre outros.
- Avaliação da incidência de todas as descargas que podem escoar por meio de um canal ionizado formado, considerando, portanto, o impacto de descargas subsequentes nas linhas de transmissão. Ressalta-se que a forma de onda dessas descargas é distinta, requerendo, eventualmente, observações quando da representação do aterramento por sua impedância impulsiva.
- O modelo de linhas dependente da frequência (JMarti) empregado nas simulações considera a impedância de retorno pelo solo [40]. No entanto, esse modelo despreza as correntes capacitivas no solo e, adicionalmente, não considera a dependência da frequência dos parâmetros elétrico (condutividade e permissividade do solo). Propõe-se levantamento de resultados análogos, porém considerando a variação com a frequência dos parâmetros elétricos do solo também no modelo de linhas de transmissão.
- Avaliação do comportamento de para-raios quando da incidência de descargas atmosféricas diretamente nas fases das linhas de transmissão, ameaçando sua continuidade mediante o fenômeno de *flashover*, simulando uma falha de blindagem na linha.

- Avaliação do impacto do fenômeno de ionização do solo no desempenho de para-raios de linhas de transmissão quando da incidência de descargas atmosféricas, sob os pontos de vista de sobretensões atmosféricas e energia absorvida por dispositivos para-raios.
- Levantamento de estimativas de desempenho de linhas de transmissão (desligamentos/100 km/ano) a partir das avaliações conduzidas neste trabalho, considerando típicos índices ceráunicos brasileiros.
- Aprofundamento no processo de especificação de dispositivos para-raios de linhas de transmissão, considerando a energia absorvida quando da incidência de descargas atmosféricas, processo natural de desgaste do dispositivo frente a surtos, entre outros fatores.
- Observou-se que na frente de onda, a representação do aterramento por sua impedância impulsiva apresenta resultados satisfatórios, ao passo que a resistência de aterramento em baixas frequências é uma boa representação do aterramento durante a cauda da descarga atmosférica. Nesse sentido, considerar a possibilidade de simulação da incidência de descargas atmosféricas com o aterramento representado por sua impedância impulsiva na frente da onda de descarga, e por sua resistência em baixas frequências durante a cauda.
## 7 Referências

- [1] R. O. PEDROSA. Estudo da Absorção de Energia de Para-raios de ZnO Instalados em Linhas de Transmissão de 138 kV. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGEE/UFMG). 2013.
- [2] R. ALIPIO, M. H. R. DUARTE, J. C. A. DIAS, and A. S. De MIRANDA. Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical brazilian conditions. in Proc. 2007 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil, pp. 1–5. 2017.
- [3] IEEE. Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Standard 1243-1997. 1997.
- [4] CIGRE Working Group 33-01. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. Study Committee 33. Dallas, TX, USA. 1991.
- [5] J. G. ANDERSON. Monte Carlo computer calculation of transmission- line lightning performance. IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-80, no. 3, pp. 414–419. 1961.
- [6] W. A. CHISHOLM, Y. L. CHOW, and K. D. SRIVASTAVA. Lightning surge response of transmission towers. IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232–3242. 1983.
- [7] J. A. MARTINEZ and F. CASTRO-ARANDA. Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP. IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 3, pp. 2200–2210. 2005.
- [8] A. AMETANI and T. KAWAMURA. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP. IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 867–875. 2005.

- [9] J. A. MARTINEZ and F. CASTRO-ARANDA. Lightning flashover rate of an overhead transmission line protected by surge arresters. in Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp 1-6. 2007.
- [10] K. MUNUKUTLA, V. VITTAL, G. T. HEYDT, D. CHIPMAN, and B. KEEL. A practical evaluation of surge arrester placement for transmission line lightning protection. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1742– 1748. 2010.
- [11] M. ISHII and H. KAWAMURA. Application of line surge arresters to double-circuit transmission lines. in Proc. of 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), pp. 312-318. 2011.
- [12] S. VISACRO, M. H. M. VALE, G. CORREA, A. TEIXEIRA. Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes. Journal of Geophysical Research, Vol 115, D16104. 2010.
- [13] CIGRE. Lightning Parameters for Engineering Applications, WG C4.407.2013.
- [14] A. CONTI, S. VISACRO. Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2. 2007.
- [15] A. CONTI. Modelos para definição de ondas de corrente e tensão representativas das solicitações de sistemas de distribuição por descargas atmosféricas. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2006.
- [16] S. VISACRO, A. SOARES, M. A. O. SCHROEDER, L. C. L. CHERCHIGLIA, and V. J. SOUSA. Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station. Journal on Geophysical Research, vol. 109, D01105, pp. 1–11. 2004.
- [17] S. VISACRO, C. MESQUITA, M. BATISTA, L. ARAÚJO, A. TEIXEIRA. Updating the statistics of Lightning Currents Measured at Morro do

*Cachimbo Station.* 30<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP). 2010.

- [18] A. F. PINTO. Avaliação do Impacto do Comportamento Dependente da Frequência do Aterramento na Atuação de Para-raios de Linhas de Transmissão Frente a Sobretensões Atmosféricas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPGEL/CEFET-MG). 2016.
- [19] Retirado de <https://thumbs.dreamstime.com/z/silhouette-high-voltagepower-lines-vector-illustration-31902891.jpg>, acessado em dezembro de 2017.
- [20] M. N. O. SADIKU. *Elementos de Eletromagnetismo*. Ed. Bookman. 2012.
- [21] S. O. FRONTIN et al. Equipamentos de alta tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 2013.
- [22] ABNT NBR 16050. Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada. 2012.
- [23] V. HINRICHSEN. Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems. Siemens. 3rd edition. 2011.
- [24] Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS. Revisão 2016.12.
- [25] CEMIG. Para-raios de resistor não linear de óxido metálico para sistemas de potência. Especificação técnica 02.118 - CEMIG - 266d. 2012.
- [26] S. VISACRO. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 381– 386, Jan. 2007.
- [27] A. M. MOUSA. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. IEEE Trans. Power Del., vol. 9, nº 3, pp. 1669-1677, jul. 2004.

- [28] R. S. ALIPIO. Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). 2008.
- [29] M. H. R. DUARTE. Comportamento de Sistemas de Aterramento Submetidos a Correntes Impulsivas. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). 2015.
- [30] S. VISACRO, R. ALIPIO, M. H. MURTA VALE, C. PEREIRA. The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 53, no. 2, pp. 401–406. 2011.
- [31] S. VISACRO, R. ALIPIO. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 927–935. 2012.
- [32] R. ALIPIO, S. VISACRO. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171. 2014.
- [33] R. ALIPIO and S. VISACRO. Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 1, pp. 132–139. 2013.
- [34] R. ALIPIO and S. VISACRO. Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency dependent soil parameters. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 29, no. 2, pp. 716–723. 2014.
- [35] S. VISACRO, R. ALIPIO, C. PEREIRA, M. GUIMARÃES, and M. A. O. SCHROEDER. Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 1, pp. 121–127. 2015.

- [36] B. GUSTAVSEN, A. SEMLYEN. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, pp. 1052–1061. 1999.
- [37] B. GUSTAVSEN. Fast Passivity Enforcement for Pole-Residue Models by Pertubation of Residue Matrix Eigenvalues. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, no 4. 2008.
- [38] B. GUSTAVSEN, Matrix Fitting Toolbox [Online]. Available: https://www.sintef.no/projectweb/vectfit/. 2009.
- [39] S. VISACRO, F. SILVEIRA. Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 31, no 4. 2016.
- [40] J. R. MARTI. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157. 1982.
- [41] R. ALIPIO, M. H. R. DUARTE, A. C. S. LIMA. Influence of Grounding Representation on the Lightning Performance of Line Surge Arresters -Part I: Impact on the Developed Overvoltages. Submetido no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VII SBSE), Brazil. 2018.
- [42] A. De CONTI, S. VISACRO, A. SOARES, and M. A. O. SCHROEDER. Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors. IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 48, n. 3, pp. 530–536. 2006.
- [43] Siemens: High-voltage surge arresters product guide [Online]. Available: http:// siemens.com/energy/arrester. 2017.
- [44] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling. *Modeling of metal oxide surge arresters*. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 302–309.
  1992.
- [45] S. VISACRO, A. SOARES. HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, No 2. 2015.

- [46] A. R. HILEMAN. Insulation Coordination for Power Systems. CRC Press, pp.627–640. 1999.
- [47] J. MARTINEZ-VELASCO and F. CASTRO-ARANDA. Assessment of the Lightning Flashover Rate of a Shielded Transmission Line Protected by Surge Arresters. 2016.