



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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE ATERRAMENTO
E LINHAS DE TRANSMISSÃO NA ANÁLISE DE SOBRETENSÕES EM
LINHAS AÉREAS SUBMETIDAS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
DIRETAS UTILIZANDO PLATAFORMAS DO TIPO ATP/EMTP**

Audine Sena de Miranda

Belo Horizonte

Fevereiro 2019



**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE ATERRAMENTO
E LINHAS DE TRANSMISSÃO NA ANÁLISE DE SOBRETENSÕES EM
LINHAS AÉREAS SUBMETIDAS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
DIRETAS UTILIZANDO PLATAFORMAS DO TIPO ATP/EMTP**

Audine Sena de Miranda

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à banca examinadora designada pelo Colegiado do Departamento 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

Belo Horizonte

Fevereiro 2019

- M672a Miranda, Audine Sena de
Avaliação da influência dos modelos de aterramento e linhas de transmissão na análise de sobretensões em linhas aéreas submetidas a descargas atmosféricas diretas utilizando plataformas do tipo ATP/EMTP / Audine Sena de Miranda. – 2019.
89 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.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
1. Linhas elétricas aéreas – Avaliação – Teses. 2. Energia elétrica – Transmissão – Teses. 3. Descargas atmosféricas – Teses. 4. Aterramento elétrico – Modelos matemáticos – Teses. 5. Processamento de dados em tempo real – Software – Teses. I. Alípio, Rafael Silva. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Universidade Federal de São João del-Rei. IV. Título.

CDD 621.3192

Elaboração da ficha catalográfica pela Biblioteca-Campus II / CEFET-MG

(FOLHA DE APROVAÇÃO)

Dedico este trabalho aos meus pais Ariádine e Carlos e à minha irmã e amiga Luiza pelo amor e incentivo incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Cada conquista é única e especial quando se reconhece o caminho percorrido até o objetivo final. Essa é uma grande conquista.

A caminhada foi árdua: foram horas, dias e meses de dedicação, persistência, abdicação e muito aprendizado. Buscar conhecimento é investimento em nós mesmos e reconhecer que essa conquista não é exclusivamente minha é exercício de humildade e gratidão.

Agradeço primeiramente à Deus por me fortalecer nos momentos de turbulência, pelas incontáveis bênçãos concedidas e especialmente por me fazer enxergar oportunidades na dificuldade.

À minha mãe Ariádine Sena, pelo amor e apoio inabaláveis, por ser meu espelho de determinação e resiliência; pelos incontáveis conselhos, abraços e colos de mãe, por me recobrar a consciência quando eu saio do rumo. Ao meu pai Carlos Augusto, pelo amor e dedicação também inabaláveis; por me ensinar a sorrir nos momentos de adversidade, pelos inúmeros conselhos, pelos momentos de descontração e carinho. À minha irmã e melhor amiga Luiza Sena, pelo amor incondicional, por estar ao meu lado em todas as batalhas, por me ajudar a levantar quando eu caio, por me incentivar, por me inspirar a ser melhor a cada dia. Ao meu amigo e cunhado Gustavo Batista, por se fazer tão especial em nossa família. Obrigada por me escolherem como filha, irmã e amiga, sempre acreditando que eu era capaz de realizações maiores que eu mesma imaginava. É uma grande bênção partilhar uma vida de amor, união e aprendizado constante com vocês.

Aos meus familiares, pela torcida e carinho, em especial ao vovô Nardy, meu exemplo de grande sabedoria, simplicidade, carinho, paciência e muito amor e que inspira não só a mim como a todos ao seu redor.

Ao meu orientador, Rafael Alípio, pela paciência, dedicação e principalmente por acreditar em mim quando eu mesma não acreditava. Pelo aprendizado e motivação fantásticos no processo de orientação e em sala de aula. Pelos conselhos valiosos que tanto me enriqueceram pessoal e profissionalmente. Por me inspirar de maneira singular e tornar cada estudo, cada análise e leituras prazerosos. Meu respeito, gratidão e admiração são dedicados à você, Rafael. Foi um privilégio ser sua orientada.

Ao professor Alberto De Conti por fornecer os blocos de arquivo do modelo de linha *J. Marti modificado* que serviram como base para as simulações dessa dissertação.

Aos amigos do CEFET-MG, irmãos de coração: Sô Paulo, Luiz Felipe, Victor Marchesini e Fabricio Brandão. Em especial ao meu grande amigo Renato Sales, pelo apoio, pelos valiosos conselhos e risadas nesta caminhada. Sinto-me privilegiada pela amizade de vocês.

Aos *Mestres da Resenha*, Isabel Moraes, Deishi Santos, Pedro Santos, Novack Henrique, Guilherme Lopes e Rafael Barroso, pela amizade sincera construída e pelos momentos singulares de fraternidade e união ao longo do mestrado. Em especial agradeço muito a Daiane Rafael e Matheus Duarte pelo carinho, cumplicidade, conselhos, ajuda “sem limites” e por sempre acreditarem em mim. Sem vocês essa caminhada teria sido penosa demais!

Aos amigos e colegas maranhenses pelo grande acolhimento e carinho nesta minha nova etapa. Em especial ao meu amigo e irmão Raphael Melo, pelo apoio fraternal, pelas inúmeras risadas, pelo ombro amigo nos momentos difíceis. À Hananda Sousa e Inngrid Gurgel pela amizade sincera, pelos conselhos e momentos tão especiais que compartilhamos.

Ao Centro Espírita Mensageiros da Luz, por me acolher de maneira tão singular. Em especial aos amigos Lenisse Estelle e Paulo Trindade pelo amor, carinho, puxões de orelha que tanto me enriquecem. Minha imensa gratidão por estar com vocês.

Aos colegas da CEMAR, em especial aos colegas da Gerência de Operação do Sistema Elétrico pela amizade e suporte.

Ao CEFET-MG, pela segunda vez me proporcionando uma formação de excelência. Em especial a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica pela disponibilidade e conhecimento adquirido.

*“Muitas vezes as pessoas
são egocêntricas, ilógicas e insensatas.
Perdoe-as assim mesmo.*

*Se você é gentil,
as pessoas podem acusá-lo de interesseiro.
Seja gentil assim mesmo.*

*Se você é um vencedor,
terá alguns falsos amigos e alguns inimigos verdadeiros.
Vença assim mesmo.*

*Se você é honesto e franco,
as pessoas podem enganá-lo.
Seja honesto e franco assim mesmo.*

*O que você levou anos para construir,
alguém pode destruir de uma hora para outra.
Construa assim mesmo.*

*Se você tem paz e é feliz,
as pessoas podem sentir inveja.
Seja feliz assim mesmo.*

*O bem que você faz hoje,
pode ser esquecido amanhã.
Faça o bem assim mesmo.*

*Dê ao mundo o melhor de você,
mas isso pode não ser o bastante.
Dê o melhor de você assim mesmo.*

*Veja você que, no final das contas,
é tudo entre você e Deus.
Nunca foi entre você e os outros.”*

Madre Tereza de Calcutá

RESUMO

As descargas atmosféricas são a principal causa de desligamentos não programados em linhas de transmissão, em especial o fenômeno do *backflashover*. Com o intuito de mitigar os riscos associados a este fenômeno, é importante modelar os elementos do sistema de maneira consistente, em especial o aterramento de pé de torre e a linha de transmissão. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do sistema de aterramento de pé de torre e da linha de transmissão nas sobretensões atmosféricas resultantes da incidência direta de descargas em linhas aéreas, utilizando plataformas do tipo ATP/ EMTP.

Essas avaliações são conduzidas a partir de simulações no domínio do tempo e o impacto de cada representação é analisado em termos de sobretensões resultantes na cadeia de isoladores. São considerados os resultados associados às representações simplificadas do aterramento- resistência em baixas frequências e impedância impulsiva e os resultados decorrentes da representação rigorosa do comportamento dependente da frequência do aterramento. Adicionalmente, são avaliadas duas representações de linhas de transmissão: o consagrado *J. Marti* e o modelo nomeado neste trabalho como *J. Marti modificado*, que diferentemente do modelo *J. Marti*, contempla a variação dos parâmetros do solo com a frequência.

De acordo com os resultados, a representação do aterramento impacta sensivelmente as sobretensões resultantes e a definição do valor crítico de corrente de descarga que irá provocar a ruptura do isolamento. Considerando a representação via impedância harmônica como referência, a impedância impulsiva conduz a valores de corrente crítica muito próximos à essa representação rigorosa e pode ser vista como uma boa opção para a modelagem do aterramento em linhas de transmissão para estudo de desempenho frente a descargas atmosféricas em plataforma do tipo ATP/EMTP.

Ainda de acordo com os resultados, os modelos de linha apresentam menor influência nas sobretensões resultantes na cadeia de isoladores. Apenas em solos de alta resistividade o efeito da inclusão da dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência no modelo *J. Marti modificado* acarreta em diferenças perceptíveis nas sobretensões desenvolvidas, especialmente quando se considera a incidência a meio vão.

ABSTRACT

Lightning are the main cause of unscheduled outages in transmission lines, in particular the *backflashover* phenomenon. In order to mitigate the risks associated with this phenomenon, it is important to model the elements of the system in a consistent way, in particular the tower-footing grounding and the transmission line. Thus, the present work has the objective of evaluating the influence of the tower-footing grounding system and the transmission line in the atmospheric overvoltages resulting from the direct incidence of discharges in overhead lines, using ATP / EMTP platforms.

These evaluations are carried out from simulations in the time domain and the impact of each representation is analyzed in terms of resulting overvoltages in the chain of insulators. The results associated with the simplified representations of grounding resistance at low frequencies and impulsive impedance are considered, as well as the results from the rigorous representation of the dependent behaviour of the grounding frequency. In addition, two representations of transmission lines are evaluated: the consecrated *J. Marti* and the model named in this work as *modified Marti's model* that unlike the *J. Marti*, considers the variation of the parameters of the soil along with the frequency.

According to the results, the grounding representation has a significant impact in the resulting overvoltages and in the definition of the critical value of the lightning current that will lead to a fashover. Considering the representation via harmonic impedance as reference, the impulsive impedance leads to critical current values very close to this rigorous representation and can be seen as a good option for the grounding modeling in transmission lines for the study of their performance in ATP/EMTP platform.

Still according to the results, line models have less influence on the resulting overvoltages in the chain of insulators. Only in high resistivity soils the effect of including the dependence of the electrical parameters of the soil with the frequency in the *modified Marti's model* leads to perceptible differences in the results overvoltages developed, especially when considering the midspan incidence.

SUMÁRIO

Capítulo 1	13
Introdução	13
1.1 Objetivos	14
1.2 Contextualização.....	15
1.3 Organização do texto	15
Capítulo 2	17
Análise de Transitórios Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão Utilizando Plataformas do Tipo ATP/ EMTP	17
2.1 Incidência direta de descargas atmosféricas em torres e cabos de blindagem....	17
2.1.1 O <i>backflashover</i>	18
2.2 Modelagens dos elementos do sistema de transmissão em plataformas do tipo ATP/EMTP	20
2.2.1 Descargas atmosféricas: a onda de corrente.....	21
2.2.2 Modelos de linha de transmissão	28
2.3.3 Torres de transmissão.....	32
2.3.4 Aterramento	37
2.3.5 Isoladores	41
2.3 Considerações finais	44
Capítulo 3	46
Modelagens Adotadas e Caracterização do Caso Base	46
3.1 Caso base	46
3.1.1 Cabos fase e de blindagem da linha de transmissão.....	46
3.1.2 Torre de Transmissão	47
3.1.3 Descarga atmosférica	49
3.1.4 Efeito disruptivo na cadeia de isoladores.....	51

3.2	Dependência dos parâmetros do solo com a frequência	52
3.3	Representações da linha de transmissão	53
3.4	Sistema de aterramento de torres de transmissão	54
3.5	Considerações finais	62
Capítulo 4		64
Resultados		64
4.1	Influência da representação do sistema de aterramento no cálculo das sobretensões atmosféricas.....	64
4.1.1	Parametrização das simulações	65
4.1.2	Sobretensões na cadeia de isoladores para resistividades típicas	67
4.1.3	Efeito disruptivo associado	69
4.1.4	Análise dos resultados.....	72
4.2	O efeito da dependência dos parâmetros do solo com a frequência nos modelos de linhas de transmissão	74
4.2.1	Transitórios eletromagnéticos em um vão da linha	74
4.2.2	Incidência da descarga atmosférica no topo da torre	77
4.2.3	Incidência da descarga atmosférica no meio do vão.....	79
4.2.4	Análise dos Resultados	81
4.3	Considerações finais	83
Capítulo 5		85
Conclusões e Propostas de Continuidade		85
Referências Bibliográficas		87

Capítulo 1

Introdução

A qualidade da energia do sistema elétrico pode ser avaliada por meio de índices que levam em consideração, dentre outros aspectos, a duração e o número de interrupções no serviço. Os órgãos reguladores estabelecem limites permissíveis para tais índices que, quando violados, acarretam perdas no faturamento e multas para as concessionárias de energia. A fim de assegurar a qualidade do fornecimento, limites cada vez mais rigorosos têm sido adotados, o que fomenta um estudo cada vez mais detalhado de como mitigar as principais causas da violação dos índices.

As descargas atmosféricas são capazes de provocar sobretensões severas nas cadeias de isoladores da linha de transmissão e, caso ultrapassem o nível de rigidez dielétrica do isolamento, podem acarretar um desligamento indesejável. Fundamentalmente, o desligamento da linha devido à incidência de descargas pode decorrer de dois tipos de ocorrência: incidência direta nos cabos fase e incidência direta na torre ou nos cabos de blindagem. Considerando linhas de transmissão blindadas, a segunda ocorrência é a principal causa de desligamentos de linhas de transmissão levando ao mecanismo de ruptura normalmente chamado de *backflashover*.

Com o intuito de definir práticas para reduzir o impacto da incidência de descargas em linhas, as simulações computacionais desempenham papel importante, com destaque para as plataformas de cálculo no domínio do tempo, tais como ATP, EMTP-RV e PSCAD. Nesse caso, é de fundamental importância a rigorosa modelagem dos elementos do sistema elétrico, tendo-se em conta o fenômeno em questão que corresponde a uma solicitação impulsiva, com amplo espectro de frequências associado. Entretanto, as plataformas mencionadas não possuem modelos apropriados para o aterramento, considerando seu comportamento fortemente dependente com a frequência. Muitos dos trabalhos na literatura que avaliam o desempenho de linhas de transmissão para solicitações atmosféricas, empregando as plataformas citadas, utiliza um modelo bastante simplificado para o aterramento – um resistor linear com resistência igual ao valor da resistência de aterramento em baixas frequências, por exemplo [1]-[4]. Apesar de não possuírem modelos que propiciem uma representação consistente do sistema de aterramento, essas plataformas dispõem de modelos de linhas de transmissão que permitem avaliar diversos fenômenos transitórios. No que concerne às

solicitações atmosféricas, o modelo *J. Marti* é muito utilizado na literatura para a representação de linhas de transmissão; contudo, esse modelo não contempla a forte dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, importante sobretudo, em solos de alta resistividade. Considerando o espectro de frequências das descargas atmosféricas, geralmente na faixa de 0 Hz até alguns MHz, a representação tanto do aterramento como da linha de transmissão em plataformas desse tipo pode implicar resultados incorretos nas simulações.

Diante desses comentários iniciais, este trabalho pretende gerar uma contribuição no tema *desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas*, em especial na avaliação do impacto de representações do sistema de aterramento e da linha de transmissão em plataformas de cálculos de transitórios no domínio do tempo.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o impacto das representações do sistema de aterramento de pé de torre e de linhas de transmissão em plataformas do tipo ATP/EMTP, no que concerne às solicitações atmosféricas, em especial avaliando o fenômeno do *backflashover*.

Diante do objetivo deste trabalho e o contexto em estudo, as seguintes atividades são elencadas como norteadoras:

- Avaliar a consistência e efetividade das representações simplificadas do aterramento – resistência de aterramento em baixas frequências e impedância impulsiva – no cálculo de sobretensões atmosféricas, tendo como referência uma representação rigorosa baseada na teoria de campo.
- Avaliar a consistência e efetividade do modelo de linha de transmissão *J. Marti* no cálculo de sobretensões atmosféricas, tendo como referência uma modificação desse modelo que considera a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência.
- Avaliar o impacto da representação dos modelos de linha de transmissão e do sistema de aterramento no desempenho de linhas de transmissão, considerando condições típicas do solo brasileiro.

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 FAPEMIG¹ (TECAP-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 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 texto está estruturado em cinco capítulos, incluindo este introdutório.

O capítulo 2 descreve o fenômeno alvo de estudo deste trabalho, o *backflashover*, e as modelagens usualmente empregadas na literatura para representar os elementos do sistema de transmissão em plataformas do tipo ATP/EMTP: aterramento de pé de torre, linha de transmissão, torre e isoladores. Além disso, são apresentadas as características básicas de descargas atmosféricas e as vantagens e desvantagens das representações comumente utilizadas na literatura.

No capítulo 3, são apresentadas as modelagens adotadas nas simulações para cada elemento do sistema de transmissão e para a descarga atmosférica. Ainda, é elucidada uma abordagem teórica, em especial para os modelos de linha de transmissão e representações do sistema de aterramento, com foco nas representações que incluem o efeito da dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Ademais, é apresentado o caso base, ou seja, o sistema de transmissão a ser adotado nas simulações deste trabalho baseado em sistemas de transmissão típicos usualmente encontrados no Brasil.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e as suas respectivas análises à respeito das sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Os resultados são separados em dois grandes blocos: no primeiro momento, avalia-se o impacto das representações do sistema de aterramento e, no segundo momento, avalia-se o efeito de se

¹ FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

considerar a dependência dos parâmetros do solo com a frequência nos modelos de linha de transmissão. Nesses dois blocos são avaliados também o potencial de ruptura do isolamento da linha pela aplicação do método *DE (Disruptive Effect)*.

Por fim, no capítulo 5, são destacadas as principais realizações e contribuições deste trabalho e apresentadas as propostas de continuidade.

1.4 Publicações

As seguintes publicações são resultado dos desenvolvimentos desta dissertação:

- R. ALIPIO and A. S. MIRANDA, **“Influence of Frequency-dependent Behavior of Grounding Systems and Line Models on Lightning Overvoltages in Overhead Lines”**, In: XXIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, 2017, Bialystok. Proceedings of XXIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, 2017. p. 5-8.
- R. ALIPIO, M. H. R. DUARTE,; J. C. A. DIAS and A. S. MIRANDA, **“Lightning Performance of Transmission Lines Partially Protected by Surge Arresters Considering Typical Brazilian Conditions”**. In: 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), 2017, Natal. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), 2017. p. 365-369.
- A. S. MIRANDA and R. ALIPIO, **“Influence of Frequency-Dependent Characteristics of Grounding and Line Models on Transient Overvoltages in Overhead Lines”**. PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, v. 1, p. 3-6, 2018.
- R. ALIPIO, A. DE CONTI, A. S. MIRANDA and M. T. CORREIA DE BARROS, **“Lightning Overvoltages Including Frequency-Dependent Soil Parameters in the Transmission Line Model”** – *submetido ao IPST - International Conference on Power Systems Transients, 2019.*

Capítulo 2

Análise de Transitórios Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão Utilizando Plataformas do Tipo ATP/ EMTP

Na avaliação das sobretensões transitórias decorrentes da incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, é comum a utilização de ferramentas computacionais de análise de transitórios no domínio do tempo, tais como ATP, EMTP-RV e PSCAD. A aplicação desses *softwares* decorre, principalmente, do fato de tais ferramentas disponibilizarem uma série de modelagens de componentes do sistema elétrico, além de permitirem a inclusão imediata de dispositivos não lineares, tais como para-raios. Adicionalmente, ferramentas como o ATP ainda apresentam a vantagem de se encontrarem em domínio público.

Nesse contexto, o presente capítulo tem como objetivo apresentar os aspectos básicos relativos à interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão, com ênfase no fenômeno de *backflashover* que corresponde à principal causa de desligamentos não programados de linhas de transmissão no âmbito das descargas atmosféricas. Adicionalmente, é apresentada uma análise crítica das modelagens empregadas em plataformas do tipo ATP/EMTP, que são utilizadas para avaliação de transitórios atmosféricos em linhas de transmissão.

2.1 Incidência direta de descargas atmosféricas em torres e cabos de blindagem

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão tem efeitos danosos para o sistema, além de ser a principal causa de desligamentos não programados em linhas até 230 kV [1]. Pode-se caracterizar dois tipos de evento no tocante à solicitação dos isoladores em função das sobretensões associadas às descargas: o *flashover* e o *backflashover*. Um terceiro evento pode ocorrer devido à ruptura do isolamento do ar: a solicitação por incidência a meio vão [1].

A utilização de cabos de blindagem diminui significativamente a probabilidade de incidência da descarga diretamente nos cabos fase, prevenindo consequentemente o *flashover*. Já o fenômeno de *backflashover*, que é o principal causador de interrupções não programadas no sistema de transmissão, é caracterizado, basicamente, pela incidência da descarga nos condutores de blindagem ou na própria torre de transmissão.

2.1.1 O *backflashover*

O *backflashover* é o fenômeno associado à disrupção do isolamento de uma linha, ocasionado pela sobretensão resultante na cadeia de isoladores devido à incidência direta de descargas no cabo de blindagem ou na torre [1].

A utilização dos cabos de blindagem é um mecanismo de proteção que reduz a probabilidade da incidência direta nos condutores fase e conduz a onda de corrente de descargas atmosféricas até as estruturas aterradas. Ao viajar nos cabos de blindagem, em algum momento, a corrente da descarga e a sobretensão associada encontram a primeira torre aterrada, dividindo-se em componentes. Uma parcela é refletida, outra continua percorrendo os cabos de blindagem e outra desloca-se para a torre em direção ao solo, sendo essa última parcela está intimamente ligada a sobretensão a que a cadeia de isoladores fica submetida. Ao alcançar a base da torre, a onda encontra ali um ponto de descontinuidade entre a impedância de surto da torre (Z_T) e a impedância de aterramento (Z_A) produzindo uma reflexão naquele ponto de acordo com coeficiente de reflexão (Γ) dado por:

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_T}{Z_A + Z_T} \quad (2.1)$$

$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad (2.2)$$

em que:

- V_R e V_I são, respectivamente, onda refletida e onda incidente.

Sabe-se que a onda de tensão incidente pode ser obtida pelo produto entre a impedância de surto da torre e a parcela da onda de corrente que desce pela torre. A onda de tensão resultante em qualquer ponto da torre é composta pela soma da onda incidente V_I e da

onda refletida V_R , conforme exemplificado na Figura 2.1. A obtenção de baixos valores de impedância de aterramento em relação à impedância de surto da torre é determinante na ocorrência ou não do *backflashover*, conforme os casos analisados abaixo:

- i) Caso a impedância de aterramento apresente um valor igual ou superior à impedância da torre, não haverá reflexão ou esta reflexão será positiva, provocando uma tensão resultante ao longo da torre igual ou superior à onda de tensão incidente, podendo exceder a suportabilidade do isolamento da linha e ocasionar uma falha no isolamento da estrutura para a fase, caracterizando o fenômeno conhecido como *backflashover*.
- ii) Caso a impedância de aterramento apresente um valor menor que a impedância da torre, haverá uma reflexão negativa que reduz a taxa de crescimento da onda de tensão ao longo da torre e, conseqüentemente, a sobretensão aplicada às cadeias de isoladores. Quanto menor a impedância de aterramento, maior o coeficiente de reflexão (de sinal negativo) e mais significativa é a redução da taxa de crescimento das sobretensões nas cadeias de isoladores. Assim, quanto menor a impedância de aterramento, menor será também a probabilidade de ocorrência de ruptura do isolamento da linha, considerando ondas de corrente típicas de primeiras descargas de retorno.

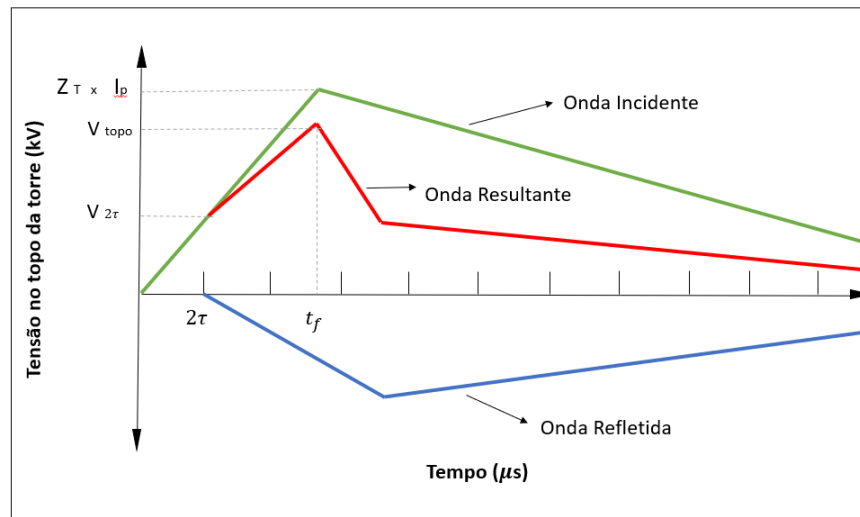


Figura 2.1 -Tensão estabelecida no topo da torre
(t_f = tempo de frente da onda; τ = tempo de trânsito. Adaptado de [1])

Considerando a breve descrição feita do fenômeno transitório decorrente da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, observa-se que ele envolve diversos componentes do sistema elétrico, quais sejam, torre de transmissão, condutores da linha, aterramento e isoladores, além da própria corrente de descarga. Evidencia-se, então, a importância fundamental da modelagem adequada desses elementos, com destaque para o

sistema de aterramento, elemento essencial para determinação da ocorrência, ou não, do *backflashover*. Nesse contexto, a próxima seção apresenta uma descrição crítica das principais modelagens adotadas para os elementos do sistema elétrico, além da corrente de descarga, para avaliação de sobretensões atmosféricas em plataformas do tipo ATP/EMTP.

2.2 Modelagens dos elementos do sistema de transmissão em plataformas do tipo ATP/EMTP

O *software* ATP é uma ferramenta poderosa para a análise de fenômenos transitórios; no caso em questão, sobretensões decorrentes da incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Por meio desse *software*, é possível modelar elementos do sistema de transmissão que influenciam as sobretensões desenvolvidas. Vale considerar que a modelagem adequada de tais elementos é fundamental para que o comportamento a ser analisado seja fiel ao caso real. Dessa maneira, a análise se principia na investigação, escolha e parametrização consistentes dos componentes.

A incidência de descargas atmosféricas em uma linha de transmissão produz ondas de corrente e de tensão resultantes que se propagam por seus elementos, gerando sobretensões severas nas cadeias de isoladores. Como já mencionado, a fim de se calcular essas sobretensões, são amplamente utilizadas plataformas computacionais de cálculo de transitórios no domínio do tempo, tais como ATP, EMTP-RV e PSCAD. Das plataformas mencionadas, pode-se destacar o *software* ATP, que é de domínio público e uso livre. Vale ressaltar que, de acordo com as diretrizes do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão [5], os estudos de transitórios eletromagnéticos devem ser realizados no *software* ATP. Atentando-se para os aspectos mencionados, o ATP é assumido como plataforma base neste trabalho.

Os cabos de blindagem e cabos fase são um dos elementos do sistema de transmissão que servem como percurso para a propagação das ondas oriundas das descargas atmosféricas. Além de tais elementos, pode-se incluir também, a torre e o aterramento da linha. No que concerne à avaliação das sobretensões resultantes do fenômeno, é de fundamental importância a correta modelagem dos elementos envolvidos. No contexto deste trabalho, se interessa, sobretudo, a modelagem da linha de transmissão, torre, sistema de aterramento, isoladores e

corrente de descarga propriamente dita. As seções a seguir apresentam uma descrição das principais modelagens adotadas na literatura para representação desses elementos no ATP.

2.2.1 Descargas atmosféricas: a onda de corrente

Um aspecto fundamental na análise do desempenho de linhas de transmissão é uma modelagem fidedigna da onda de corrente associada à descarga atmosférica. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos ao longo de décadas, com o intuito de se obter a medição da onda de corrente de descargas atmosféricas. Destacam-se o trabalho desenvolvido na Estação do Morro de Cachimbo [6],[7] e as medições no Monte San Salvatore [8]. Tais pesquisas caracterizam as formas de onda, o que possibilita uma melhor avaliação de seus parâmetros e entendimento de sua natureza estatística.

Tendo como referência as descargas nuvem-solo descendentes negativas, o primeiro *stroke* (fluxo da corrente de retorno ao longo do canal de descarga), também denominado de *primeira descarga de retorno* [9], possui, em geral, a frente de onda mais lenta e amplitudes de 2 a 3 vezes maiores do que as observadas nas chamadas descargas subsequentes [10]. Dessa forma, as primeiras descargas de retorno despertam maior interesse, do ponto de vista de engenharia de proteção, e são, normalmente, consideradas na avaliação do desempenho de linhas frente a descargas.

A caracterização das ondas de correntes associadas às descargas atmosféricas é usualmente feita por meio de um conjunto de parâmetros referenciados a partir da curva da Figura 2.2, descritos a seguir.

- I_{p1} : valor de corrente no primeiro pico da descarga;
- I_{p2} : valor máximo de corrente da descarga (valor de pico ou amplitude da descarga);
- T_{10} : tempo compreendido entre os instantes em que a descarga alcança os valores de corrente de 10% e 90% de I_1 ;
- T_{30} : tempo compreendido entre os instantes em que a descarga alcança os valores de corrente de 30% e 90% de I_1 ;

- S_{10} : taxa média de crescimento da amplitude da corrente de descarga entre 10% e 90% de I_1 ;
- S_{30} : taxa média de crescimento da amplitude da corrente de descarga entre 30% e 90% de I_1 ;
- $TANG$: inclinação máxima da onda de corrente na frente.

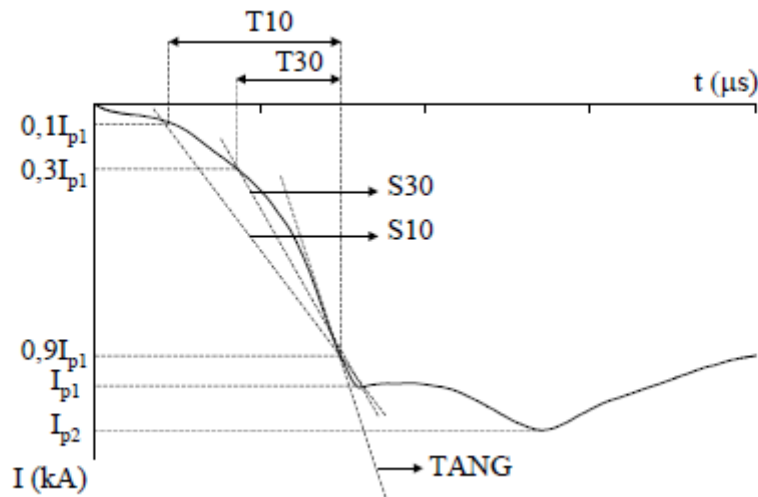


Figura 2.2- Forma de onda de corrente associada a primeiras descargas de retorno negativas descendentes. (Retirado de [9])

As características mencionadas são importantes para se avaliar a representatividade dos modelos adotados na literatura, pois permitem perceber se tais particularidades estão sendo contempladas na onda modelada.

As correntes de descarga são tradicionalmente modeladas de uma maneira bastante simplificada, assumindo formas que consideram somente as principais características da descarga real, como o crescimento rápido na frente da onda e a variação relativamente mais lenta após atingir o pico, não representando, de fato, o fenômeno real. Assim, os tópicos a seguir destinam-se a apresentar as principais modelagens da onda de corrente utilizadas em plataformas do tipo ATP/EMTP.

2.2.1.1 Dupla exponencial

A onda dupla exponencial é comumente utilizada. O emprego dessa onda surgiu da necessidade de padronização de ensaios para avaliar o comportamento de certos dispositivos e equipamentos sujeitos a surtos de tensão e corrente associados a descargas [1]. A utilização desse tipo de onda origina-se, principalmente, da facilidade de sua geração, podendo ser

obtida por uma simples descarga em um circuito RC, similar ao indicado na Figura 2.3. A onda constitui-se na soma de duas exponenciais de sinais opostos e constantes de tempo de valores muito distintos, de acordo com a expressão:

$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.3)$$

em que:

- I : constante associada à amplitude da corrente;
- α e β : constantes de tempo do sinal.

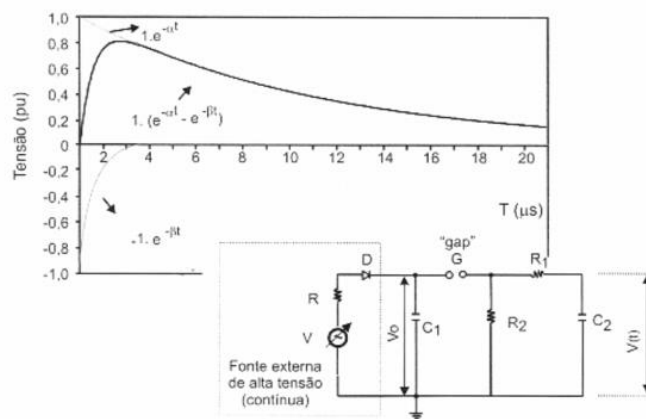


Figura 2.3 - Onda dupla exponencial e circuito de geração (Retirado de [4])

Na equação (2.3), para a determinação dos parâmetros I , α e β recai-se num processo de resolução de um sistema de equações não lineares, a ser resolvido iterativamente, e que deve levar em conta a forma de onda de corrente que se deseja implementar. No caso da dupla exponencial, a forma de onda é basicamente definida por três parâmetros:

- valor de pico da corrente;
- tempo de frente, que corresponde ao tempo necessário para a corrente sair de zero e atingir o seu valor máximo;
- tempo de meia onda, que corresponde ao instante de tempo em que a corrente, após atingir o pico, decai para a metade do seu valor máximo.

Embora a dupla exponencial apresente um conteúdo de frequências representativo de descargas atmosféricas, ela não representa, adequadamente, algumas características importantes se comparada a uma descarga real, principalmente a sua natureza côncava na

frente na onda e sua derivada máxima próxima ao pico, como é possível observar na Figura 2.4 que ilustra uma forma de onda do tipo dupla exponencial com o valor de pico de 45 kA, tempo de frente de 5 μ s e tempo de cauda de 50 μ s, que correspondem a valores próximos aos medianos de onda de primeiras descargas medidas no Morro do Cachimbo [6]. Essa forma de onda foi obtida utilizando-se o componente SURGE TYPE 15 no ATP [11].

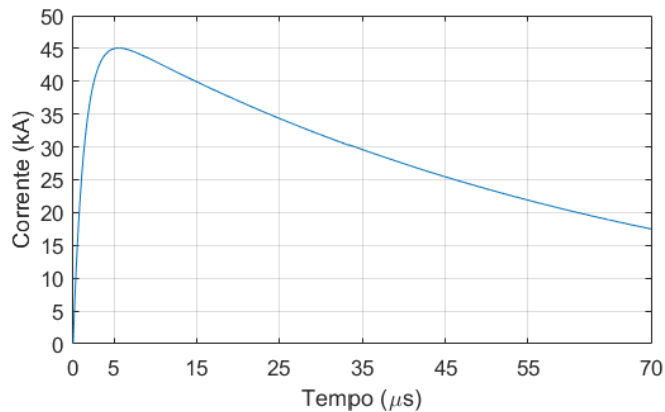


Figura 2.4 - Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas pelo modelo de dupla exponencial obtido no ATP.

2.2.1.2 Onda triangular

Outra modelagem da onda de corrente também muito utilizada é a onda triangular, que possui uma representação matemática muito simples que compreende duas retas, uma que representa a frente da onda e outra, a cauda. Apesar da vantagem da simplicidade, essa representação apresenta uma derivada constante na frente da onda, o que difere significativamente dos registros reais da forma de onda de corrente da descarga [6]. Por conseguinte, sua utilização pode restringir a qualidade dos resultados, principalmente quando deseja-se avaliar o espectro de frequências associado à onda de corrente, uma vez que os elementos que compõe o sistema de transmissão têm seu comportamento dependente da frequência. A Figura 2.5 ilustra a forma de onda triangular, obtida com o componente RAMP TYPE 12 do ATP [11], valor de pico de 45 kA, tempo de frente de 5 μ s e tempo de cauda de 50 μ s.

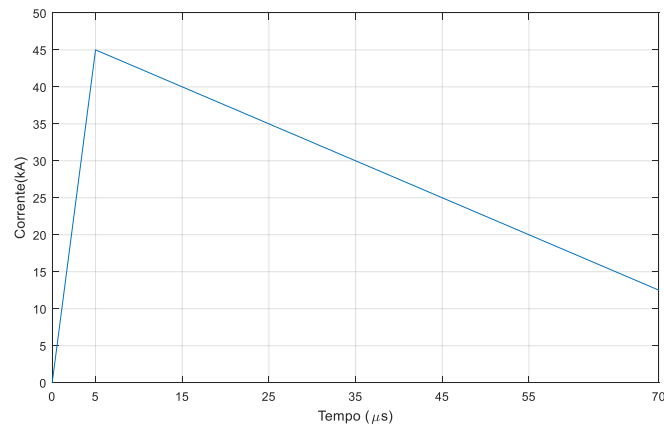


Figura 2.5 - Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas por meio do modelo de onda triangular obtido no ATP.

2.2.1.3 Modelo CIGRÉ

Com o intuito de contornar as limitações das ondas dupla exponencial e triangular descritas anteriormente, o grupo de estudos do CIGRÉ de desempenho de linhas de transmissão propôs um conjunto de expressões matemáticas capaz de representar as principais características das primeiras descargas de retorno, quais sejam, frente de onda côncava e derivada máxima próxima ao pico de corrente [12]. A representação proposta é constituída de dois conjuntos principais de equações: um para representação da frente da onda e outro para a cauda. Embora essa representação seja considerada mais consistente do que as duas discutidas anteriormente (dupla exponencial e onda triangular), ela apresenta a desvantagem de a onda não ser descrita por uma única equação, o que, em alguns casos, pode ser fonte de problemas associados à descontinuidade matemática. Adicionalmente, essa representação não contempla os múltiplos picos, notadamente os dois primeiros, observados em formas de ondas reais de primeiras descargas de retorno.

A Figura 2.6 ilustra a forma de onda do CIGRÉ, obtida a partir do componente CIGRÉ TYPE 15 da plataforma ATP, considerando parâmetros medianos de primeiras descargas de retorno medidas no Morro do Cachimbo. Os parâmetros de entrada desse componente são: amplitude da corrente (I_{p2}), constante associada à frente da onda (T_{30}), tempo de meia onda e inclinação máxima da onda de corrente na frente ($TANG$).

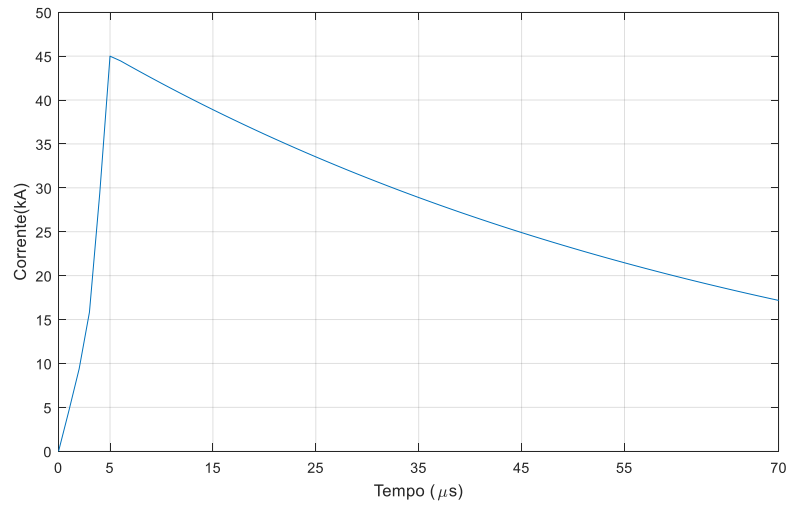


Figura 2.6 - Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas pela modelagem proposta pelo CIGRÉ obtida no software ATP.

2.2.1.4 Modelagem pelas funções de Heidler

Também com o intuito de suprir a falta de representatividade das ondas dupla exponencial e triangular, o pesquisador alemão Heidler propôs uma função analítica que contempla a natureza côncava da onda nos seus instantes iniciais, além de observar, parcialmente, o posicionamento da derivada máxima próxima ao pico [13]. A função de Heidler é apresentada a seguir:

$$I(t) = \frac{I_0 \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\eta \left(1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n\right)} e^{-t/\tau_2} \quad (2.4)$$

$$\eta = e^{\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right]} \quad (2.5)$$

em que I_0 corresponde à amplitude da forma de onda sem correção, η corresponde a um fator empregado para corrigir a amplitude da corrente, τ_1 e τ_2 controlam os tempos de subida e descida da onda de corrente, respectivamente, e n é um fator adimensional que controla a taxa de crescimento da curva sintetizada. A função de Heidler está implementada na plataforma ATP, no componente HEIDLER TYPE 15 [11].

Normalmente, de modo a contemplar as três características principais de primeiras descargas de retorno, quais sejam, concavidade da frente, derivada máxima próxima ao pico e ocorrência de múltiplos picos, é necessária a utilização de mais de uma função de Heidler. Em [14], De Conti e Visacro propõem a utilização de 7 funções de Heidler para representação de primeiras descargas medidas nas estações de San Salvatore e do Morro do Cachimbo, considerando seus principais parâmetros mediados. A Figura 2.7 ilustra a forma de onda obtida a partir da soma de 7 funções de Heidler, que contempla os principais parâmetros medianos de primeiras descargas medidas na estação do Morro do Cachimbo, e que considera dois picos de corrente. Segundo [14], também seria possível representar, a partir da soma de um número maior de funções de Heidler, os demais picos tipicamente presentes nas primeiras descargas, porém esses picos não possuem uma caracterização estatística apropriada.

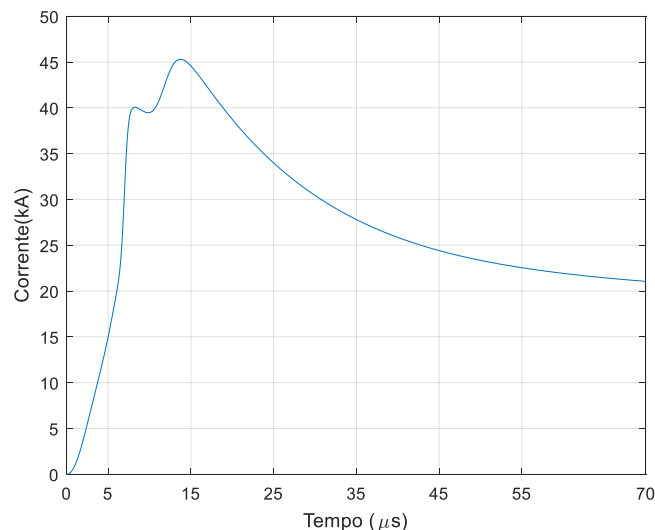


Figura 2.7- Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas pela soma de sete funções de Heidler obtidas no software ATP.

É importante salientar que a forma de onda proposta em [14], é representativa de ondas chamadas *medianas*. Recentemente, e tendo como base o trabalho de De Conti e Visacro [14], apresenta-se em [15] um procedimento que permite sintetizar formas de ondas com características similares às da onda ilustrada na Figura 2.7, isto é, frente côncava, derivada máxima próxima ao pico e presença de dois picos, porém considerando parâmetros que não os medianos.

Considerando os recursos existentes na plataforma ATP, entende-se que os trabalhos [14] e [15] correspondem ao estado da arte em termos de representação de ondas de corrente

de primeiras descargas de retorno para fins de avaliação de transitórios associados à incidência direta de descargas em linhas de transmissão.

2.2.2 Modelos de linha de transmissão

As linhas de transmissão são um dos elementos mais importantes do sistema de energia elétrica. Elas destinam-se a transportar grandes blocos de energia, e, como mencionado, a principal causa de desligamento desse elemento é a incidência de descargas atmosféricas que acarreta uma série de prejuízos para o sistema, além de multas para as concessionárias.

O software ATP dispõe de alguns modelos para representação de linhas de transmissão que podem ou não serem adequados para determinados estudos, de acordo com a exatidão e eficiência desejadas [16]. Dentre os modelos disponíveis no ATP, quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as linhas de transmissão podem ser representadas por modelos a parâmetros concentrados ou distribuídos [17]. Com relação à dependência da frequência da impedância longitudinal, distinguem-se os modelos a parâmetros constantes e dependentes da frequência [18]. Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição dos modelos de linha do ATP de uso mais difundido.

2.2.2.1 Modelos com parâmetros concentrados

O ATP possui o modelo a parâmetros concentrados “pi-nominal” implementado, cujo circuito equivalente é ilustrado na Figura 2.8. Esse modelo é aplicável a linhas eletricamente curtas e, de modo geral, consiste em uma representação mais apropriada para solução em regime permanente.

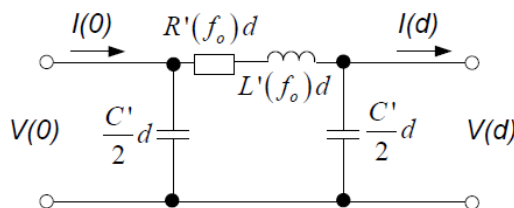


Figura 2.8 - Modelo PI Nominal (Retirado de [18]).

- $R'(f_0)$ e $L'(f_0)$:resistência e a indutância por unidade de comprimento da linha, calculadas na frequência f_0 ;
- C' : capacitância por unidade de comprimento da linha;
- d : comprimento da seção pi;

Na extensão desse modelo a parâmetros concentrados para análise de transitórios, a linha é usualmente representada por uma conexão cascata de seções pi, conforme ilustrado na Figura 2.9, cujos parâmetros R' e L' são calculados para uma frequência específica.

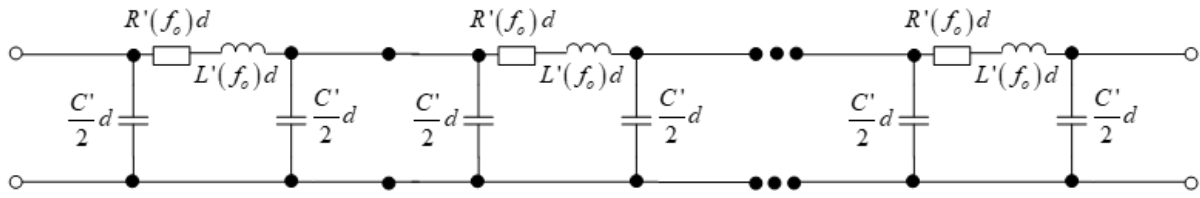


Figura 2.9 - Cascata de circuitos pi: os parâmetros da linha são calculados em uma frequência específica f_0 . Posteriormente, divide-se a linha de comprimento ' D ' em seções eletricamente curtas de comprimento ' d '; obtêm-se os parâmetros referentes a cada seção da linha multiplicando-se ' R ', ' L ' e ' C ' por ' d '. Por fim, conectam-se os vários trechos da linha em cascata (Retirado de [18]).

No caso de linhas polifásicas, o acoplamento entre os condutores da linha é considerado por meio da natureza matricial de indutância, capacitância e resistência, sem que seja necessário fazer uso da transformação para o domínio modal. Esse modelo, composto por uma cascata de seções pi, apresenta resposta em frequência com boa exatidão somente nas vizinhanças em que seus parâmetros foram calculados. Na análise de transitórios, os modelos a parâmetros concentrados fornecem resultados razoáveis apenas no caso de linhas eletricamente curtas e na avaliação de sinais que não possuam um espectro amplo de frequências, tais como as descargas atmosféricas [16], [18]. Ademais, em modelos a parâmetros concentrados não há uma propagação real dos surtos, o que implica o aparecimento errôneo de sinais de tensão e corrente instantaneamente em todos os pontos da linha.

2.2.2.2 Modelos com parâmetros distribuídos e com parâmetros constantes ou dependentes da frequência

Os modelos a parâmetros distribuídos consideram a natureza distribuída dos parâmetros da linha, o que permite naturalmente contemplar o fenômeno de propagação de ondas. Assim, um distúrbio propaga-se sujeito a atenuações e distorções até ser refletido nos terminais da linha, existindo um atraso entre tensões (e correntes) em terminais opostos. De modo geral, os modelos a parâmetros distribuídos são mais precisos para o cálculo de transitórios em linhas de transmissão, quando comparados aos modelos a parâmetros concentrados [18].

O ATP possui implementado quatro modelos de linha a parâmetros distribuídos: Bergeron, J. Marti, Semlyen e Noda [19], sendo o primeiro com parâmetros constantes e os três últimos com parâmetros dependentes da frequência. Dentre esses modelos, os de uso mais difundido são o Bergeron e J. Marti. As principais características desses dois modelos são descritas sucintamente a seguir.

O modelo Bergeron apresenta uma modelagem mais simplificada em relação aos demais modelos a parâmetros distribuídos do ATP. A variação dos parâmetros longitudinais com a frequência (devido ao efeito pelicular nos condutores aéreos e no retorno pela terra) é desprezada, sendo que a resistência e a indutância série da linha são calculadas em uma frequência única especificada pelo usuário. Adicionalmente, a natureza distribuída da resistência é considerada “artificialmente”, supondo-se resistências concentradas em três pontos distintos da linha: início, meio e fim, conforme ilustrado na Figura 2.10. Vale mencionar que a impedância de retorno pelo solo é calculada utilizando a formulação de Carson [20], na frequência especificada pelo usuário, e os parâmetros elétricos do solo (condutividade e permissividade) são supostos constantes; a admitância do solo é desprezada.

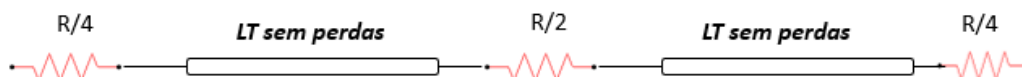


Figura 2.10 - Representação do modelo Bergeron.

No caso de uma linha n-fásica, ela é decomposta, via uma transformação de similaridade, em ‘n’ linhas monofásicas no domínio modal com parâmetros R' e L' calculados

em uma frequência específica, escolhida pelo usuário. A propagação dos modos em cada uma dessas linhas monofásicas é calculada a partir da representação destas como um par de LTs sem perdas em série com três resistores concentrados em três pontos diferentes. A matriz de transformação de similaridade é calculada em uma única frequência. As características anteriores implicam que a utilização desse modelo na simulação de fenômenos transitórios que compreendam uma vasta gama de frequências, por exemplo, descargas atmosféricas, pode resultar em erros significativos, uma vez que os parâmetros associados à propagação de ondas na linha são calculados para uma frequência única. Adicionalmente, a não consideração da natureza distribuída da resistência longitudinal também pode levar a erros [18].

Com o intuito de contornar as limitações do modelo Bergeron, sobretudo no que diz respeito à desconsideração da variação dos parâmetros com a frequência, J. Marti propôs em [17] um novo modelo que foi posteriormente implementado no ATP e se tornou, provavelmente, o modelo mais utilizado de linhas de transmissão em plataformas de simulação de transitórios no domínio do tempo. Nesse modelo, as funções dependentes da frequência, função de propagação e impedância característica, são representadas por uma soma de funções racionais e os polos e resíduos dessas funções são determinados por meio do método assintótico de Bode. Desse modo, as convoluções resultantes da consideração da variação dos parâmetros longitudinais com a frequência podem ser calculadas no domínio do tempo, recursivamente, de forma eficiente. No caso de uma linha n -fásica, ela é decomposta, via uma transformação de similaridade, em ' n ' linhas monofásicas no domínio modal e as funções de propagação e impedância característica de cada modo são ajustadas, em uma faixa de frequências especificada pelo usuário, também utilizando um modelo de polos e resíduos. A matriz de transformação modal é calculada para uma única frequência, especificada pelo usuário. A impedância de retorno pelo solo é calculada utilizando a formulação de Carson [20] e os parâmetros elétricos do solo (condutividade e permissividade) são supostos constantes; a admitância do solo é desprezada. O modelo J. Marti, dentre os disponíveis no ATP, é o mais confiável e de uso mais difundido, embora encontre dificuldades na simulação de casos em que a variação da matriz de transformação modal com a frequência não possa ser desprezada como, por exemplo, na avaliação de cabos subterrâneos e em linhas de transmissão com configuração de condutores com elevada assimetria [18], [21]. Adicionalmente, no caso de linhas de transmissão que atravessam regiões de solos com elevada resistividade, a variação dos parâmetros elétricos do solo (condutividade e

permissividade) com a frequência é significativa e pode exercer efeito na propagação de ondas através dos condutores da linha [22]-[24].

Com o intuito de contornar as limitações do modelo J. Marti , no que concerne ao cálculo da impedância de retorno pelo solo e à consideração da variação de seus parâmetros elétricos com a frequência, De Conti e Emídio propõem em [25] uma modificação no modelo original de Marti. Os autores implementam o modelo J. Marti no Matlab, o que garante certa autonomia com relação ao cálculo de parâmetros da linha, em comparação ao modelo originalmente implementado no ATP. Com essa autonomia, os autores empregam diferentes formulações para cálculo da impedância de retorno pelo solo, mais precisas do que as clássicas expressões de Carson, e, adicionalmente, consideram a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. Nessa implementação alternativa do modelo de linha J. Marti, gera-se, no Matlab, um arquivo .pch que pode ser lido automaticamente pelo ATP. Cada arquivo .pch representa um modelo de linha de transmissão que é composto pelos polos e resíduos das funções de propagação e da impedância característica, pelo tempo de trânsito da linha e pela matriz de transformação real para transformação das grandezas modais para o domínio das fases. As simulações dos transitórios e os cálculos das tensões e correntes na linha de transmissão são realizados no ATP, que lê este arquivo e o interpreta como um modelo J. Marti. Utilizando-se essa implementação alternativa, aqui chamada de “*J. Marti modificado*”, De Conti e Emídio avaliam a propagação de sinais impulsivos de tensão e corrente em configurações de linhas típicas de sistemas de distribuição. De acordo com os autores, a variação dos parâmetros elétricos do solo pode exercer influência nos sinais que se propagam em linhas sobre solos de resistividade elevada (superior a 1000 Ωm).

Ao considerar a plataforma ATP, entende-se que o modelo *J. Marti modificado* é aquele que fornece resultados com maior exatidão, desde que a configuração de linha a ser avaliada não possua assimetria acentuada de seus condutores e que não seja linha subterrânea.

2.3.3 Torres de transmissão

As torres de transmissão são elementos de grandes dimensões e construção complexa. Tais características não só contribuem para tornar sua modelagem mais laboriosa, bem como

dificulta a tarefa de medição de tensões e correntes em configurações reais para comparação de resultados obtidos através de modelagem.

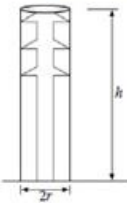
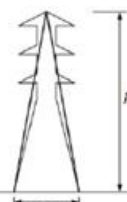
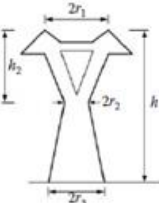
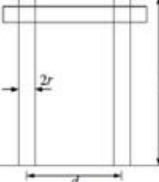
Diversos modelos têm sido empregados ao longo das últimas décadas e podem ser classificados de acordo com a aproximação utilizada: teórica ou experimental. Pode-se destacar as seguintes abordagens para a modelagem da torre de transmissão: linha de transmissão com impedância de surto constante, com impedância de surto variável, com elementos concentrados, estruturas radiantes (antenas) ou a combinação destas abordagens.

Para o caso específico da modelagem a partir de elementos concentrados, é necessário que o tempo de frente da onda de descarga incidente seja muito superior ao tempo de tráfego da onda na torre [26]. Tal consideração é feita devido ao fato dos comprimentos de onda associados às frequências dominantes no tempo de frente da descarga serem muito maiores que o comprimento da torre, tornando assim possível a aproximação das tensões e correntes ao longo de sua extensão por valores constantes e o tempo de trânsito entre suas extremidades desprezível. Observa-se também que quando o tempo de frente da onda de corrente é da mesma ordem de grandeza do tempo de tráfego da onda na torre, é prudente utilizar a modelagem de parâmetros distribuídos.

Os trabalhos clássicos baseados na teoria de parâmetros distribuídos consideram a torre modelada por uma seção única de linha de transmissão sem perdas, representando a torre por meio de formas geométricas simples (normalmente, um cilindro ou um cone ou pequenas variações dessas formas) e assumindo uma descarga vertical no topo da torre [27]. Jordan desenvolve um trabalho pioneiro em [28], em que considera a torre representada por um cilindro vertical; pela aplicação da teoria eletromagnética, obtém uma expressão para cálculo da impedância de surto da torre. Posteriormente, e também aproximando a torre por um cilindro vertical, Wagner e Hileman deduzem uma nova expressão para cálculo da impedância de surto da torre [29]. Em [30], Sargent e Darveniza propõem uma representação cônica para torre e, também com base na teoria de campo, obtém uma nova expressão para a impedância de surto. Os trabalhos mencionados assumem incidência vertical da descarga na torre. Em [31], Chisholm, Crow e Srivastava sugerem que a impedância da torre depende do modo de injeção de corrente na mesma e varia, assim, para incidência vertical e horizontal. A motivação de se investigar a incidência horizontal de corrente em torres de transmissão se deve ao fato de, segundo os autores, a maioria das incidências na linhas se dar nos cabos de blindagem no vão entre as torres, o que faz com que a onda se propague pelos cabos atingindo a torre de transmissão horizontalmente. Assim, Chisholm, Crow e Srivastava sugerem versões

modificadas das expressões anteriormente propostas para cálculo da impedância de surto de torres com formas geométricas representadas por cilindros e cones. Adicionalmente, os autores propõem uma expressão para cálculo da impedância de surto de uma torre com forma genérica. A Tabela 2.1 resume os modelos mencionados e que são de uso muito difundido em metodologias de cálculo do desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas.

*Tabela 2.1- Modelos de torre de transmissão baseados em uma única seção de linha de transmissão sem perdas
(Adaptado de [27]).*

Formato da Torre	Diagrama	Impedância de surto
Cônico		$Z = 60 \left(\ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 1 \right)$
Cilíndrico		$Z = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right)$
Cinturada		$Z = \sqrt{\frac{\pi}{4}} 60 \left(\ln \left(\cot \frac{\tan^{-1}(r/h)}{2} \right) - \ln \sqrt{2} \right)$ $r = \frac{r_1 h_2 + r_2 h_1 + r_3 h_3}{h} \quad (h = h_1 + h_2)$
Quadrada		$Z_1 = 60 \cdot \ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 60$ $Z_2 = \frac{d \cdot 60 \cdot \ln \left(2\frac{h}{r} \right) + h \cdot Z_1}{h + d}$ $Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$

Vale mencionar que a velocidade de propagação de onda ao longo da torre pode ser assumida igual à da luz; no entanto, os múltiplos caminhos ao longo das treliças da torre introduzem um atraso de tempo na propagação da onda. Consequentemente, o tempo necessário para a onda se propagar do topo até a base da torre normalmente é superior à altura da torre dividido pela velocidade da luz. Assim, de modo a se ter em conta de forma aproximada esse efeito na representação da torre, em alguns dos modelos mencionados anteriormente, a velocidade de propagação é considerada inferior à da luz.

As estilizações anteriores, que consideram a representação da torre por uma única seção de linha de transmissão, podem não ser adequadas para modelagem de estruturas mais complexas, que possuam variações mais acentuadas de geometria ao longo de sua altura (alterações, por exemplo, da distância entre as pernas das torres). Com o intuito de contornar essa limitação, há trabalhos na literatura [32]-[36] que propõem a representação da torre por um conjunto de condutores verticais, conforme ilustrado de forma esquemática na Figura 2.11. Esses trabalhos propõem expressões para cálculo das impedâncias própria de cada condutor e mútua entre eles. Considerando geometrias típicas de torres de transmissão, as

distâncias entre os condutores (D_1 , D_2 e D_3 na Figura 2.11) variam, em geral diminuindo da base até o topo da torre, o que faz com que a impedância mútua entre os condutores varie. Para se ter em conta de forma aproximada esse efeito, normalmente divide-se a torre em seções, determina-se a impedância de surto equivalente de cada seção separadamente e, finalmente, conecta-se em série as linhas com suas impedâncias associadas, conforme ilustrado também de forma esquemática na Figura 2.11.

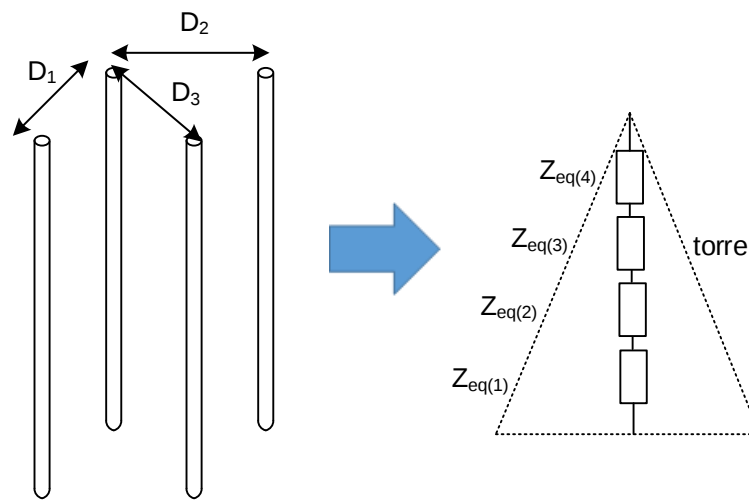


Figura 2.11- Representação da torre de transmissão por um conjunto de condutores verticais.

Dos trabalhos mencionados que propõem modelos de multicondutores verticais para representação da torre, vale destacar aqueles desenvolvidos por De Conti et al. [35], [36]. Dentre outros aspectos, um ponto relevante desses trabalhos é que os autores validam os resultados obtidos pelo modelo proposto com aqueles calculados utilizando uma abordagem baseada na teoria de campo, o *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) [37]. Em [35], o modelo proposto De Conti et al. foi empregado com sucesso no cálculo das correntes associadas à incidência de descargas atmosféricas na torre instalada na Estação do Morro do Cachimbo, que é dedicada à medição de parâmetros de descargas atmosféricas, tendo-se como referência o modelo HEM. Também, em [36] esse mesmo modelo foi utilizado no cálculo da impedância de surto de torres de linhas de transmissão para fins de avaliação de seu desempenho frente à incidência direta de descargas atmosféricas. Mostrou-se que o modelo da torre baseado em um sistema de multicondutores verticais leva a resultados em excelente concordância com aqueles obtidos com o HEM, se o tempo de frente da onda de corrente injetada (t_f) é maior que o tempo de trânsito da torre (τ). Segundo [36], tal concordância aumenta à medida que t_f cresce em relação a τ . Portanto, é razoável supor que o modelo

forneça resultados ainda mais precisos, quando aplicado na modelagem da incidência de primeiras descargas de retorno em torres, que constituem as solicitações de maior interesse na avaliação das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de linhas de alta tensão.

2.3.4 Aterramento

O aterramento é um elemento importante do sistema de transmissão a ser avaliado, a fim de mitigar a ocorrência do *backflashover* e, conseqüente, desligamentos em linhas de transmissão devido à incidência de descargas.

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 esses dois tipos de solicitação é distinto. As frequências representativas de curtos-circuitos 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 alguns MHz [38]. Essa distinção dos valores de frequência implica um efeito também distinto de fenômenos eletromagnéticos presentes no sistema de aterramento.

O ATP não possui nenhum modelo específico para aterramentos elétricos. Normalmente, em estudos de transitórios em linhas de transmissão, o aterramento de pé de torre é modelado por uma resistência concentrada com valor igual à resistência de aterramento de baixa frequência.

2.3.4.1 Impedância e resistência de aterramento

Qualquer conexão para a terra apresenta efeitos resistivo, capacitivo e indutivo. De maneira simplificada e uma abordagem com foco nos conceitos, tais efeitos podem ser representados na forma do circuito equivalente da Figura 2.12. Nesse circuito, a condutância G e a capacitância C representam os efeitos transversais do aterramento e estão associados, respectivamente, às correntes de condução e de deslocamento (ou capacitiva) que dispersam dos eletrodos para a terra circunvizinha. A resistência R e a indutância L representam os

efeitos longitudinais e estão associadas ao campo magnético (interno e externo) produzido pela corrente que circula ao longo do eletrodo.

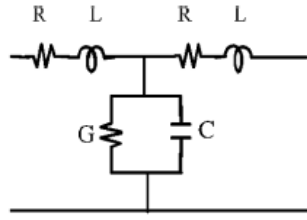


Figura 2.12- Circuito equivalente da parcela de eletrodo. Adaptado de[1].

O conhecimento do comportamento completo do aterramento requer a solução de uma série de circuitos similares ao apresentado na Figura 2.12, conectados de acordo com a geometria do aterramento, incluindo os efeitos mútuos [39]. Na análise de fenômenos de baixa frequência, os efeitos reativos podem ser desprezados e, nesse caso, a aproximação do potencial constante é válida para os eletrodos do aterramento. Assim, o circuito equivalente do sistema de aterramento fica reduzido a uma série de condutâncias acopladas, o que permite representá-lo eletromagneticamente por uma resistência de aterramento R_{LF} [39], [40], que pode ser definida como:

$$R_{LF} = \frac{V_T}{I_T} \quad (2.6)$$

em que:

- V_T : elevação de potencial do aterramento com relação ao infinito;
- I_T : corrente (de baixa frequência) injetada no aterramento.

No que concerne à representação do sistema de aterramento de linhas de transmissão em avaliações utilizando plataformas do tipo ATP/EMTP, verifica-se que, em muitos casos, utiliza-se um resistor simples com valor igual à resistência de aterramento, a fim de contemplar tanto fenômenos de alta, como de baixas frequências [41]-[43]. Todavia, principalmente na investigação de fenômenos de alta frequência, o aterramento deve ser representado por uma impedância, que apresenta forte dependência da frequência [44]. No domínio da frequência, a impedância harmônica de aterramento é expressa por:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.7)$$

em que:

- $V(\omega)$: fasor do potencial elétrico no ponto de injeção em relação ao infinito;
- $I(\omega)$: fasor da corrente injetada.

É importante salientar que, supondo um comportamento linear do aterramento, o valor de $Z(\omega)$ está atrelado à geometria do aterramento e às características eletromagnéticas do solo, mas não à onda de corrente injetada.

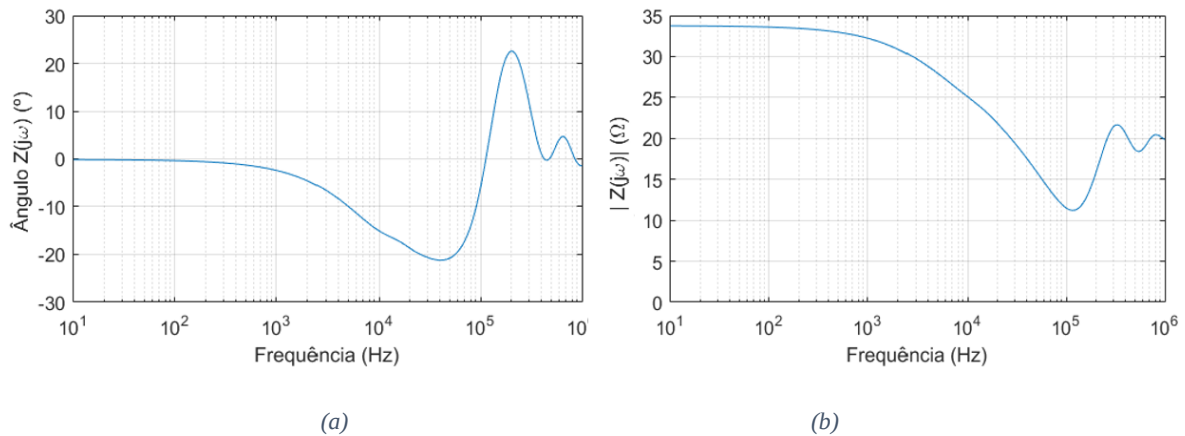


Figura 2.13 - Impedância de aterramento ao longo do espectro de frequências característico de uma descarga atmosférica. (a) módulo (b) ângulo. Esse comportamento refere-se a um aterramento típico de linhas de transmissão, enterrado em um solo de 3000 Ωm .

A Figura 2.13, que ilustra o módulo e a fase da impedância harmônica de um aterramento típico de linhas de transmissão aéreas brasileiras enterrado em um solo de 3000 Ωm , permite salientar informações importantes. Inicialmente, é possível confirmar a forte dependência da frequência do sistema de aterramento como um todo. Por outro lado, nota-se que até aproximadamente 1 kHz essa dependência da frequência é pouco relevante e o valor de impedância de aterramento pouco varia. Trata-se da faixa de frequências para a qual os efeitos capacitivo e indutivo não influenciam significativamente o 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 ratifica essa constatação.

No intuito de se obter representações compactas do aterramento e que contemplem de forma aproximada o seu comportamento impulsivo, utiliza-se o conceito de impedância impulsiva de aterramento (Z_P) [45]-[49]. A impedância impulsiva Z_P é definida no domínio do tempo, sendo dada pela relação entre os valores de pico da elevação de potencial no ponto de injeção (V_P) e da corrente injetada (I_P), ou seja:

$$Z_P = \frac{V_P}{I_P}$$

(2.8)

Segundo [48], embora a impedância impulsiva não descreva a resposta dependente da frequência do aterramento tal como a impedância harmônica, ela encerra algumas características interessantes, dentre as quais merecem destaque:

- i. Depende do sinal de corrente injetado, principalmente de seu tempo de subida; isto é, a impedância impulsiva sofre influência do conteúdo de frequência do sinal de corrente injetado;
- ii. Permite estimar o valor de pico da elevação de potencial desenvolvida no ponto de injeção de corrente (basta multiplicar a impedância impulsiva pelo valor de pico da corrente injetada);
- iii. Corresponde a um número real puro, o que facilita a sua inclusão direta em plataformas de cálculo de transitórios do tipo ATP/EMT.

Considerando esse último aspecto em especial, em [49], Visacro e Silveira mostram que a representação do aterramento de linhas de alta tensão por meio de sua impedância impulsiva leva a resultados de desempenho frente a descargas atmosféricas muito próximos àqueles que seriam obtidos considerando a representação do aterramento por sua impedância harmônica, na ausência de dispositivos para-raios [47]. Adicionalmente, os autores mostram que a qualidade dos resultados obtidos representando-se o aterramento por sua impedância impulsiva é muito superior àqueles obtidos quando se representa o aterramento por sua resistência de baixa frequência [49].

2.3.4.2 Dependência dos parâmetros do solo com a frequência

Os efeitos eletromagnéticos do solo estão intimamente ligados à permissividade elétrica ϵ , à permeabilidade magnética μ e à condutividade elétrica σ . Cada um desses parâmetros contribui de forma direta para os efeitos capacitivo, indutivo e condutivo, respectivamente. O valor da permeabilidade magnética no solo se aproxima do valor da permeabilidade magnética no vácuo μ_0 e tem seu comportamento invariável no espectro de frequências, na maior parte dos solos. Já a permissividade ϵ e a condutividade σ variam com o tipo de solo, além de apresentarem comportamento variável no espectro de frequência. De acordo com resultados experimentais, a condutividade aumenta e a permissividade diminui com o aumento da frequência [24].

De acordo com Alipio e Visacro [23], considerar o efeito da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo em simulações de transitórios em aterramentos elétricos provoca uma redução da impedância impulsiva de aterramento, em relação a hipótese de parâmetros constantes, sendo tal redução mais expressiva para solos de maior resistividade. De acordo com esses autores, desprezar esse fenômeno para solos de resistividade moderada e, sobretudo, solos de resistividade elevada pode acarretar em erros significativos na avaliação da resposta do aterramento quando submetido a correntes impulsivas.

Assim, como neste trabalho pretende-se avaliar o desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas, a modelagem do aterramento considerando a dependência dos parâmetros do solo com a frequência é de fundamental importância para obtenção de resultados consistentes.

2.3.5 Isoladores

A estimativa da taxa de desligamentos está intimamente associada à suportabilidade da cadeia de isoladores frente a um surto de tensão. O ATP não dispõe de modelos específicos para isoladores. No entanto, a plataforma possui componentes e recursos (a linguagem MODELS) que permitem implementar metodologias para avaliação da ocorrência (ou não) de ruptura do isolamento. A seguir, são descritas, de forma sucinta, algumas das principais metodologias.

A metodologia mais simples para avaliação da suportabilidade da isolação consiste da comparação do valor de pico do surto de tensão aplicado à cadeia com um valor de referência; caso o pico seja superior, assume-se que ocorre a ruptura da isolação. Normalmente, esse valor de referência está associado à chamada Tensão Crítica Disruptiva (CFO—do inglês, *Critical Flashover Overvoltage*), que corresponde ao valor de pico de uma tensão impulsiva padronizada² que tem uma probabilidade de 50% de provocar a ruptura da isolação.

O valor do CFO de um determinado isolamento é obtido por meio de métodos experimentais, sendo um dos mais comuns o *Up and Down*, que consiste na aplicação de uma série de tensões impulsivas padronizadas cujos valores de pico são incrementados ou reduzidos de acordo com a ocorrência ou não de descargas disruptivas [50]. Conhecido o CFO associado à cadeia de isoladores, pode-se assumir o seu valor como referência para determinação da ocorrência ou não de ruptura. Em alguns casos, como por exemplo na metodologia do CIGRÉ [51], adota-se como referência o chamado CFO para ondas não padronizadas (CFO_{NS}) que consiste no CFO multiplicado por um fator de correção que leva em conta a constante de decaimento da onda de sobretensão. Independentemente da referência assumida, CFO ou CFO_{NS}, essa metodologia simplificada de avaliação da ocorrência de descarga disruptiva possui limitações. A principal restrição se deve ao fato de que a suportabilidade da cadeia de isoladores de linhas de transmissão depende, dentre outros aspectos, não apenas do valor de pico da tensão, mas também de sua forma de onda e polaridade. Dessa forma, um surto de tensão cujo valor de pico exceda o valor assumido como referência pode não resultar na ruptura do isolamento. Assim, torna-se necessária a adoção de métodos mais sofisticados do que a simples comparação do valor de pico da sobretensão com um valor de referência.

Uma forma mais elaborada de se avaliar a ocorrência de ruptura da isolação consiste no uso das chamadas curvas tensão-tempo (ou curva V-T), que relacionam a tensão disruptiva e o tempo relativo à ruptura do isolamento. A Figura 2.14 ilustra curvas V-T para diferentes comprimentos de isolamento.

² A tensão impulsiva padronizada possui formato de dupla exponencial com tempo de frente de 1,2 μ s e tempo de meia onda de 50 μ s.

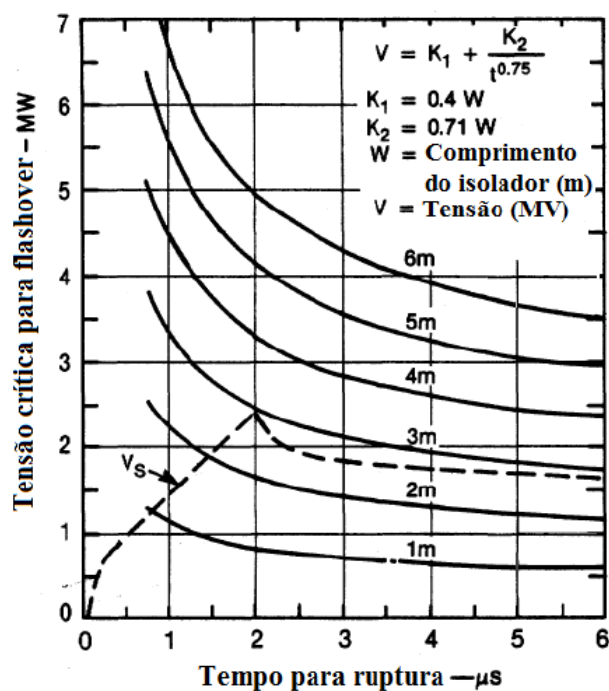


Figura 2.14 - Curvas V-T para diferentes comprimentos de isoladores típicos de linhas de transmissão e uma forma de onda de sobretensão padronizada. Retirada de [50].

Tais curvas são levantadas, experimentalmente, pela aplicação de tensões impulsivas padronizadas (dupla exponencial, 1,2/50 μs) com diferentes amplitudes. De posse da curva V-T associada a um isolamento, para determinar se ele suportará ou não um valor de sobretensão deve-se avaliar a amplitude da tensão em um dado instante de tempo. Se nesse instante o nível de tensão superar a tensão disruptiva indicada na curva V-T, ocorrerá a ruptura do isolamento. Uma forma didática de visualização dessa metodologia consiste em superpor em um mesmo gráfico a onda de sobretensão e a curva V-T associada ao isolador. Embora a utilização das curvas V-T para avaliação da ocorrência de ruptura do isolamento seja mais consistente do que a simples comparação com um valor de referência, deve-se ressaltar que elas só descrevem o desempenho de isoladores de forma adequada caso eles sejam submetidos a tensões impulsivas padronizadas [10]. Assim, caso seja interesse avaliar a resposta de um isolador quando submetido a ondas de tensão não padronizadas, por exemplo, aquelas resultantes da incidência de descargas em LTs, curvas V-T obtidas em ensaios padronizados não podem ser aplicadas diretamente.

Uma forma de contornar as limitações descritas consiste em aplicar métodos que permitam avaliar o desempenho de isoladores frente a solicitações impulsivas com características arbitrárias. Dentre esses métodos, merecem destaque o Método do Efeito Disruptivo, também chamado de Método DE, e o Método de Progressão do Líder (em inglês,

Leader Progression Model) [52]. Tendo em conta a sua maior simplicidade de formulação, sem, contudo, perda de consistência, foca-se a seguir na descrição do Método DE.

O conceito do Método DE se baseia na ideia da existência de um efeito disruptivo crítico para cada configuração de isolador. Cada surto de tensão, por sua vez, possui um efeito disruptivo associado que, caso supere o efeito disruptivo crítico, promoverá uma descarga disruptiva causando a ruptura do isolamento. A determinação do efeito disruptivo associado a um surto envolve o cálculo de uma integral que depende da onda de tensão aplicada e de constantes associadas à configuração de isoladores e que são determinadas experimentalmente. O efeito disruptivo crítico da isolação também é determinado experimentalmente e é considerado um parâmetro intrínseco à configuração ensaiada. A maior limitação referente ao Método DE é que, em geral, ele apresenta bons resultados apenas se aplicado para avaliação do desempenho de isoladores frente a sobretensões com polaridade única e/ou que não apresentem natureza oscilatória significativa. Nos casos em que a onda de tensão não apresente essas características e seja necessário avaliar rigorosamente o desempenho do isolamento, indica-se a aplicação do Método de Progressão do Líder [52].

Considerando-se o objetivo deste trabalho, que envolve a avaliação de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão, entende-se que as metodologias mais adequadas para avaliação do desempenho dos isolares são o Método DE ou Método de Progressão do Líder. Na plataforma ATP, ambos podem ser implementados utilizando a linguagem MODELS. Ainda, tais métodos podem ser implementados externamente para avaliação das sobretensões extraídas do ATP, ou seja, se essas sobretensões levam ou não à ruptura da isolação.

2.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma discussão crítica dos principais modelos empregados em plataformas do tipo ATP/EMTP para representação do sistema de transmissão com o intuito de se avaliar o seu desempenho frente a descargas atmosféricas. Foram descritos e discutidos de forma sucinta e crítica as principais modelagens utilizadas para cabos da linha de transmissão, torre, aterramento e isoladores, além das representações empregadas para a corrente de descarga atmosférica. Com base nessa discussão crítica, o Capítulo 3 apresenta um caso base e os modelos utilizados para realização de simulações na plataforma ATP. O objetivo dessas simulações é avaliar, em particular, a influência de representações mais

rigorosas para o aterramento e para a linha nas sobretensões resultantes em linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas.

Capítulo 3

Modelagens Adotadas e Caracterização do Caso Base

Considerando o fenômeno do *backflashover* em análise e com o intuito de se avaliar o impacto de se considerar a dependência dos parâmetros do solo com a frequência na modelagem da linha de transmissão e do aterramento de pé de torre em simulações no domínio do tempo, este capítulo tem como objetivo detalhar a modelagem adotada para os elementos do sistema de transmissão e para a descarga atmosférica. É apresentado o caso base, juntamente com a parametrização dos cabos, da torre de transmissão, da onda de corrente representativa da descarga atmosférica e caracterização do efeito disruptivo dos isoladores. As modelagens adotadas para a linha de transmissão e para o sistema de aterramento são apresentadas em seções específicas por se tratarem do alvo em estudo deste trabalho, bem como a modelagem empregada para caracterização da dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência.

3.1 Caso base

Com o intuito de se avaliar o impacto dos modelos adotados para representação da linha de transmissão, com foco na dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, e do aterramento de pé de torre nas sobretensões atmosféricas, considera-se neste trabalho uma LT típica de 138 kV. As seções a seguir descrevem a modelagem adotadas para os componentes do sistema de transmissão, bem como da onda de corrente de descarga atmosférica.

3.1.1 Cabos fase e de blindagem da linha de transmissão

A linha simulada, cuja silhueta típica de torre está ilustrada na Figura 3.1, possui três condutores fase do tipo CAA- LINNET, com flecha de 7 metros e um cabo de blindagem 3/8" EHS com flecha de 4 metros. Trata-se de uma linha de transmissão trifásica, circuito simples e com 500 metros de vão entre torres.

Os condutores estão localizados 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.

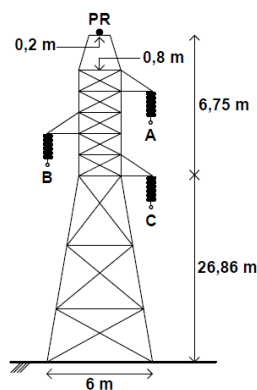


Figura 3.1- Geometria da torre de transmissão e disposição dos condutores.

3.1.2 Torre de Transmissão

A torre modelada é uma estrutura tipicamente utilizada em linhas de transmissão de 138 kV, com 33,61 metros de altura, cuja base forma um quadrado de 36 m² de área, de acordo com a Figura 3.1.

Conforme discutido no Capítulo 2, a modelagem da torre de transmissão proposta por De Conti et al.[36], baseada em um sistema de multicondutores verticais paralelos, é capaz de fornecer resultados suficientemente precisos em uma perspectiva de engenharia, tendo-se como referência um modelo eletromagnético rigoroso. Adota-se, portanto, essa representação para modelagem da torre de transmissão em questão. A torre simulada consiste em um sistema de quatro condutores verticais que são representados por quatro linhas de transmissão, sem perdas, conectadas em série para se levar em conta a variação dos efeitos mútuos desses condutores da base até o topo. A impedância de surto Z associada a cada linha é calculada a partir da fórmula de Jordan revisada [35]:

$$Z = 60 \left[\ln \frac{4h}{r} - 1 \right] \quad (3.1)$$

em que

- h : altura do condutor;
- r : raio do condutor.

A equação (3.1) é válida para um único condutor e, frequentemente, é necessário representar estruturas formadas por vários condutores, por exemplo, torres de transmissão. Dessa forma, a equação (3.1) foi estendida em [35] para avaliar a impedância de surto mútua de condutores verticais de mesma altura h . Calculando-se a tensão induzida no j -ésimo condutor causada pela corrente que circula no i -ésimo condutor vertical, obtém-se a seguinte expressão:

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{\frac{1 + d_{ij}^2}{4h^2}} \quad (3.2)$$

em que:

- Z_{ij} é a impedância de surto mútua entre os condutores i e j ;
- h é a altura do ponto mais alto do condutor em relação à superfície do solo;
- d_{ij} é a distância entre os centros dos condutores i e j para $d_{ij} \gg r_i$ e $d_{ij} \gg r_j$ em que r_i e r_j são, respectivamente o raio do condutor i e do condutor j .

Considerando um sistema de n condutores sem perdas, pode-se obter as tensões e correntes resultantes a partir da seguinte formulação:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_{12} & \cdot & \cdot & Z_{1,n} \\ Z_{2,1} & Z & \cdot & \cdot & Z_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{n,1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

em que:

- V_i e I_i são tensões e correntes no i -ésimo condutor vertical;

- Z é a impedância de surto própria de cada um dos condutores, calculada com a equação (3.1);
- $Z_{i,j}$ representa as impedâncias de surto mútuas calculadas com a equação (3.2).

Quando considera-se que os n condutores são interconectados no ponto de injeção de corrente, obtém-se, neste ponto, $V_1 = V_2 = \dots = V_n$ e $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$, em que I é a corrente total injetada. Dessa forma, é possível representar todo o sistema por uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente Z_{eq} dada por:

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \dots + Z_{1,n}}{n} \quad (3.4)$$

Na aplicação da abordagem descrita na modelagem da torre ilustrada na Figura 3.1, ela foi dividida em quatro seções, sendo a parte inferior dividida em três seções (duas de 9 m e uma de 8,86 m) e a parte superior em uma seção única (6,75 m). Como já mencionado, essa elaboração foi feita para se ter em conta a variação da impedância de surto mútua com a altura. Considerando o espaçamento médio d_{ij} entre os condutores de cada um dos segmentos da torre e as alturas $h = 9 \text{ m}; 18 \text{ m}; 26 \text{ m}$ e $33,61 \text{ m}$, as equações (4.3), (4.4) e (4.5) foram empregadas no cálculo de Z_{eq} . Em todos os cálculos adotou-se um raio de $r = 6,5 \text{ cm}$. As seguintes impedâncias foram obtidas para cada seção da torre:

- $Z_{eq1} = 289,75 \text{ } \Omega$; Comprimento: 6,75 m;
- $Z_{eq2} = 235,24 \text{ } \Omega$; Comprimento: 8,86 m;
- $Z_{eq3} = 182,20 \text{ } \Omega$; Comprimento: 9,00 m;
- $Z_{eq4} = 130,64 \text{ } \Omega$; Comprimento: 9,00 m.

As impedâncias de surto equivalentes utilizadas foram numeradas de 1 a 4 em que Z_{eq1} representa o trecho mais alto da torre de transmissão.

3.1.3 Descarga atmosférica

Conforme análise crítica apresentada no Capítulo 2, entende-se que a representação da onda de corrente de primeiras descargas medianas como uma soma de funções de Heidler proposta em [14] e expandida em [15] para representação de ondas de corrente com características genéricas, corresponde ao estado da arte do tema. Portanto, é a modelagem utilizada neste trabalho. Essa representação permite caracterizar importantes aspectos de

ondas de primeiras descargas reais, como a existência do duplo pico, a natureza côncava na frente da onda e o decaimento de sua amplitude após o segundo pico.

A parametrização das funções de Heidler para representar a primeira descarga é mostrada na Tabela 3.1. A onda resultante, mostrada novamente por questões didáticas na Figura 3.2, reproduz os principais parâmetros medianos de primeiras descargas de retorno medidas no Morro do Cachimbo [6]. Essa modelagem foi implementada no ATP utilizando o componente HEIDLER TYPE 15, com as especificações da Tabela 3.1 e algumas adaptações tendo-se em conta os parâmetros de entrada do componente.³

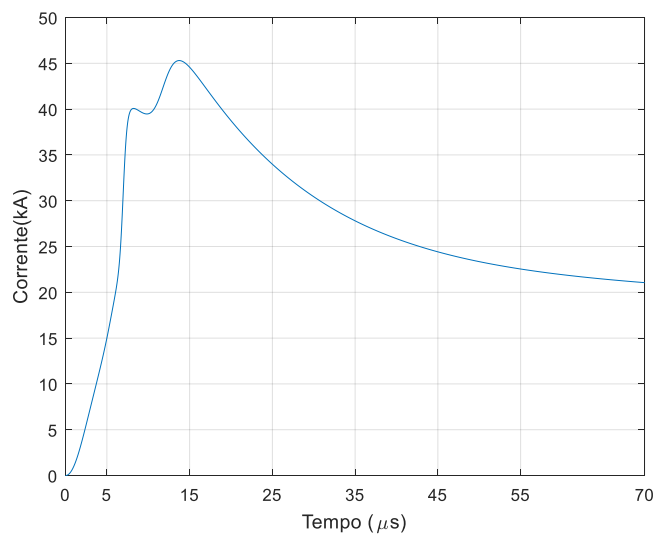


Figura 3.2 -Representação da onda de corrente mediana de primeiras descargas de retorno medidas na Estação do Morro do Cachimbo por uma soma de sete funções de Heidler obtidas no software ATP.

Tabela 3. 1- Parâmetros utilizados na modelagem da forma de onda de corrente mediana de primeiras descargas de retorno medidas na Estação do Morro do Cachimbo. Adaptado de [14].

Forma de Onda	$I_0(\text{kA})$	N	$\tau_1(\mu\text{s})$	$\tau_2(\mu\text{s})$
1	6	2	3	76
2	5	3	3,5	10
3	5	5	4,8	30
4	8	9	6	26
5	16,5	30	7	23,2
6	17	2	70	200
7	12	14	12	26

³ A entrada dos parâmetros da Tabela 3.1 via ATP deve ser feita com adaptações de acordo com a entrada de dados da plataforma.

3.1.4 Efeito disruptivo na cadeia de isoladores

O fenômeno do *backflashover* está relacionado à sobretensão resultante na cadeia de isoladores, que pode romper sua rigidez dielétrica dependendo do nível de tensão a que a cadeia fica submetida. A fim de se avaliar a ocorrência de ruptura do isolamento, utiliza-se neste trabalho o método *DE* (*Disruptive Effect*) em função de sua consistência e simplicidade [48].

Como descrito no Capítulo 2, esse método considera a existência de um efeito disruptivo crítico (DE_C) para cada configuração do isolador e um efeito disruptivo (DE) associado a cada surto de tensão. Se esse valor DE exceder o valor crítico, o surto de tensão provocará uma descarga disruptiva, causando a ruptura do isolamento. O efeito disruptivo da onda de tensão é calculado por [48]:

$$DE = \int_{t_0}^t [e(t) - V_0]^k dt \quad (3.5)$$

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 ;
- O fator k é adimensional e dependente do valor assumido para V_0 que determina o quão rápido ocorre o processo de ionização a partir da superação do valor limiar de tensão V_0 .

Para um isolador de tipicamente empregado em linhas de transmissão de 138 kV pode-se considerar as seguintes constantes [52]:

- Tensão disruptiva crítica (CFO): 650 kV;
- $k = 1,36$;
- $V_0 = 0,77\text{CFO} = 500,5 \text{ kV}$;
- $DE_C = 1,1506(\text{CFO})^k = 92,5735 \text{ kV} \cdot \mu\text{s}$

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.

3.2 Dependência dos parâmetros do solo com a frequência

O solo exerce influência na modelagem dos componentes do sistema de transmissão para simulação de sobretensões de origem atmosférica. No caso do sistema de aterramento, tal influência é direta, uma vez que os eletrodos de aterramento estão em contato direto com o solo. No caso da linha de transmissão, a influência é indireta, em particular na parcela da impedância longitudinal referente ao retorno pelo solo. Nesse contexto, para realização de simulações de sobretensões atmosféricas com elevada exatidão, torna-se imprescindível a modelagem do solo no espectro de frequências típico de descargas.

Estudos e medições laboratoriais descritos em [53], [54] e pesquisas recentes teóricas e de campo [55], [56], destacam que a permissividade ε_g e condutividade σ_g , parâmetros elétricos do solo, não possuem valores constantes e sim uma forte dependência com a frequência no espectro das descargas atmosféricas (0Hz até alguns MHz), alvo de estudo deste trabalho. O valor da permeabilidade magnética μ_0 pode ser considerado constante e igual à permeabilidade do vácuo, na quase totalidade das aplicações [54].

Recentemente, as equações (3.6) e (3.7) foram propostas para incluir o efeito dependente da frequência, nos parâmetros elétricos do solo σ_g e ε_g , baseados em um grande número de medições em campo e nas equações de Kramers-Kronig's e Maxwell [56].

$$\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\zeta \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon'_\infty + \frac{\tan\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right) \cdot 10^{-3}}{2\pi(1\text{MHz})^\zeta} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \cdot f^{\zeta-1} \quad (3.7)$$

em que:

- σ_g é a condutividade do solo em mS/m;
- $\sigma_0=1/\rho_0$ é a condutividade CC em mS/m e ρ_0 é a resistividade CC;
- ε_g é a permissividade elétrica do solo em F/m;
- ε'_∞ é a permissividade elétrica do solo em altas frequências;
- f é a frequência em Hz.

De acordo com [63], os seguintes parâmetros são recomendados para considerar uma variação média dos parâmetros σ_g e ε_g :

$$\zeta = 0,54 \cdot \varepsilon'_{\infty} \therefore \zeta = 12\varepsilon_0;$$

$$h(\sigma_0) = 1.26 \sigma_0^{0,73}.$$

em que:

- ε_0 é a permissividade no vácuo.

Vale salientar que as equações (3.6) e (3.7) apresentam resultados consistentes da variação com a frequência de σ_g e ε_g , tendo-se em conta uma ampla gama de resultados experimentais. Adicionalmente, essas equações incorporam a relação de causalidade existente entre a variação da condutividade e permissividade elétricas do solo [56].

3.3 Representações da linha de transmissão

Nas simulações deste trabalho, são comparadas duas representações de linhas de transmissão: o modelo clássico de J. Marti [17], que pode ser acessado no ATP via a rotina *Line and Cable Constants* (LCC), e o modelo proposto por De Conti e Emídio [25], aqui chamado de *J. Marti modificado*, que pode ser incluído no ATP por meio de um arquivo *.pch*.

Os principais dados de entrada do modelo de J. Marti na rotina LCC consistem, essencialmente, nas coordenadas geométricas dos condutores aéreos e suas características elétricas, bem como a resistividade do solo. Adicionalmente, deve-se informar a faixa de frequências na qual é realizado o ajuste dos parâmetros longitudinais e a frequência na qual a matriz de transformação modal é calculada. Neste trabalho adotou-se a faixa entre 0,1 Hz e 10 MHz e a matriz de transformação foi calculada em 200 kHz.

O modelo *J. Marti modificado*, como descrito no Capítulo 2, apresenta certa versatilidade no que diz respeito ao cálculo dos parâmetros da linha. Considerando um dos objetivos deste trabalho, que consiste na avaliação do impacto da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo no modelo de linha, e, adicionalmente, considerando a faixa de frequências representativa de primeiras descargas de retorno típicas, adota-se neste trabalho a formulação de Sunde para cálculo da impedância de retorno pelo solo [57]. Essa formulação é descrita pelas equações (3.8) e (3.9).

$$Z_{g \text{ ii}} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h_i\lambda}}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_g + \lambda}} d\lambda \quad (3.8)$$

$$Z_{g \ i j} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2(h_i+h_j)\lambda}}{\sqrt{\lambda^2+\gamma_g+\lambda}} \cos(r_{ij} \lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

em que:

- $\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\varepsilon_g)}$; (3.10)
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$;
- $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-8} \text{ F / m}$;
- ω é a frequência angular em rad/s;
- ε_g é a permissividade relativa do solo descrita na equação (3.6).
- σ_g é a condutividade elétrica do solo descrita na equação (3.7).
- r_{ij} é a separação horizontal entre os condutores i e j em metros;
- h_i e h_j são respectivamente as alturas dos condutores i e j em metros.

O modelo J. Marti modificado é inserido no ATP via arquivo .pch, que foi gerado a partir de uma rotina computacional cujos detalhes estão descritos em [25] e [58]. É importante mencionar que o ajuste dos parâmetros no modelo *J. Marti modificado* também foi feito na faixa de frequências entre 0.1 Hz e 10 MHz e a matriz de transformação modal calculada em 200 kHz.

3.4 Sistema de aterramento de torres de transmissão

O sistema de aterramento da torre de transmissão é composto, basicamente, pelos eletrodos de aterramento, conexão com a torre e o solo ao redor. Normalmente, a configuração de aterramento empregada consiste em eletrodos radialmente dispostos, chamados comumente de cabos contrapeso. Tal configuração é ilustrada na Figura 3.3, considerando uma torre de transmissão autoportante.

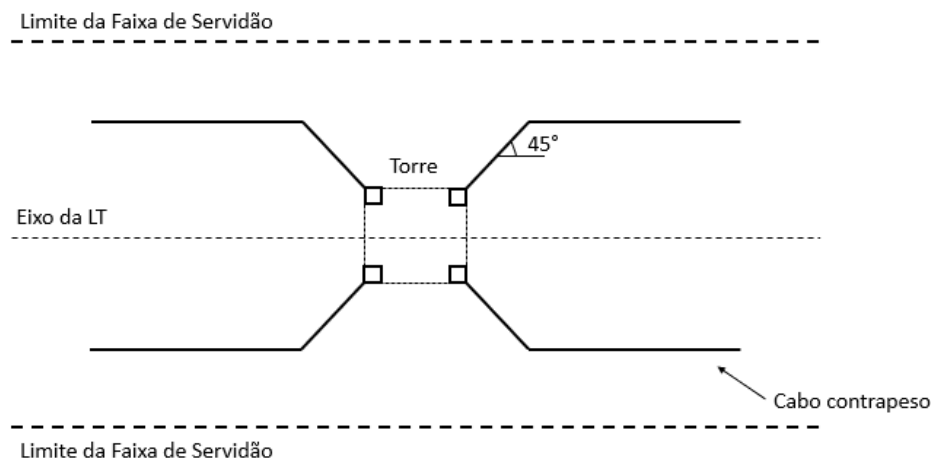


Figura 3.3 - Configuração do aterramento de torres de transmissão autoportantes.

O efeito de ionização do solo no sistema de aterramento de pé de torre é pouco expressivo devido à utilização de longos cabos contrapesos em sua concepção. Assim, no que concerne à avaliação do comportamento do sistema de aterramento neste trabalho, tais efeitos são desprezados sem prejuízo de consistência nos resultados apresentados [59].

3.4.1 Representações do sistema de aterramento em simulações no domínio do tempo

Como já discutido, o *software* ATP não dispõe de uma modelagem específica que contemple as características dependentes da frequência de um sistema de aterramento. Dessa forma, no que concerne aos estudos de transitórios em linhas de transmissão, a modelagem do aterramento é feita normalmente por uma resistência concentrada igual ao valor da resistência de aterramento em baixa frequência. Considerando os efeitos reativos e de propagação, que se tornam importantes no aterramento quando submetido a solicitações transitórias de alta frequência, são consideradas outras duas outras representações mais consistentes para simulações desses fenômenos: a impedância harmônica e a impedância impulsiva de aterramento.

A impedância harmônica representa com rigor o comportamento dependente da frequência do aterramento. Inclusive, da impedância harmônica podem ser obtidas as outras duas representações mais simplificadas, quais sejam a impedância impulsiva e a resistência em baixas frequências. Neste trabalho, a fim de levantar de forma rigorosa o comportamento dependente da

frequência dos aterramentos avaliados, é empregado o Modelo Eletromagnético Híbrido – HEM (do inglês, *Hybrid Electromagnetic Model*) [37].

3.4.1.1 Modelo Eletromagnético Híbrido

O sistema de aterramento de linhas de transmissão corresponde normalmente a eletrodos enterrados horizontalmente no solo, chamados de cabos contrapeso, eventualmente com a presença de hastes de aterramento. Esses eletrodos e hastes podem ser representados do ponto de vista eletromagnético como condutores cilíndricos. Considerando-se essa representação, o efeito eletromagnético de cada condutor cilíndrico enterrado no solo pode ser obtido a partir da superposição dos efeitos transversais e longitudinais da corrente injetada no aterramento. Segundo essa abordagem, o sistema de aterramento é particionado em uma série de elementos, sendo que cada um é considerado fonte de uma densidade de corrente transversal I_T/L (em que L é o comprimento do segmento) que dispersa do eletrodo em direção ao solo e de uma corrente longitudinal I_L que circula ao longo do eletrodo, conforme ilustra a Figura 3.4. Essas duas fontes de corrente permitem contemplar as condições físicas impostas pelas equações de Maxwell.

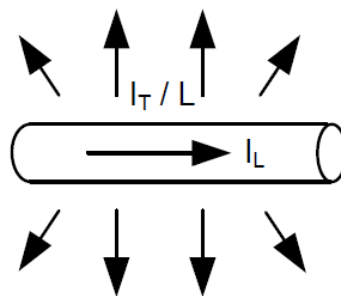


Figura 3. 4 - Fontes de corrente associadas a cada elemento do sistema de aterramento.

A fonte de corrente transversal, devido ao fato de possuir natureza divergente, apresenta efeito elétrico, mas não magnético. A cada fonte de corrente transversal está associado um campo elétrico de natureza conservativa. Esse campo gera elevação de potencial em relação ao infinito em pontos genéricos no meio em que o elemento se encontra imerso, inclusive nos demais elementos em que o aterramento foi particionado. A fonte de corrente longitudinal, devido ao fato de possuir natureza solenoidal, apresenta efeito eletromagnético. A cada fonte de corrente longitudinal está associado um campo magnético que, por sua vez,

gera um campo elétrico de natureza não-conservativa. O efeito desse campo elétrico de natureza solenoidal se traduz na força eletromotriz induzida em outros elementos e nele próprio.

A representação dos efeitos eletromagnéticos de eletrodos de aterramento por meio dessas duas fontes de corrente foi originalmente proposta por Visacro e Portela [60], [61]. Posteriormente, essa representação foi expandida por Visacro, Soares Jr. e Schroeder [62], [7], [63] para análise de incidência de descargas atmosféricas em condutores aéreos, tais como linhas de transmissão e torres instrumentadas. Esses desenvolvimentos foram compilados no chamado Modelo Eletromagnético Híbrido (HEM, do inglês *Hybrid Electromagnetic Model*), cujos detalhes são apresentados em [37]. Apresenta-se a seguir, de forma sucinta, os aspectos gerais do HEM, que é o modelo utilizado nesta dissertação para modelagem do aterramento de pé de torre, com base em uma implementação computacional cujos detalhes estão apresentados em [44] e [64]. Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser consultada em [61], [7], [37] e [44]. Adicionalmente, é importante mencionar que a utilização do HEM para simulação de aterramentos elétricos foi extensivamente validada com base em resultados experimentais para diferentes arranjos de eletrodos: eletrodos horizontais [65], hastes [66], malhas [67] e turbinas eólicas [68].

Na implementação do HEM utilizada neste trabalho, o Método dos Momentos é aplicado [69] e o sistema de aterramento é discretizado em N elementos e dois sistemas matriciais são estabelecidos:

- i) $\mathbf{V} = \mathbf{Z}_T \mathbf{I}_T$;
- ii) $\Delta \mathbf{V} = \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_L$.

O primeiro relaciona o vetor $\mathbf{V}$ dos potenciais médios em cada elemento e o vetor $\mathbf{I}_T$ das correntes que dispersam de cada um, por meio da matriz $\mathbf{Z}_T$ de impedâncias transversais, que quantifica os acoplamentos condutivo e capacitivo entre os N elementos. O segundo relaciona o vetor $\Delta \mathbf{V}$ das quedas de tensão em cada elemento e o vetor $\mathbf{I}_L$ das correntes ao longo de cada um, por meio da matriz $\mathbf{Z}_L$ de impedâncias longitudinais, que quantifica o acoplamento indutivo entre os N elementos. No cálculo dos elementos das matrizes $\mathbf{Z}_T$ e $\mathbf{Z}_L$, o efeito da interface solo-ar é levado em consideração pelo método das imagens complexas [62]. O estabelecimento de relações entre $\mathbf{V}$ e $\Delta \mathbf{V}$ com os potenciais nodais $\mathbf{V}_N$ e entre $\mathbf{I}_T$ e $\mathbf{I}_L$ com as correntes injetadas nos nós $\mathbf{I}_N$ permite acoplar os dois sistemas de equações anteriormente descritos em um único da forma:

$$\mathbf{Y}_g \mathbf{V}_N = \mathbf{I}_N \quad (3.11)$$

em que:

- $\mathbf{Y}_g$ é chamada matriz de admitância do aterramento sendo determinada a partir de $\mathbf{Z}_T$ e $\mathbf{Z}_L$;
- $\mathbf{V}_N$ é o vetor de potenciais nodais (em relação ao terra remoto) e $\mathbf{I}_N$ é o vetor de correntes injetadas nos nós.

A equação matricial (3.11) estabelece relações entre fasores de corrente e potencial nodais, para uma frequência específica. A determinação da resposta em frequência do aterramento é obtida solucionando-se o sistema (3.11) ao longo do espectro de interesse.

3.4.1.2 Impedância harmônica

A impedância harmônica $Z(\omega)$ é a representação rigorosa do comportamento dependente da frequência de um sistema de aterramento, para faixa de frequência de interesse. Conforme definição apresentada no Capítulo 2, ela é a razão entre os fasores da elevação de potencial no ponto de injeção e da corrente injetada. No caso de linhas de transmissão aéreas, e considerando torres autoportantes, há quatro pontos de injeção de corrente no sistema de aterramento. Assumindo-se simetria, pode-se afirmar que a corrente que desce pela torre se divide igualmente entre os quatro cabos contrapeso. Adicionalmente, tendo-se em conta a própria simetria geométrica do sistema de aterramento, a impedância harmônica vista de cada ponto de injeção é igual. Sob essas hipóteses, a impedância harmônica do aterramento de pé de torre corresponde à impedância harmônica vista por um cabo contrapeso, na presença dos demais, dividida por quatro.

A Figura 3.5 ilustra o comportamento dependente da frequência para um sistema de aterramento típico de torres de transmissão autoportantes, constituído por quatro cabos contrapeso de 80 m enterrados em um solo de 5000 Ωm . Esse comportamento foi obtido pela aplicação do modelo HEM e considerando a variação dos parâmetros elétrico do solo com a frequência de acordo com o modelo causal proposto por Alípio e Visacro. A partir da curva ilustrada na Figura 3.5, é possível constatar o comportamento fortemente dependente da frequência do sistema de aterramento. Apenas até cerca de 1 kHz tal dependência não é significativa e a impedância pode ser aproximada pela resistência de aterramento de baixa frequência.

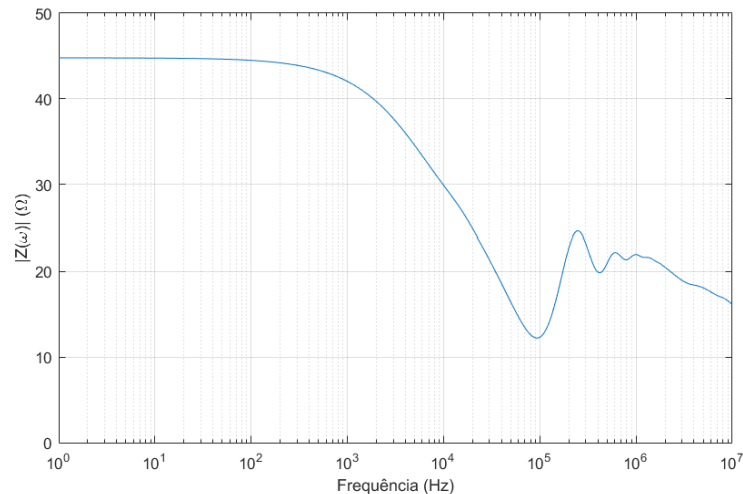


Figura 3.5- Comportamento da Impedância harmônica para um sistema de aterramento típico: quatro cabos contrapesos com raio de 7 mm e 80 m de comprimento enterrados em 0,5 m de profundidade em um solo com resistividade de 5000 Ω m.

Para os mais diversos tipos de solicitações no espectro de frequência, esse modelo representa rigorosamente o sistema de aterramento, desde de que se escolha a faixa de frequência apropriada e que os efeitos não-lineares possam ser desprezados. Desse modo, a utilização da impedância harmônica como modelagem do aterramento é apropriada para avaliações que contemplem solicitações atmosféricas, visto que esse fenômeno abrange um amplo espectro de frequência.

Uma forma de incluir o comportamento dependente da frequência do aterramento no ATP é por meio de circuitos elétricos equivalentes, compostos por elementos lineares de circuitos. De posse do comportamento dependente da frequência do aterramento (Figura 3.5, por exemplo), a obtenção desse circuito equivalente passa por dois passos principais. Primeiramente, obtém-se um modelo de polos e resíduos para a “admitância de aterramento”, que corresponde ao inverso da impedância harmônica. 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). Esse circuito equivalente traduz o comportamento dependente da frequência do elemento em questão e pode ser incluído no ATP por meio do componente “LIBRARY” em “USER ESPECIFIED”.

Para obtenção de um modelo de polos e resíduos para o aterramento, utiliza-se neste trabalho a técnica de ajuste vetorial (*Vector Fitting*) [70], sendo a passividade do modelo garantida por perturbação dos parâmetros do modelo, conforme proposto em [71]. O algoritmo do *Vector Fitting* implementado em MATLAB® é de domínio público e está disponível em [72]. Em todos os casos deste trabalho essa rotina foi empregada para ajustar a

admitância de aterramento na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz. Adicionalmente, utiliza-se a rotina *netgen.m* descrita em [73] e também disponibilizada em [72], que converte o modelo de polos e resíduos gerado pela técnica de ajuste vetorial em um circuito elétrico equivalente. Esse circuito é gravado em um arquivo de texto que pode ser facilmente incorporado ao ATP.

É importante frisar que o procedimento de determinação da impedância harmônica com exatidão aceitável e inclusão no ATP é complexa, pois essa plataforma não possui modelos de aterramento que representem sua característica dependente da frequência. A determinação rigorosa do comportamento dependente da frequência do aterramento demanda a aplicação de metodologias complexas baseadas na teoria de campo, por exemplo, o modelo HEM. Nesse contexto, sua implementação complexa torna-se um limitador para que ela seja utilizada amplamente nos estudos envolvendo sistemas de aterramento e descargas atmosféricas. Nesse cenário, representações do sistema de aterramento menos complexas, como a resistência de aterramento em baixa frequência e a impedância impulsiva, são alternativamente adotadas e descritas a seguir.

3.4.1.3 Resistência de aterramento

Como mencionado, a modelagem do sistema de aterramento por sua resistência de aterramento R_{LF} é feita utilizando-se um resistor com valor igual a R_{LF} . Ao utilizar essa modelagem, o efeito condutivo do solo é incluído, porém, os efeitos capacitivos e indutivos do sistema, bem como os efeitos de propagação, são desprezados o que caracteriza uma desvantagem dessa implementação quando deseja-se avaliar fenômenos de alta frequências em que esses efeitos são pronunciados e relevantes. A principal vantagem dessa representação consiste em sua simplicidade e facilidade de obtenção. É possível obter R_{LF} por medições locais ou por meio de cálculos matemáticos empregando pacotes computacionais comerciais.

Neste trabalho, a resistência de aterramento é determinada como a impedância harmônica no limite inferior de frequência ou pela razão entre os valores instantâneos ao longo da cauda da elevação de potencial no aterramento e da onda corrente injetada, onde estão presentes os componentes de baixa frequência das ondas, conforme ilustrado na Figura 3.6.

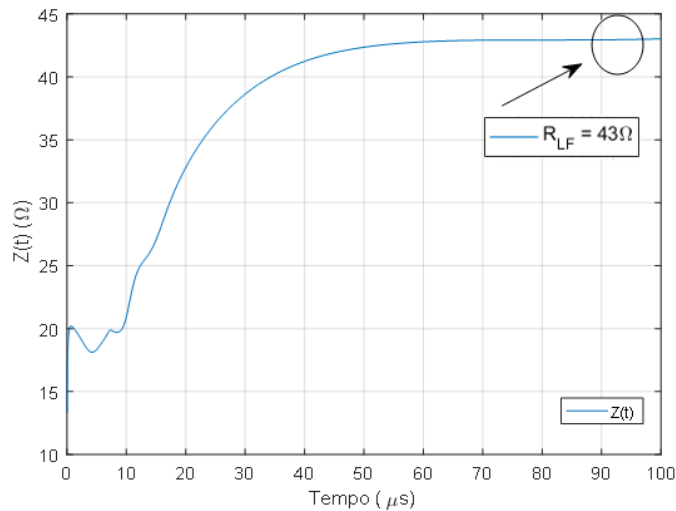


Figura 3.6 - Impedância transitória de aterramento $z(t) = v(t)/i(t)$, considerando a injeção da corrente ilustrada na Figura 3.2 no aterramento cuja impedância harmônica está ilustrada na Figura 3.3, e a determinação da resistência de aterramento em baixa frequência (R_{LF}).

3.4.1.4 Impedância impulsiva

No Capítulo 2, a impedância impulsiva foi definida como a razão entre a máxima elevação de potencial do aterramento e o valor de pico da onda de corrente injetada. Com o objetivo de aclarar esse conceito, a Figura 3.7 ilustra a elevação de potencial desenvolvida no aterramento em questão (quatro contrapesos de 80 m cada em um solo de 5000 Ωm), considerando a injeção da onda de corrente ilustrada na Figura 3.2. Dos resultados obtém-se $Z_p \cong 28 \Omega$, que é inferior ao valor da resistência de aterramento determinado anteriormente ($R_{LF} \cong 43 \Omega$). O valor de Z_p é inferior ao de R_{LF} em decorrência da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo. Ainda, é importante salientar que os picos de tensão e corrente não ocorrem necessariamente no mesmo instante de tempo.

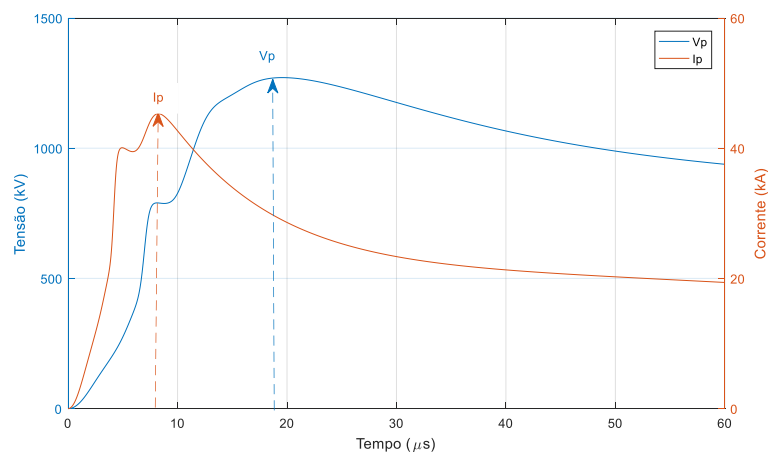


Figura 3.7- Onda de corrente e tensão resultante no ponto de injeção do sistema de aterramento.

A respeito da perspectiva computacional, é possível obter uma representação compacta do comportamento impulsivo do aterramento por um resistor linear com valor igual à impedância impulsiva. Ao comparar essa representação com a utilização da impedância harmônica, é possível constatar que essa última possui uma representatividade bem mais ampla e rigorosa do sistema de aterramento, apesar de sua implementação ser mais complexa. Por outro lado, como discutido no Capítulo 2, a impedância impulsiva considera, de maneira aproximada, alguns dos principais efeitos eletromagnéticos presentes no sistema de aterramento, e importantes quando solicitado por correntes impulsivas, diferentemente da resistência de aterramento em baixas frequências. De fato, em [49] Visacro & Silveira mostram que a representação do aterramento de linhas de alta tensão por meio de sua impedância impulsiva leva a resultados de desempenho frente a descargas muito próximos àqueles que seriam obtidos considerando-se a representação do aterramento por sua impedância harmônica.

Tendo-se em conta esses comentários, a utilização da impedância impulsiva torna-se bastante atrativa por reunir simplicidade de implementação e assertividade na avaliação de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão. Todavia, é importante destacar que diferentemente da impedância harmônica, a impedância impulsiva não representa unicamente a resposta do aterramento, mas varia de acordo com as características da onda de corrente injetada. Dessa forma, ao se determinar a impedância impulsiva para um determinado tipo de onda de corrente, não necessariamente ela irá representar o mesmo sistema para outros tipos de solicitações impulsivas.

3.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou o caso base que será utilizado para as avaliações deste trabalho, juntamente com os modelos adotados para cada componente envolvido para realização de simulações na plataforma ATP. Ênfase foi dada à variação dos parâmetros elétricos do solo, aos modelos de linha e aos modelos de aterramento. Considerando essa caso base, e os modelos descritos, no Capítulo 4 são apresentadas simulações diversas de transitórios de origem atmosférica com o intuito de se investigar a influência dos modelos empregados para representação do aterramento e da linha de transmissão no cálculo das sobretensões.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar as simulações de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão no ATP, considerando as modelagens descritas no Capítulo 3, sobretudo da linha de transmissão e do sistema de aterramento, a fim de se investigar os erros associados ao se considerar os parâmetros do solo constantes.

Inicialmente, é avaliada a sobretensão resultante na cadeia de isoladores para a incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre, considerando as três representações do sistema de aterramento tratadas nos capítulos anteriores: resistência de aterramento em baixas frequências, impedância impulsiva e impedância harmônica.

Posteriormente, avalia-se as consequências de não se considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência na modelagem da linha de transmissão. Com o intuito de elucidar os aspectos básicos relativos à consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência na modelagem da linha, é analisada a propagação de ondas de tensão considerando um único vão da linha. Em seguida, avalia-se o impacto dessa modelagem no cálculo de sobretensões na cadeia de isoladores, assumindo-se incidências no topo da torre e no meio do vão.

4.1 Influência da representação do sistema de aterramento no cálculo das sobretensões atmosféricas

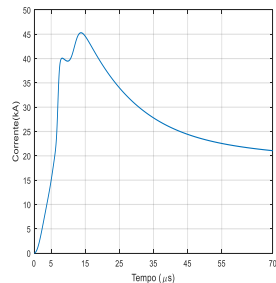
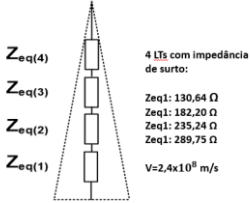
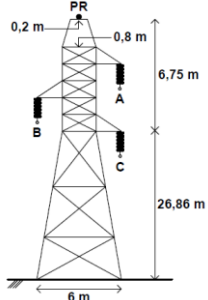
O sistema de aterramento tem influência direta nas sobretensões atmosféricas resultantes na cadeia de isoladores. Conforme já discutido, seu comportamento possui forte dependência com a frequência ao longo do espectro típico de descargas atmosféricas.

São consideradas três representações do sistema de aterramento para linhas de transmissão e são avaliadas as sobretensões na cadeia de isoladores em cada um dos casos, bem como o efeito disruptivo associado.

4.1.1 Parametrização das simulações

A fim de se avaliar o impacto das representações do aterramento de linhas de transmissão para fenômenos atmosféricos, as simulações foram conduzidas considerando o caso base descrito no Capítulo 3. Uma síntese da parametrização, considerando os modelos da onda de corrente, da linha e da torre de transmissão, é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Parametrizações da onda de corrente, torre e linha de transmissão adotadas nas simulações.

Modelo	Descrição	Elemento no ATP	Representação
ONDA DE CORRENTE	Onda de corrente proposta em [14]. As primeiras descargas de retorno possuem amplitudes bem mais significativas (em relação às descargas subsequentes) o que pode representar uma sobretensão resultante mais elevada na cadeia de isoladores, alvo de estudo deste trabalho. A onda de corrente contempla os principais parâmetros medianos de primeiras descargas medidas no Morro do Cachimbo.		
TORRE DE TRANSMISSÃO	Modelo proposto por [31], consiste em um sistema de quatro condutores verticais que são representadas por quatro linhas de transmissão, sem perdas, conectadas em série para se levar em conta a variação dos efeitos mútuos entre condutores da base até o topo.		
LINHAS DE TRANSMISSÃO	Linha de transmissão trifásica, circuito simples. -Vão: 500 m; -Cabo fase: CAA-LINNET; -Flecha : 7 m; -Cabo de blindagem: 3/8" EHS; -Flecha: 4 m; -Modelo de linha do ATP: Jmarti modificado.		

É importante salientar que, para a representação da onda de corrente, além das considerações mencionadas na Tabela 4.1, adicionou-se uma resistência concentrada em paralelo com a fonte de corrente, de 1500 Ω , destinada a representar a impedância equivalente do canal de descarga [74]. Em todos os casos analisados nesta seção, considera-se a descarga atmosférica incidindo no topo da torre.

Para o sistema de aterramento, foram consideradas as três representações abordadas no Capítulo 3: resistência de aterramento, impedância impulsiva e impedância harmônica. Após a definição da onda de corrente injetada, calcula-se a impedância impulsiva Z_P e a resistência de aterramento R_{LF} , conforme elucidado anteriormente, para cada resistividade do solo adotada nas simulações. A Tabela 4.2 apresenta os valores calculados, juntamente com os comprimentos L de cabos contrapeso empregados no aterramento de pé de torre, que correspondem a comprimentos tipicamente adotados pelas concessionárias de transmissão [75].

Tabela 4. 2 - Parametrização do sistema de aterramento adotados nas simulações.

Resistividade do solo ($\Omega.m$)	300	500	1.000	3.000	5.000	10.000
R_{LF} (Ω)	7,83	9,56	15,43	32,55	42,54	58,3
Z_P (Ω)	6,82	8,07	12,35	23,56	28,06	31,28
L (m)	20,00	30,00	40,00	60,00	80,00	130,00

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 nas simulações.

Na Figura 4.1, a título de demonstração, é apresentado um dos circuitos simulados do ATP. Nessa simulação é avaliada a tensão na fase C (fase mais baixa da linha de transmissão), que usualmente apresenta as maiores amplitudes de sobretensão na cadeia de isoladores [76]. Adicionalmente, este exemplo ilustra a representação pela impedância harmônica do sistema de aterramento.

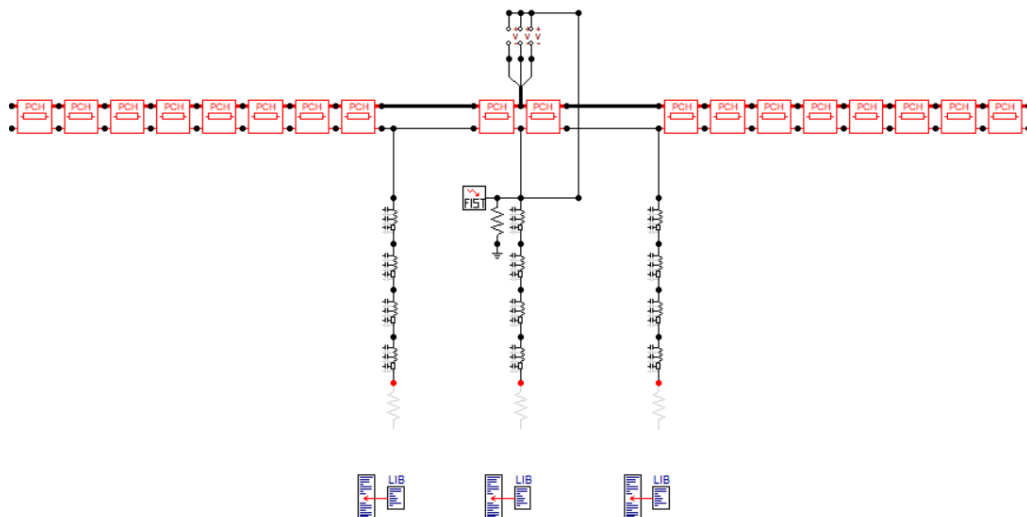


Figura 4.1 - Circuito de simulação da incidência de descarga atmosférica em linha de transmissão para avaliação de sobretensões nos terminais de isoladores.

Nas simulações apresentadas, um par de torres adjacentes é representado com o intuito de se considerar os efeitos de propagação das ondas de sobretensão nos condutores da linha,

além da reflexão em vãos adjacentes [76]. A partir das torres de transmissão adjacentes, são inseridos trechos de linhas suficientemente longos para que as reflexões das ondas de corrente e tensão nas extremidades da linha não alcancem a torre atingida e não impactem nos resultados e análises levantados, considerando o intervalo de tempo de simulação.

4.1.2 Sobretensões na cadeia de isoladores para resistividades típicas

Para as resistividades típicas mencionadas na Tabela 4.2, avalia-se a influência da representação do aterramento nas sobretensões resultantes na cadeia de isoladores da fase C (fase mais baixa da linha), onde geralmente os efeitos são mais severos se comparados com as fases mais altas [76]. Nos gráficos apresentados nesta seção, R_{LF} , Z_P e $Z(\omega)$ correspondem às sobretensões calculadas, respectivamente, para a representação do aterramento por meio de sua resistência de aterramento em baixas frequências, de sua impedância impulsiva e de sua impedância harmônica. As sobretensões calculadas estão apresentadas nas Figuras 4.2 a 4.4, separadamente para solos de resistividades baixa, moderada e/ou elevada e muito elevada.

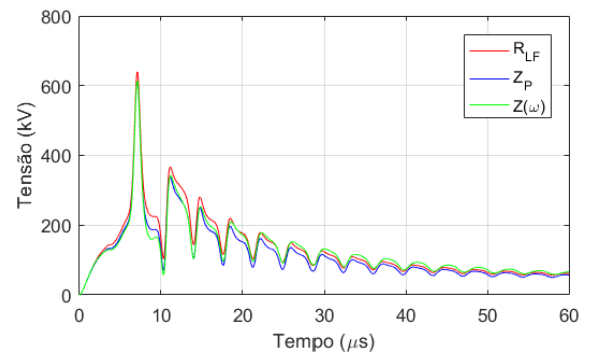
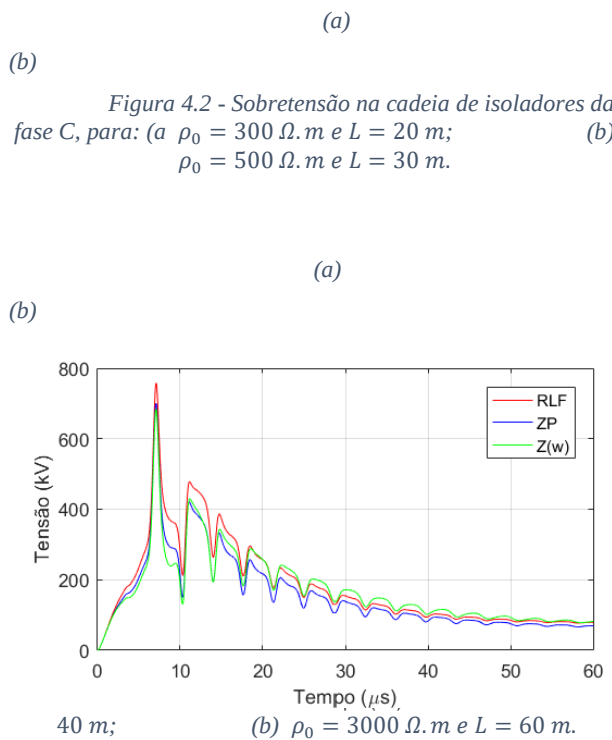
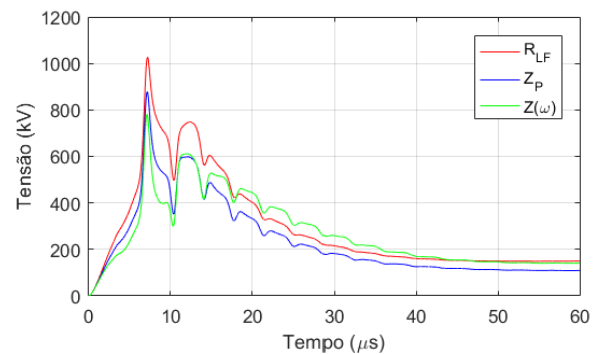


Figura 4.3 - Sobretensão na cadeia de isoladores da fase C, para: (a) $\rho_0 = 1000 \Omega.m$ e $L =$



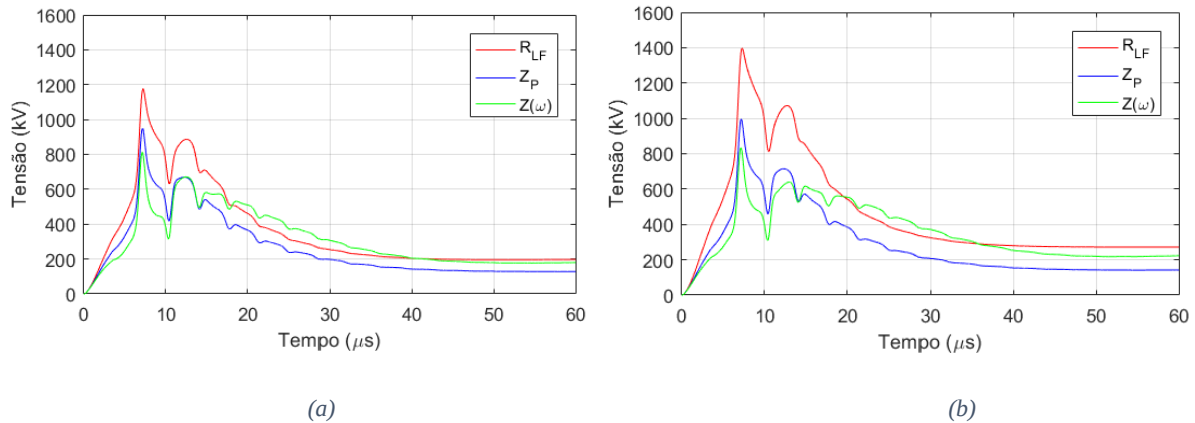


Figura 4.4 - Sobretensão na cadeia de isoladores da fase C, para: (a) $\rho_0 = 5000 \Omega.m$ e $L = 80 m$;
(b) $\rho_0 = 10000 \Omega.m$ e $L = 130 m$.

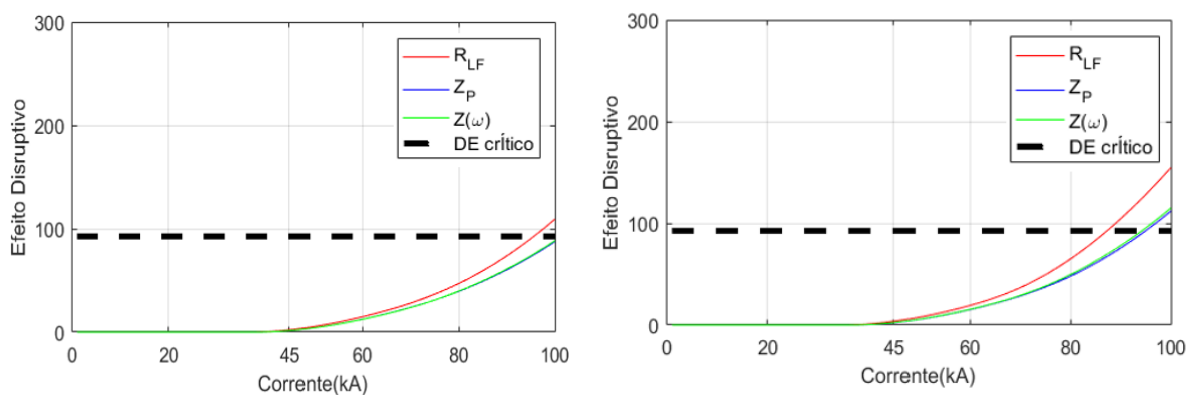
De acordo com os resultados, ao longo da frente da onda de tensão, a representação do aterramento por sua resistência de baixa frequência leva, de modo geral, a amplitudes superiores às determinadas nas outras duas representações. As diferenças entre as amplitudes calculadas considerando a resistência de aterramento e as outras duas representações se acentuam com o aumento da resistividade do solo. Por outro lado, a representação do aterramento por sua impedância impulsiva leva a um comportamento das ondas de tensão, ao longo de suas frentes, muito próximo daquele determinado considerando-se a impedância harmônica. De fato, para solos de até $1000 \Omega m$, as ondas de tensão determinadas para Z_P e $Z(\omega)$ são praticamente coincidentes. Para solos de maior resistividade, as amplitudes calculadas considerando-se Z_P são ligeiramente superiores àquelas determinadas considerando-se a representação do aterramento por sua impedância harmônica. Contudo, as diferenças são muito menos significativas, se comparadas às diferenças observadas quando se considera o aterramento representado por sua resistência de baixa frequência.

Ao longo da cauda da onda, os resultados determinados considerando-se a impedância harmônica tendem para aqueles calculados considerando-se R_{LF} . Isso é esperado, uma vez que à cauda da onda estão associados os componentes de baixa frequência e, nessa faixa, a impedância harmônica tende para R_{LF} . Por outro lado, os valores de tensão ao longo da cauda calculados para representação do aterramento via Z_P são inferiores. Isso decorre do fato de Z_P ser menor do que R_{LF} , em consequência do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo.

4.1.3 Efeito disruptivo associado

As sobretensões impactam diretamente o desempenho das linhas de transmissão, uma vez que podem provocar a ruptura da rigidez dielétrica dos isoladores do sistema. Portanto, é necessário um critério de avaliação do potencial de ruptura do isolamento de uma linha em virtude da onda de tensão aplicada em seus isoladores. Conforme mencionado no Capítulo 3, o Método *DE* permite esta avaliação. Como já mencionado, as fases inferiores da linha são expostas a condições mais severas de sobretensão [76], 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 da linha de transmissão. A exemplo dos gráficos apresentados no item anterior, os efeitos disruptivos são levantados para as três representações do sistema de aterramento abordadas no trabalho: resistência de aterramento em baixas frequências, impedância impulsiva e impedância harmônica. Adicionalmente, a amplitude da descarga é variada de 1 kA a 100 kA, em passos de 1 kA⁴.

Nos gráficos a seguir, a linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico (*DE* crítico) dos isoladores considerados. Analogamente aos gráficos anteriores, R_{LF} , Z_p e $Z(\omega)$ correspondem aos efeitos disruptivos associados, respectivamente, à representação do aterramento por meio de sua resistência de aterramento em baixas frequências, de sua impedância impulsiva e de sua impedância harmônica. Os resultados estão apresentados nas Figuras 4.5 a 4.7, separadamente para solos de resistividades baixa, moderada e/ou elevada e muito elevada.



⁴ No tocante às variações na amplitude, a forma de onda da descarga permanece a mesma, mantendo os parâmetros de tempos de frente e de meia onda da onda de corrente, conforme os valores medianos das correntes medidas na estação Morro do Cachimbo e desprezando as correntes de natureza estatística entre o valor de pico e o de tempo de frente para as primeiras descargas de retorno [4].

(a) (b)
 Figura 4.5 - Efeito disruptivo na fase C (fase mais baixa) da torre de transmissão.
 (a) $\rho_0 = 300 \Omega.m$ e $L = 20 m$; (b) $\rho_0 = 500 \Omega.m$ e $L = 30 m$.

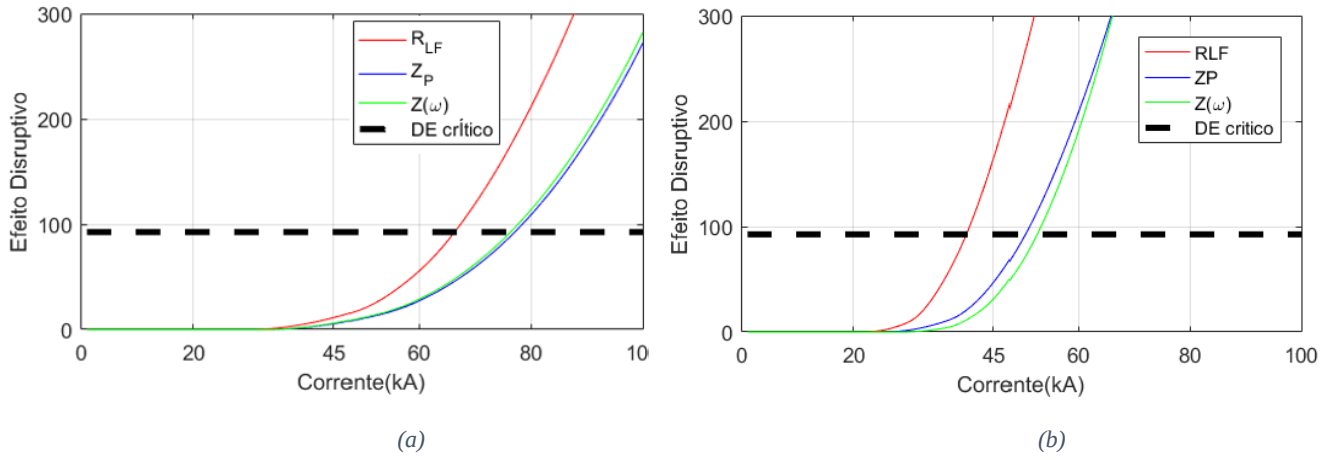


Figura 4.6 - Efeito disruptivo na fase C (fase mais baixa) da torre de transmissão.
 (a) $\rho_0 = 1000 \Omega.m$ e $L = 40 m$; (b) $\rho_0 = 3000 \Omega.m$ e $L = 60 m$.

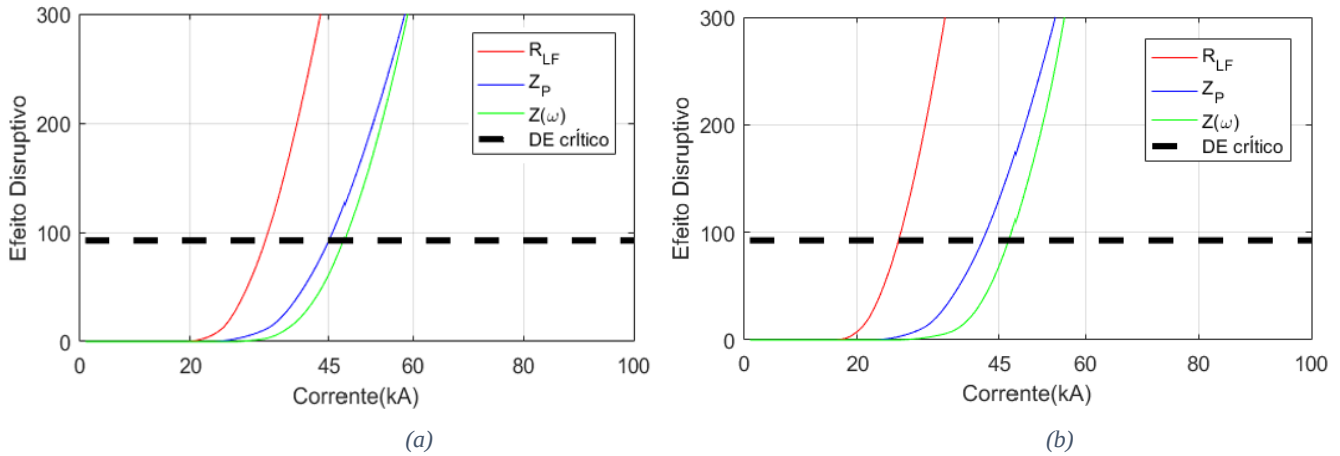


Figura 4.7 - Efeito disruptivo na fase C (fase mais baixa) da torre de transmissão
 (a) $\rho_0 = 5000 \Omega.m$ e $L = 80 m$; (b) $\rho_0 = 10000 \Omega.m$ e $L = 130 m$.

O método DE é uma ferramenta que permite a análise consistente do efeito disruptivo para casos em que a sobretensão resultante não apresente carácter oscilatório principalmente em torno da tensão limiar de ruptura do isolamento V_0 . A fim de validar a utilização do método, foram calculados os instantes de tempo em que houve a ruptura do isolamento, para cada caso analisado. Dessa forma, observou-se que, para todos os casos analisados, em que houve ruptura do isolamento, o efeito disruptivo ocorreu para o primeiro pico excursionado acima do valor da tensão limiar V_0 .

De acordo com os resultados, as curvas de efeito disruptivo em função da amplitude da corrente determinada considerando a representação do aterramento por $Z(\omega)$ e Z_P são

basicamente coincidentes para solos de até 1000 Ωm e muito próximas para solos de resistividade mais elevada. Em contrapartida, as curvas obtidas considerando a representação via R_{LF} diferem daquelas calculadas com as outras representações, sendo que as diferenças se acentuam com o aumento da resistividade. Desses resultados, assumindo-se como referência as curvas calculadas por meio do aterramento representado por sua impedância harmônica, pode-se inferir que a representação do aterramento de forma simplificada por sua impedância impulsiva permite boas estimativas dos efeitos disruptivos associados às sobretensões resultantes da incidência de descargas na linha.

Com base nos resultados, a Tabela 4.3 apresenta as amplitudes críticas de descarga⁵ para cada sistema de aterramento de pé de torre avaliado para diferentes representações do sistema de aterramento. Observa-se que as estimativas de amplitude crítica de descarga determinadas usando-se Z_P são muito próximas daquelas obtidas usando-se $Z(\omega)$; para resistividade de até 5000 Ωm , os erros são inferiores a 5%, assumindo-se como referência os resultados obtidos a partir da representação do aterramento via $Z(\omega)$. Vale salientar que os erros incorridos nas estimativas via Z_P são conservativos. Por outro lado, as estimativas obtidas considerando-se a representação via R_{LF} possuem erros significativos. Embora essas estimativas sejam conservadoras, tais erros muito elevados podem levar a estimativas grosseiras do desempenho real da linha.

Tabela 4.3 - Amplitude crítica de descarga – método DE.

Representações Sistemas Adotados	$Z(\omega)$	Z_P		R_{LF}	
	Amplitude crítica (kA)	Amplitude crítica (kA)	Erro (%)	Amplitude crítica (kA)	Erro (%)
$\rho_0 = 300 \Omega.m$ e $L = 20 m$	102	102	0,00	96	-5,88
$\rho_0 = 500 \Omega.m$ e $L = 30 m$	95	95	0,00	88	-7,37
$\rho_0 = 1000 \Omega.m$ e $L = 40 m$	78	78	0,00	67	-14,10
$\rho_0 = 3000 \Omega.m$ e $L = 60 m$	53	51	-3,77	41	-22,64
$\rho_0 = 5000 \Omega.m$ e $L = 80 m$	48	46	-4,17	34	-29,17
$\rho_0 = 10000 \Omega.m$ e $L = 130 m$	47	43	-8,51	28	-40,43

⁵ Valor de amplitude a partir do qual ocorre a ruptura da rigidez dielétrica de isoladores, utilizando o método DE e considerando forma de onda de parâmetros medianos, segundo medições na estação Morro do Cachimbo.

A partir dos valores de amplitude crítica levantados, avalia-se a probabilidade de uma descarga atmosférica ultrapassar esses valores, considerando a distribuição cumulativa das primeiras descargas registradas no Morro do Cachimbo [6], [76] por meio da equação:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{4,5}\right)^{3,9}} \quad (4.1)$$

em que:

- $P(I)$ é a probabilidade de uma descarga atmosférica exceder um dado valor I de amplitude, em kA.

A Tabela 4.4 apresenta as probabilidades levantadas para cada sistema de aterramento de pé de torre e a representação desses aterramentos em simulações no domínio do tempo.

Tabela 4. 4 - Probabilidade de uma descarga exceder a amplitude crítica de descarga segundo o método DE.

Representações Sistemas Adotados	$Z(\omega)$	Z_p	R_{LF}
$\rho_0 = 300 \, \Omega.m$ e $L = 20 \, m$	3,94%	3,94%	4,95%
$\rho_0 = 500 \, \Omega.m$ e $L = 30 \, m$	5,14%	5,14%	6,81%
$\rho_0 = 1000 \, \Omega.m$ e $L = 40 \, m$	10,48%	10,48%	17,48%
$\rho_0 = 3000 \, \Omega.m$ e $L = 60 \, m$	34,56%	38,03%	58,98%
$\rho_0 = 5000 \, \Omega.m$ e $L = 80 \, m$	43,74%	47,86%	74,90%
$\rho_0 = 10000 \, \Omega.m$ e $L = 130 \, m$	45,77%	54,42%	86,41%

As expressivas diferenças observadas na Tabela 4.4 se refletem nas probabilidades levantadas na Tabela 4.4. Observa-se que as probabilidades de uma descarga alcançar a amplitude crítica para uma determinada condição de simulação são consideravelmente maiores para a representação do sistema de aterramento por sua resistência em baixas frequências. Já as probabilidades associadas à representação do aterramento pela impedância impulsiva são muito próximas às levantadas para a impedância harmônica, sobretudo para solos de até 5000 Ωm .

4.1.4 Análise dos resultados

As simulações apresentadas permitem importante análise à respeito da influência da representação do aterramento em plataformas de simulação no domínio do tempo de linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas.

A representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências acarreta erros significativos no cálculo das sobretensões atmosféricas, tendo como referência a representação rigorosa do aterramento que contempla seu caráter dependente da frequência por meio da utilização da impedância harmônica. Os efeitos disruptivos associados à representação do aterramento por sua resistência em baixas frequências são consideravelmente maiores que os associados à representação rigorosa do aterramento, levando a estimativas conservadoras da corrente crítica, porém irrealisticamente inferiores às reais, sobretudo em solos de alta resistividade.

Ademais, como previamente discutido, a representação via resistência de aterramento despreza uma série de efeitos eletromagnéticos que são relevantes para fenômenos impulsivos. Observa-se que quando o solo é submetido a campos variáveis no tempo, a consideração da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência proporciona uma melhoria do desempenho do aterramento. Isso explica, portanto, os maiores efeitos disruptivos calculados quando se utiliza a representação do aterramento por sua resistência em baixa frequência, uma vez que essa representação assume para o aterramento um desempenho impulsivo inferior ao seu desempenho real. Dessa forma, essa representação pode resultar em erros consideráveis em análises de desempenho de linhas frente a descargas, principalmente para solos de alta resistividade.

Já quando se utiliza a impedância impulsiva como representação do aterramento, os resultados aproximam-se das simulações levantadas utilizando a modelagem rigorosa do sistema de aterramento a partir de sua impedância harmônica. Adicionalmente, a impedância impulsiva leva a resultados desejavelmente conservadores, pois os efeitos disruptivos associados são maiores, ainda que muito próximos, em relação aos calculados utilizando a representação do aterramento através da impedância harmônica. Dessas constatações, pode-se concluir que utilização da representação do sistema de aterramento por sua impedância impulsiva constitui uma alternativa interessante por levar a resultados próximos àqueles obtidos via representação pela impedância harmônica, possuir fácil implementação, além de não trazer prejuízo nas análises qualitativas de avaliação da probabilidade de ruptura do isolamento.

Por fim, é importante mencionar que os resultados obtidos nesta seção estão em concordância com aqueles obtidos por Visacro & Silveira em [49] e por Duarte em [47], considerando uma faixa mais ampla de resistividades do solo.

4.2 O efeito da dependência dos parâmetros do solo com a frequência nos modelos de linhas de transmissão

No Capítulo 3, foram elencadas duas representações de linhas de transmissão na plataforma ATP: o modelo *J. Marti* que, dentre outras aproximações, considera os parâmetros elétricos do solo constantes com a frequência e o modelo *J. Marti modificado*, que contempla a dependência de tais parâmetros com a frequência.

Nesta seção, são avaliadas as sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão, bem como o efeito disruptivo resultante, considerando os dois modelos de linha mencionados. Primeiramente, avalia-se isoladamente apenas um vão da linha de transmissão com o intuito de elucidar os aspectos fundamentais da influência da consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência na propagação de ondas de corrente e tensão ao longo da linha. Em seguida, analisa-se o caso base completo e são avaliadas as sobretensões resultantes considerando os dois modelos de linha e incidências no topo da torre e no meio do vão. Nessas simulações, o aterramento foi representado por sua impedância harmônica.

4.2.1 Transitórios eletromagnéticos em um vão da linha

Para ilustrar a influência da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo na propagação de sobretensões atmosféricas, nesta seção são simulados transitórios considerando os dois modelos de linha, *J. Marti* e *J. Marti modificado*, de maneira isolada; isto é, o sistema de aterramento e a torre de transmissão foram omitidos.

Considera-se um vão de 500 m da linha de transmissão sob estudo e a injeção da onda de corrente mediana de primeira descarga do Morro do Cachimbo, por meio de uma fonte ideal, no terminal emissor do cabo de blindagem. O terminal receptor do cabo de blindagem é aterrado por meio de um resistor de 100 Ω ; todos os outros terminais são deixados em aberto. As Figuras 4.8 a 4.13 ilustram as sobretensões calculadas, considerando os dois modelos de linha, no terminal receptor do cabo de blindagem e na fase mais baixa da linha de transmissão, considerando seis resistividades de solo: 300 $\Omega \cdot m$, 500 $\Omega \cdot m$, 1000 $\Omega \cdot m$, 3000 $\Omega \cdot m$, 5000 $\Omega \cdot m$ e 10000 $\Omega \cdot m$.

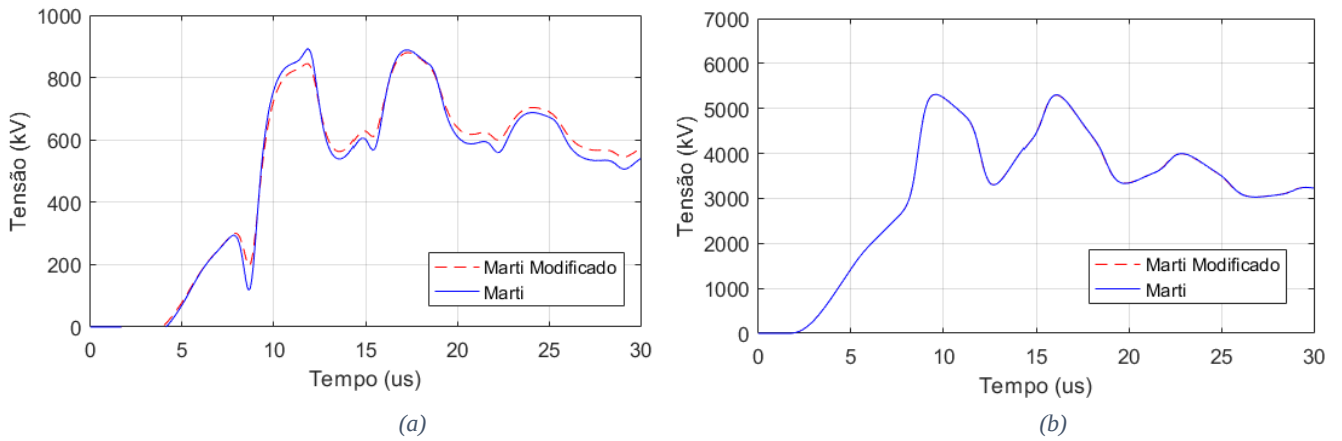


Figura 4.8 - Tensões transitórias calculadas para os modelos de linha J. Marti e J. Marti modificado e $\rho_0 = 300 \Omega \cdot m$. (a) Sobreensão no terminal receptor da fase mais baixa (C). (b) Sobreensão no terminal receptor do cabo de blindagem.

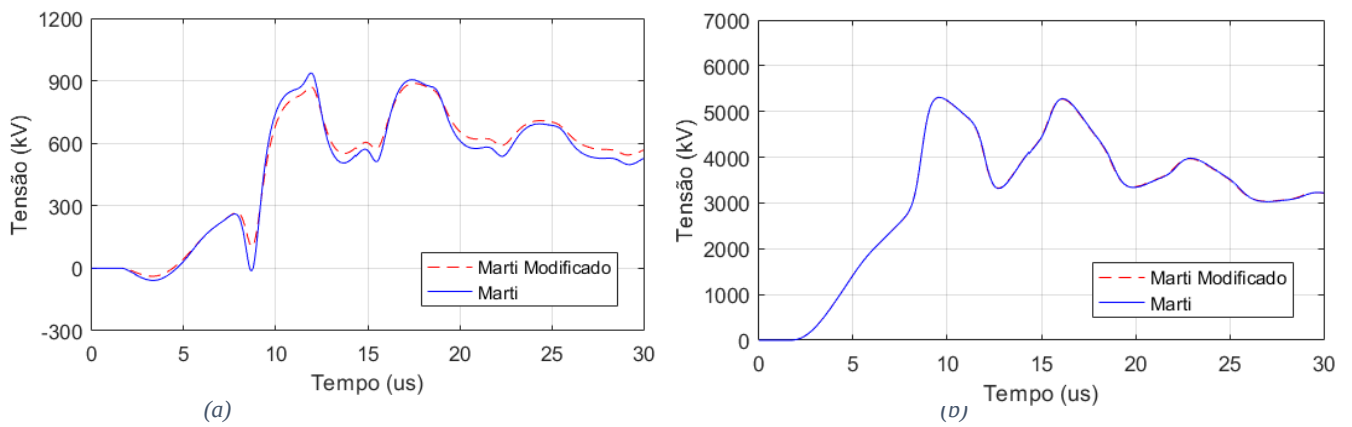


Figura 4.9 - Tensões transitórias calculadas para os modelos de linha J. Marti e J. Marti modificado e $\rho_0 = 500 \Omega \cdot m$. (a) Sobreensão no terminal receptor da fase mais baixa (C). (b) Sobreensão no terminal receptor do cabo de blindagem.

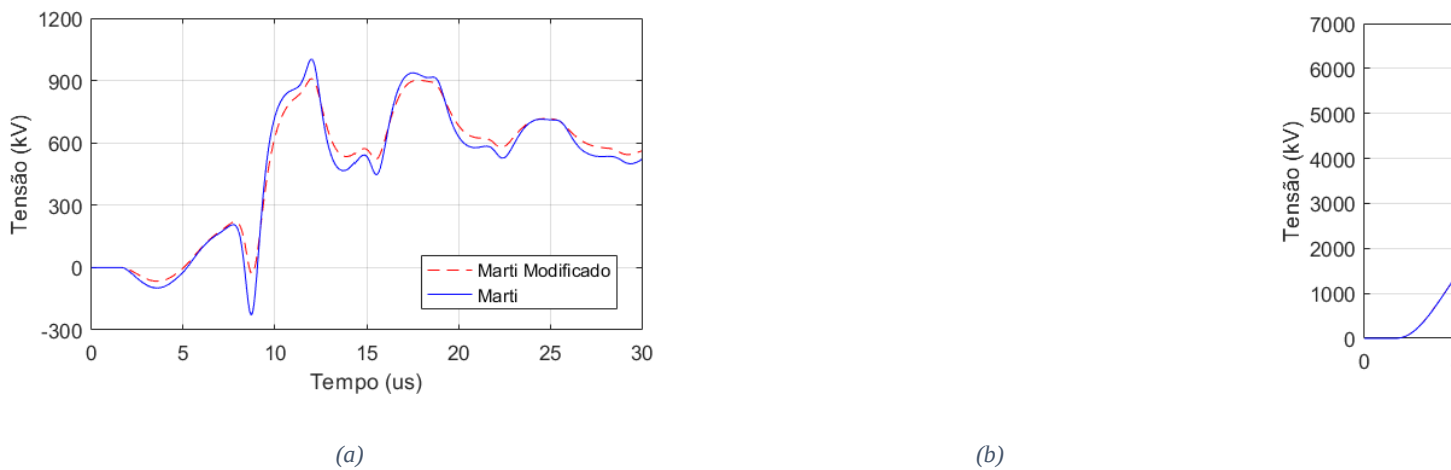


Figura 4.10 - Tensões transitórias calculadas para os modelos de linha J. Marti e J. Marti modificado e $\rho_0 = 1000 \Omega \cdot m$. (a) Sobreensão no terminal receptor da fase mais baixa (C). (b) Sobreensão no terminal receptor do cabo de blindagem.

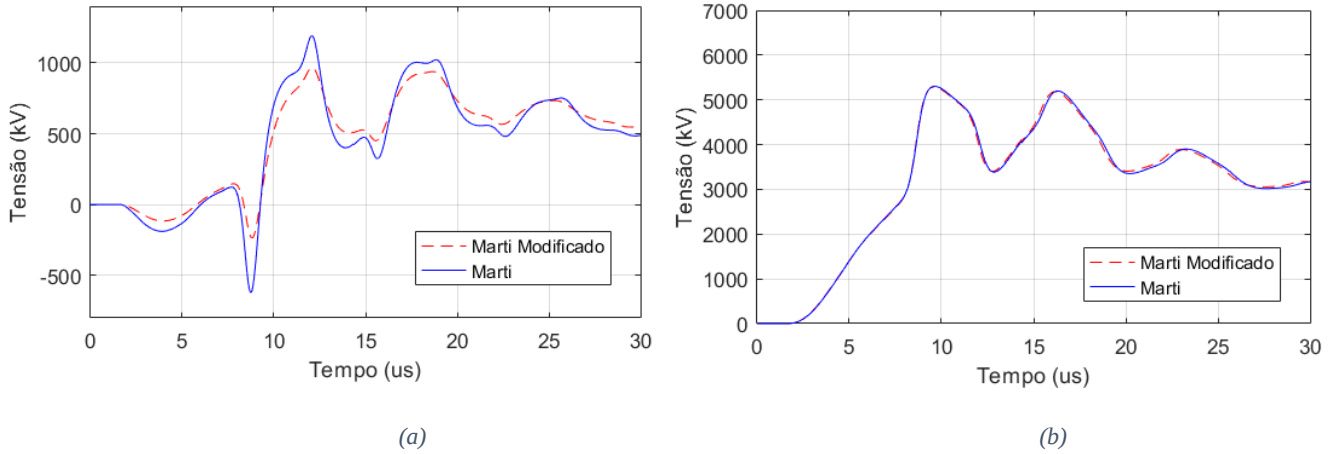


Figura 4.11 - Tensões transitórias calculadas para os modelos de linha J. Marti e J. Marti modificado e $\rho_0 = 3000 \Omega.m$. (a) Sobreensão no terminal receptor da fase mais baixa (C). (b) Sobreensão no terminal receptor do cabo de blindagem.

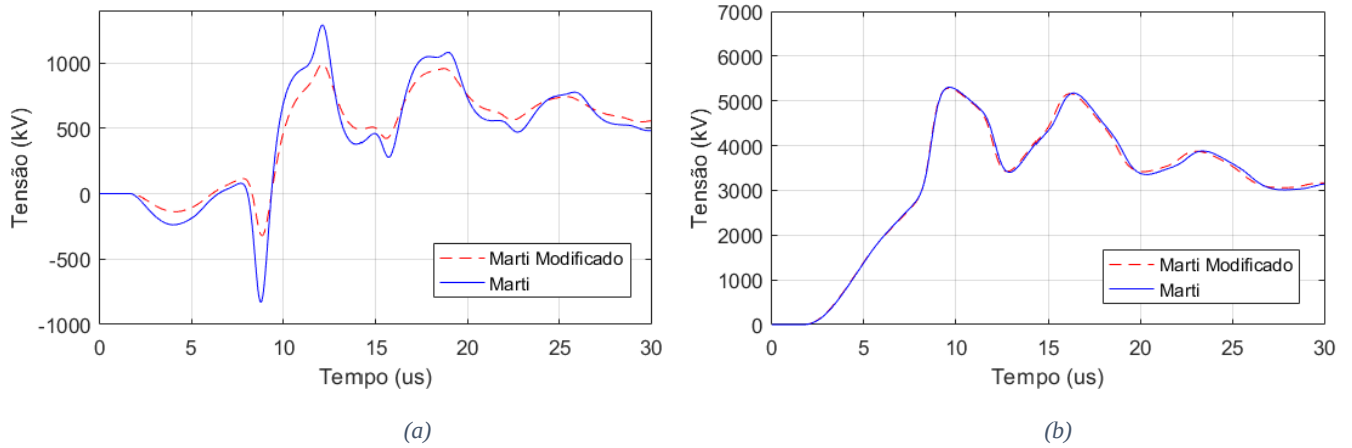


Figura 4.12 - Tensões transitórias calculadas para os modelos de linha J. Marti e J. Marti modificado e $\rho_0 = 5000 \Omega.m$. (a) Sobreensão no terminal receptor da fase mais baixa (C). (b) Sobreensão no terminal receptor do cabo de

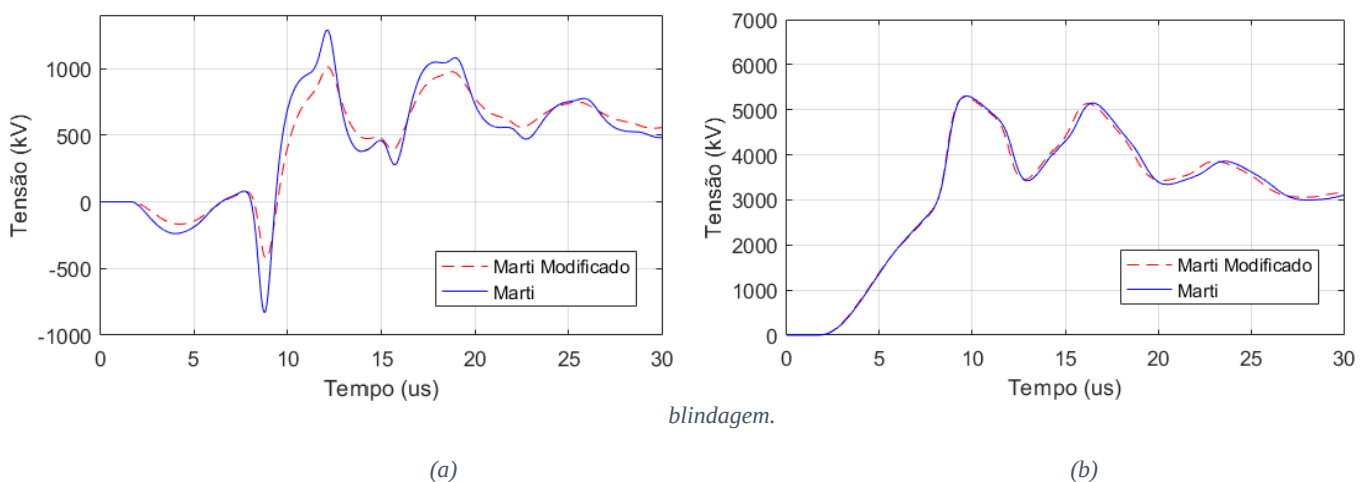


Figura 4.13 - Tensões transitórias calculadas para os modelos de linha J. Marti e J. Marti modificado e $\rho_0 = 10000 \Omega.m$. (a) Sobreensão no terminal receptor da fase mais baixa (C). (b) Sobreensão no terminal receptor do cabo de blindagem.

De acordo com os resultados apresentados, as diferenças nas sobreensões no cabo de blindagem, considerando os dois modelos de linha, são desprezíveis, sobretudo para solos de baixa resistividade. Em contrapartida, as sobreensões induzidas na fase C (fase mais baixa da

linha) apresentam comportamento distinto, tanto em termos de amplitude como forma da onda, dependendo do modelo de linha adotado. A inclusão da dependência da frequência dos parâmetros do solo (no modelo *J. Marti modificado*) implica um aumento da atenuação das ondas viajantes, levando a ondas de tensão induzidas com picos menores, quando comparadas com o modelo clássico de *J. Marti*, que assume os parâmetros do solo constantes na frequência. Adicionalmente, as diferenças observadas nas sobretensões induzidas tornam-se mais significativas com o aumento da resistividade do solo. Dessa forma, os resultados apresentados nas seções posteriores se concentram nos casos de solos com resistividades de $5000 \Omega \cdot m$ e $10000 \Omega \cdot m$.

4.2.2 Incidência da descarga atmosférica no topo da torre

Nesta seção, as sobretensões são calculadas considerando todos os elementos do sistema de transmissão (linha de transmissão, sistema de aterramento e torre), para injeção de corrente no topo da torre. Aplica-se a onda de corrente mediana de primeira descarga do Morro do Cachimbo, e considera-se uma resistência em paralelo de 1500Ω que representa a impedância do canal de descarga vista do ponto de injeção da corrente. As Figuras 4.14 e 4.15 ilustram as sobretensões calculadas no topo da torre e na fase mais baixa da linha. A Figura 4.16 ilustra a diferença das duas sobretensões mencionadas anteriormente, que equivale, aproximadamente, à tensão na cadeia de isoladores e a Figura 4.17 apresenta o efeito disruptivo associado ao valor de pico da corrente.

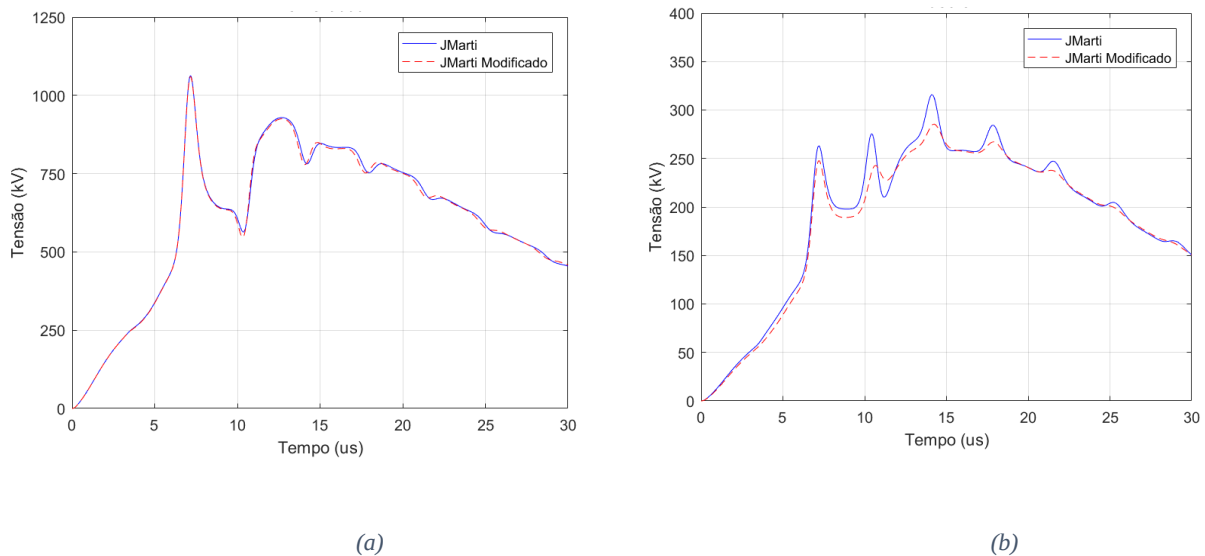
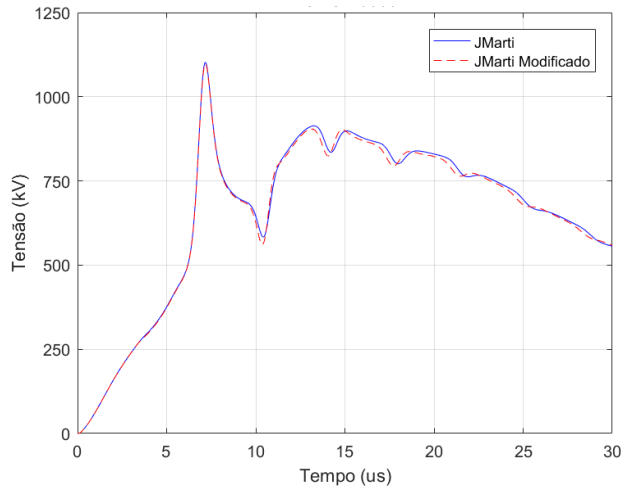
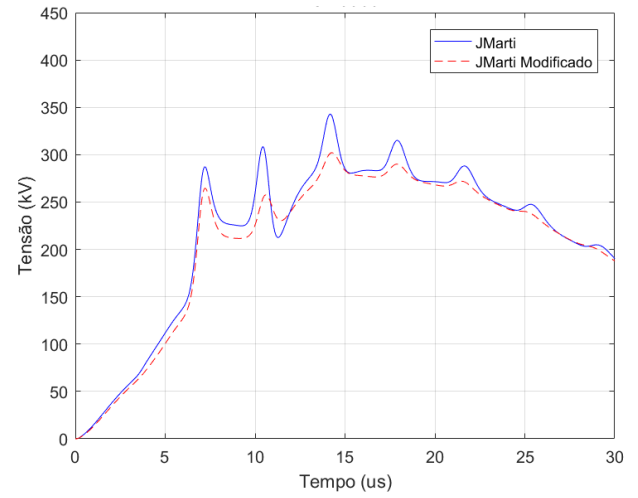


Figura 4.14 - Sobretensões (a) no topo da torre (b) na fase mais baixa da linha; para uma injeção de corrente no topo da torre, considerando (Modelo *J. Marti modificado*) ou desconsiderando (Modelo *J. Marti*) a variação dos parâmetros do solo com a frequência para um solo com resistividade $\rho_0 = 5000 \Omega \cdot m$.

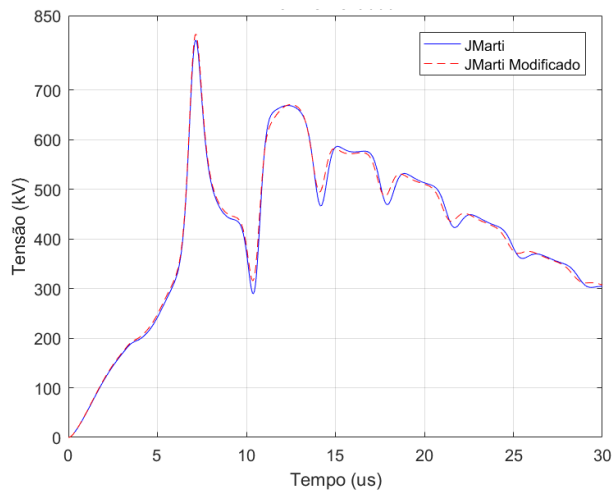


(a)

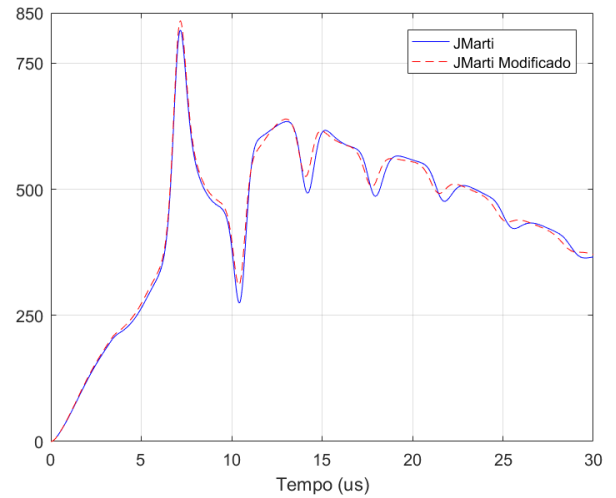


(b)

Figura 4.15- Sobretensões (a) no topo da torre (b) na fase mais baixa da linha; para uma injeção de corrente no topo da torre, considerando (Modelo J. Marti modificado) ou desconsiderando (Modelo J. Marti) a variação dos parâmetros do solo com a frequência para um solo com resistividade $\rho_0=10000 \Omega m$.



(a)



(b)

Figura 4.16 - Sobretensões (a) na cadeia de isoladores $\rho_0=5000 \Omega m$. (b) na cadeia de isoladores $\rho_0=10000 \Omega m$.; para uma injeção de corrente no topo da torre, considerando (Modelo J. Marti modificado) ou desconsiderando (Modelo J. Marti) a variação dos parâmetros do solo com a frequência para um solo.

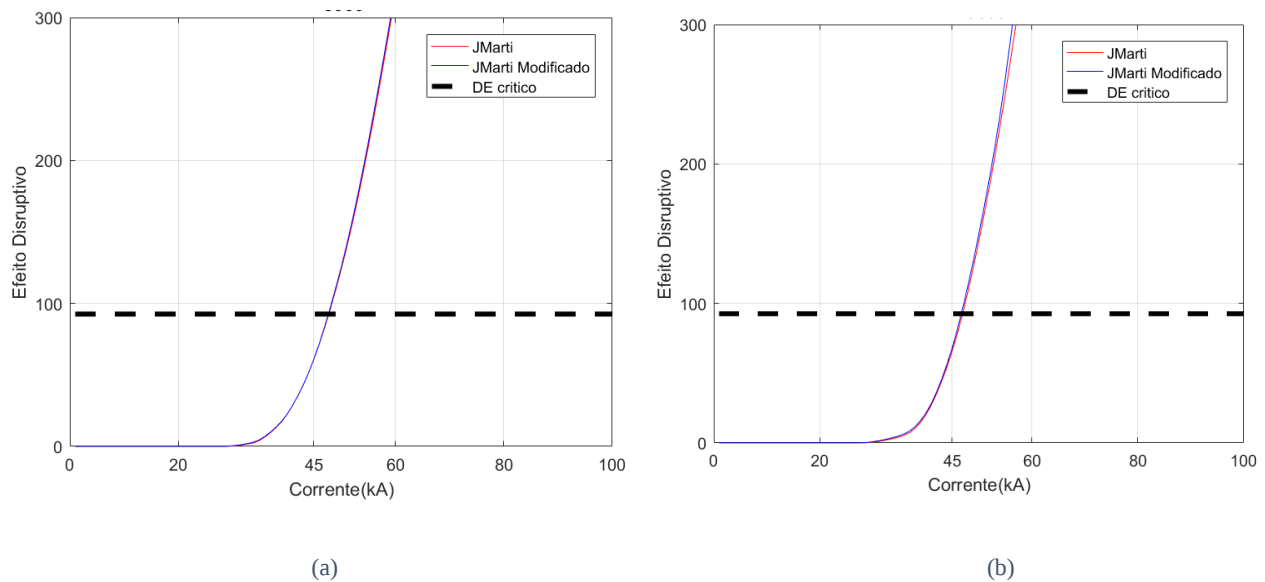


Figura 4.17 - Efeito disruptivo na fase C da torre de transmissão, para uma injeção de corrente no topo da torre, considerando (Modelo J. Martí modificado) ou desconsiderando (Modelo J. Martí) a variação dos parâmetros do solo com a frequência para um solo. (a) $\rho_0 = 5000 \Omega.m$; (b) $\rho_0 = 10000 \Omega.m$

De acordo com os resultados, embora as tensões induzidas na fase mais baixa da linha sejam afetadas pela dependência da frequência dos parâmetros solo, a sobretensão efetivamente aplicada sobre a cadeia de isoladores praticamente independe do modelo de linha adotado. Disso resulta que o efeito disruptivo associado à tensão aplicada à cadeia de isoladores também é basicamente independente do modelo de linha, conforme ilustrado na Figura 4.17. Na Figura 4.16 observa-se que as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores oscilam em torno da tensão limiar de ruptura do isolamento ($V_0 = 505,5 kV$). Conforme mencionado na seção 4.1.3, a fim de validar a utilização do método DE para estes casos, calculou-se o instante de tempo em que ocorreu a ruptura do isolamento pelo método DE. Para ambos os casos (Figura 4.16 (a) e 4.16(b)) a ruptura do isolamento ocorreu no primeiro valor de pico excursionado acima do valor de V_0 , validando a utilização do método.

4.2.3 Incidência da descarga atmosférica no meio do vão

Nesta seção, as sobretensões são calculadas considerando o sistema de transmissão completo e a incidência da descarga atmosférica no meio do vão, considerando as mesmas condições das simulações anteriores. As Figuras 4.18 e 4.19 ilustram a tensão resultante no cabo de blindagem e induzida na fase mais alta da linha, ambas no meio do vão, para as resistividades de $5000 \Omega.m$ e $10000 \Omega.m$, respectivamente. A Figura 4.20 apresenta as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores da fase mais baixa da linha de transmissão. Embora seja esperado que essas sobretensões sejam influenciadas pelo efeito corona, ele é

negligenciado nesta análise com o intuito de focar na influência da dependência dos parâmetros do solo com a frequência nas sobretensões resultantes.

De acordo com os resultados, a tensão resultante no cabo de blindagem é pouco afetada pelo modelo de linha adotado. Já a tensão induzida na fase mais alta no meio do vão apresenta alterações, dependendo do modelo de linha, sendo observados picos menores quando se considera a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Vale salientar que a tensão induzida no cabo fase no meio do vão é bastante inferior à tensão resultante no cabo de blindagem (também no meio do vão). Finalmente, a sobretensão sobre a cadeia de isoladores é influenciada pelo modelo de linha, sendo que a consideração da dependência da frequência dos parâmetros do solo leva a uma redução dos picos da onda de tensão resultante.

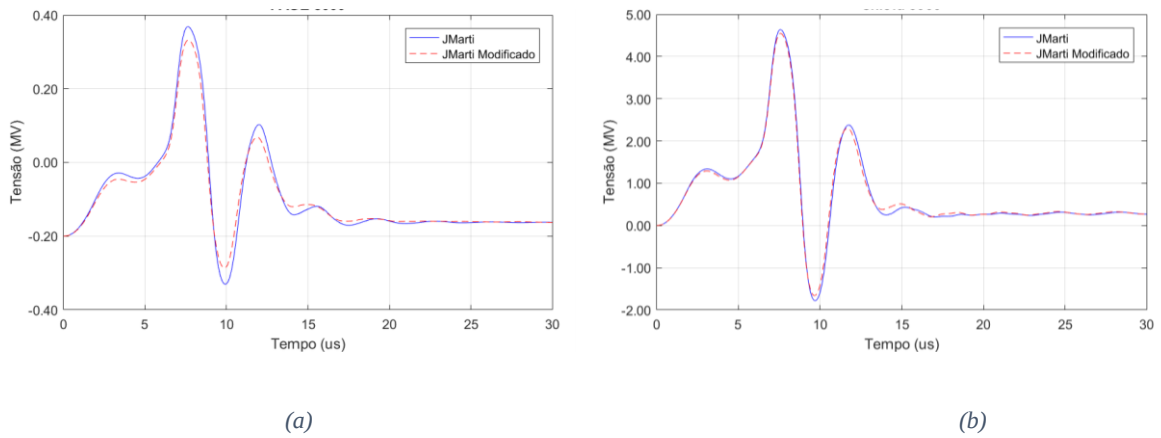
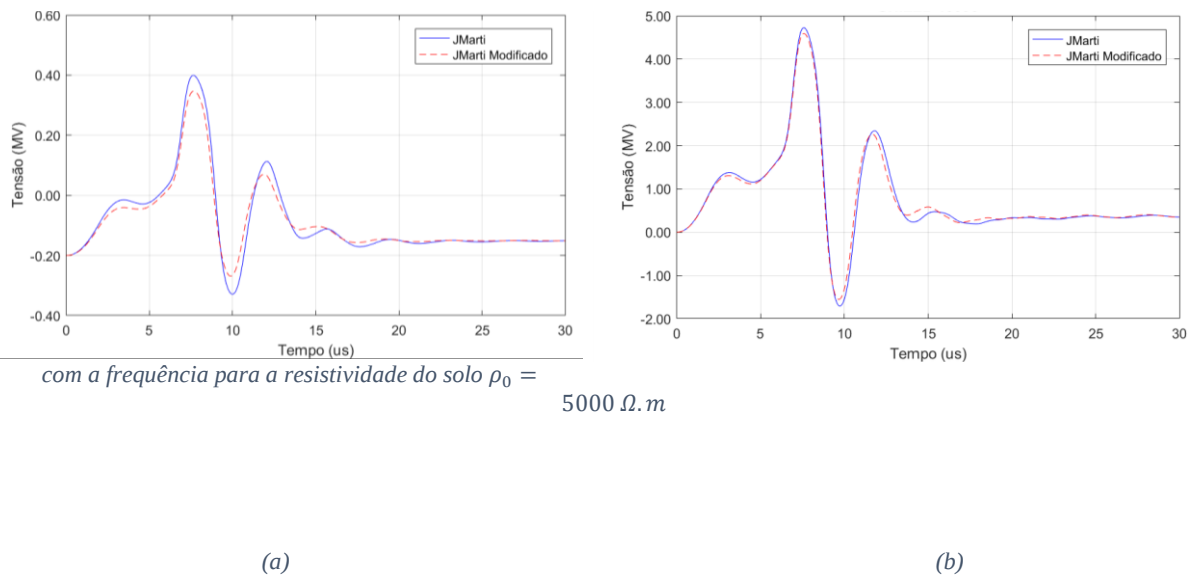


Figura 4.18 - Sobretensão no condutor fase(a) mais alto e no cabo de blindagem(b), considerando uma descarga incidente no meio do vão, considerando (J. Marti Modificado) e desconsiderando (J. Marti) a dependência dos parâmetros do solo



com a frequência para a resistividade do solo $\rho_0 = 5000 \Omega.m$

Figura 4.19 - Sobretensão no condutor fase(a) mais alto e no cabo de blindagem(b), considerando uma descarga incidente no meio do vão, considerando (J. Marti Modificado) e desconsiderando (J. Marti) a dependência dos parâmetros do solo com a frequência para a resistividade do solo $\rho_0 = 10000 \Omega.m$.

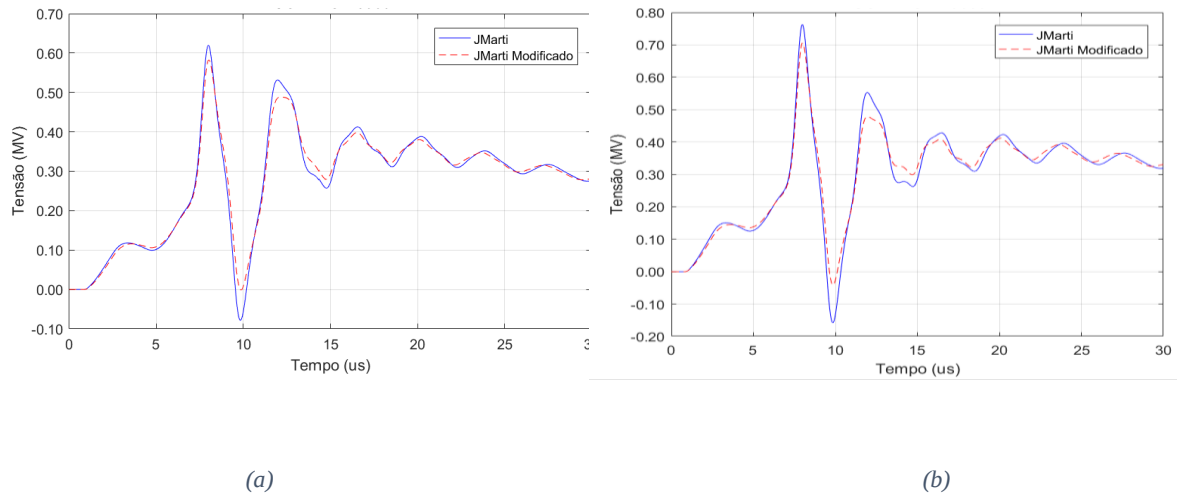


Figura 4. 20 - Sobretensão na cadeia de isoladores da fase mais baixa da linha considerando as duas modelagens: *J. Marti* e *J. Marti modificado* para as resistividades do solo (a) $\rho_0 = 5000 \Omega.m$ e (b) $\rho_0 = 10000 \Omega.m$

4.2.4 Análise dos Resultados

Avaliou-se as sobretensões atmosféricas no sistema considerando, inicialmente, somente a linha de transmissão, isto é, desconsiderando a influência do sistema de aterramento e da torre de transmissão. Para esse caso, de acordo com os resultados, não foram observadas diferenças significativas nas sobretensões calculadas no terminal emissor do cabo de blindagem, mesmo para solos de resistividade mais elevada. Por outro lado, as sobretensões induzidas no terminal emissor do condutor fase mais baixo da linha diferem significativamente tanto na forma de onda quanto na amplitude, de acordo com o modelo de linha utilizado. A inclusão da dependência dos parâmetros do solo com a frequência, considerado no modelo *J. Marti modificado*, tende a aumentar a atenuação das ondas que se propagam, quando comparadas com o modelo clássico proposto por Marti, que assume os parâmetros do solo constantes, principalmente no caso de solos de maior resistividade.

O caso seguinte analisado nas simulações considera a incidência de uma descarga no topo da torre incluindo todos os elementos do sistema de transmissão: o sistema de aterramento, a linha de transmissão e a torre. Analisando os resultados, quando uma descarga atmosférica incide no topo da torre, a onda de corrente e a onda de tensão associadas podem ser decompostas em três componentes: duas componentes viajam pelos cabos de blindagem e a outra parte da onda desce pela torre, sendo transmitida para o sistema de aterramento. Ao chegar ao sistema de aterramento, parte dessa onda é refletida e volta para o topo da torre, de acordo com o coeficiente de reflexão associado. Consequentemente, durante os primeiros microssegundos do fenômeno, a sobretensão no topo da torre é determinada pela superposição

da onda incidente e da onda refletida, que dependem, basicamente, da impedância de surto da torre e da impedância do aterramento.

Considerando comprimentos de vão e tempos de frente típicos, as reflexões oriundas das torres adjacentes influenciam a sobretensão resultante no topo da torre somente depois da ocorrência do valor de pico [77]. Essa afirmação é confirmada pelas Figuras 4.14 (a) e 4.15 (a) em que a sobretensão no topo da torre basicamente não depende do modelo da linha durante os primeiros microssegundos de transitórios.

Nas Figuras 4.14 (b) e 4.15 (b), que indicam as sobretensões no condutor fase mais baixo da linha para resistividades do solo de 5000 $\Omega \cdot m$ e 10000 $\Omega \cdot m$, respectivamente, são notadas diferenças nos resultados obtidos considerando os dois modelos de linha: o pico de tensão induzida considerando a resistividade do solo de 5000 $\Omega \cdot m$ e 10000 $\Omega \cdot m$ é cerca de 12% e 13%, respectivamente, menor quando a dependência dos parâmetros do solo com a frequência é considerada.

Na prática, a sobretensão na cadeia de isoladores é o parâmetro mais importante para se avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Esse parâmetro, ilustrado na Figura 4.16, corresponde aproximadamente à diferença entre a sobretensão no topo da torre e a sobretensão induzida no condutor fase da linha de transmissão. Analisando a tensão resultante na cadeia de isoladores, constata-se que a parcela da tensão no topo da torre é dominante, uma vez que ela chega a ser quatro vezes maior se comparada com a sobretensão induzida no condutor fase. No caso analisado, o pico de sobretensão na cadeia de isoladores é cerca de 2,1% [Figura 4.16 (a)] e 2,4% [Figura 4.16 (b)] maior para o modelo de parâmetros do solo variáveis na frequência, respectivamente para as resistividades de 5000 Ωm e 10000 Ωm . Isso indica que, embora o fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo impacte na tensão induzida nos condutores fase, a tensão efetivamente sobre os isoladores sofre pouca influência.

A fim de se obter uma análise mais refinada dos dois modelos de linhas de transmissão utilizados, considerando a avaliação da ruptura do isolamento na cadeia de isoladores, utilizou-se o método *DE*. Foi considerado o mesmo modelo de descarga atmosférica para todas as simulações, variando-se a amplitude da corrente. Observa-se que a corrente crítica estimada para ambos os modelos de linha é, basicamente, a mesma para a mesma resistividade do solo analisada. Ainda considerando a Figura 4.17, calculou-se a probabilidade da corrente de descarga exceder o valor crítico de corrente, obtendo-se 43,74% para os dois modelos de linha considerados e resistividade do solo de 5000 $\Omega \cdot m$ e 45,77% para os dois modelos com a resistividade de 10000 $\Omega \cdot m$.

Por fim, o último caso analisado considera a incidência de uma descarga atmosférica no meio do vão. Foram calculadas as sobretensões no condutor fase mais alto, no cabo de blindagem e na cadeia de isoladores da fase mais baixa da linha de transmissão. Observa-se nas Figuras 4.17 (b) e 4.18(b) que a sobretensão no cabo de blindagem praticamente independe do modelo de linha de transmissão utilizado. Em contrapartida, as sobretensões induzidas no condutor fase mais alto, Figuras 4.17(a) e 4.18(a), são afetadas pelo modelo de linha utilizado: o primeiro pico de tensão considerando o modelo de parâmetros do solo constantes com a frequência é 8,0% maior se comparado ao modelo *J. Marti modificado* para uma resistividade do solo de $5000 \Omega.m$ e 10,11% para uma resistividade do solo de $10000 \Omega.m$. A ocorrência de ruptura do isolamento (ar) no meio do vão depende, basicamente, da diferença entre as tensões no cabo de blindagem e no cabo fase. No entanto, embora a tensão induzida no cabo fase seja afetada pelo modelo de linha, a diferença de potencial efetivamente aplicada ao *gap* de ar é pouco influenciada, pois a tensão no cabo de blindagem é muito superior à induzida no cabo fase. Dessa forma, pode-se concluir que a consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência pouco afeta a ocorrência de um eventual *flashover* no meio do vão da linha de transmissão.

Ainda considerando a incidência no meio do vão, da análise da sobretensão na cadeia de isoladores do condutor fase mais baixo da linha, mostrada na Figura 4.20, são perceptíveis as diferenças nos picos de sobretensão, considerando os dois modelos avaliados. As ondas incidentes de tensão e corrente, primeiramente, viajam pelo cabo de blindagem e, posteriormente, chegam às torres adjacentes, o que difere do caso de incidência da descarga no topo da torre, em que a onda incide diretamente na torre de transmissão. Tal diferença pode levar a um comportamento distinto da onda de tensão resultante na cadeia de isoladores. No caso da incidência no meio do vão, observa-se que a sobretensão na cadeia de isoladores tem um caráter mais oscilatório e que a inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência provoca maior amortecimento nos picos de tensão, sendo que nos primeiros três picos há uma redução, respectivamente, de 6,43%; 87,07% e 7,54% para resistividade do solo de $5000 \Omega.m$ e redução de 7,89%; 79,08% e 12,72% para resistividade do solo de $10000 \Omega.m$. Nessas condições, deve-se ressaltar que considerar ou desconsiderar a dependência dos parâmetros do solo com a frequência pode ser determinante para a ocorrência ou não da ruptura do isolamento.

4.3 Considerações finais

O presente capítulo apresenta simulações e resultados que podem ser divididos em dois grandes blocos: o efeito das representações do sistema de aterramento e a influência dos modelos de linha de transmissão na análise de sobretensões de origem atmosférica em linhas de transmissão.

Os resultados mostram que a representação do sistema de aterramento para fenômenos impulsivos impacta substancialmente nas sobretensões resultantes na cadeia de isoladores e no efeito disruptivo, sobretudo para solos de alta resistividade.

No que concerne aos modelos de linha de transmissão, quando analisados os modelos de linha de maneira isolada, observou-se diferença significativa em termos das sobretensões induzidas ao considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência, especialmente para solos de alta resistividade.

Capítulo 5

Conclusões e Propostas de Continuidade

Esta dissertação concentrou-se na avaliação da influência dos modelos empregados para representação do sistema de aterramento e da linha de transmissão no cálculo de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão utilizando plataformas do tipo ATP/EMTP. Em particular, analisou-se os erros resultantes da desconsideração da característica dependente da frequência do aterramento e da não inclusão da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência no modelo de linha.

Nas simulações realizadas, notou-se que a representação do sistema de aterramento para fenômenos impulsivos impacta substancialmente nas sobretensões resultantes na cadeia de isoladores e no efeito disruptivo, sobretudo para solos de alta resistividade. Verificou-se que a representação do sistema de aterramento por sua resistência em baixas frequências acarreta erros consideráveis, em relação ao rigoroso comportamento variável na frequência, o que pode levar a estimativas não realísticas do desempenho da linha. Em contrapartida, a utilização da representação do sistema de aterramento por impedância impulsiva constituiu-se em uma alternativa interessante por proporcionar resultados próximos à representação pela impedância harmônica, possuir fácil implementação, além de não trazer prejuízo nas análises qualitativas dos resultados conduzidos.

No que concerne aos modelos de linha de transmissão, quando analisados os modelos de linha de maneira isolada, observou-se diferença significativa em termos das sobretensões induzidas ao considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência, especialmente para solos de alta resistividade. Entretanto, nas simulações com sistema de transmissão completo (linha de transmissão, torre e aterramento), e descarga atmosférica no topo da torre, as sobretensões calculadas na cadeia de isoladores apresentaram comportamentos próximos para ambos os modelos de linha simulados. Já ao analisar o caso da incidência da descarga atmosférica no meio do vão, diferenças significativas foram observadas nos picos da onda de tensão resultante na cadeia de isoladores. De maneira geral, ao se avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas em plataformas no domínio do tempo, é desejável que a variação dos parâmetros do solo com a frequência seja incorporada nos modelos de linhas de transmissão, especialmente no caso de solos de alta resistividade.

Tendo-se em conta as análises apresentadas neste trabalho e o caráter inédito de alguns resultados, espera-se que este texto possa nortear pesquisadores e engenheiros na realização de simulações com elevada exatidão de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão empregando a plataforma ATP ou similares.

As seguintes investigações adicionais são propostas como continuidade deste trabalho:

- Análise da influência das modelagens adotadas para o aterramento e para a linha no cálculo de sobretensões atmosféricas em LTs protegidas por dispositivos para-raios.
- Reavaliação dos resultados obtidos nesta dissertação considerando uma abordagem probabilística pela aplicação do método de Monte Carlo.
- Extensão das análises realizadas para linhas de outros níveis de tensão, inclusive considerando diferentes topologias de torre.
- Investigação de métodos efetivos para avaliação do potencial de ruptura de isolamento de sobretensões com características oscilatórias, tais como aquelas resultantes nas cadeias de isoladores para incidência de descargas no meio do vão.

Referências Bibliográficas

- [1] S. VISACRO. **“Descargas Atmosféricas: uma Abordagem de Engenharia”**. Artliber Editora. 2005.
- [2] CIGRE Working Group 33-01. **“Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”**. Study Committee 33. Dallas, TX, USA. 1991.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **“Relação dos Sistemas e Modelos em Procedimentos de Rede”**. Brasil, ANEEL, Submódulo 18.2. 2009.
- [6] 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.
- [7] M. A. O. SCHROEDER, **“Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação em Medições no Morro do Cachimbo”**, Tese de Doutorado – PPGEE UFMG, 2001.
- [8] K. BERGER, R. B. ANDERSON, and H. KRONINGER, **“Parameters of lightning flashes,”** Electra, no. 80, pp. 223–237. 1975.
- [9] A. DE CONTI, **“Modelo para Definição de Onda de Corrente e tensão Representativas das Solicitações dos Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas”**, Tese de Doutorado, PPGEE-UFMG. 2006.

- [10] C. G. C. ALVAREZ, **“Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas”**, Dissertação de Mestrado, PPGEL – CEFET MG. Março, 2011.
- [11] L. PRIKLER and H. K. HOIDALEN, **“ATP Manual, Version 5.6”**. 2009.
- [12] CIGRE. **“Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”**. WG 01 (Lightning), Study Committee 33, Dallas, TX. 1991.
- [13] F. HEIDLER, **“Analytische Blitzstrom-funktion zur LEMP-berechnung”** – Proc. Int. Conf. Lightning Protection (ICLP), Munique, Alemanha, p.p 63-66. 1985.
- [14] A. DE CONTI and S. VISACRO, **“Analytical Representation of Single and Double-Peaked Lightning Current Waveforms,”** IEEE Trans. Electromagn. Compat., pp. vol. 49, no. 2, pp. 448–451. May, 2007.
- [15] A. J. OLIVEIRA, M. A. O. SCHROEDER, R. A. R. MOURA, M. T. C. BARROS and A. C. S. LIMA, **“Adjustment of Current Waveform Parameters for First Lightning Strokes,”** International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). 2017.
- [16] A. E. ARAÚJO E W. NEVES, **“Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia,”** Editora UFMG. 2005.
- [17] J. R. MARTI, **“Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Eletromagnetic Transient Simulations,”** IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, pp. vol. PAS-101, no. 1. Jan, 1982.
- [18] A. DE CONTI, **“Notas de Aula do Professor Alberto De Conti do curso "Análise de Redes Elétricas no Domínio do Tempo”** PPGE - UFMG .2016.
- [19] **Alternative Transient Program (ATP)**, Rule Book, Canadian/American EMTP User Group. 1987-98.
- [20] J. R. CARSON, **“Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return”**, Bell Systems Technical Journal, pp. vol. 5, 539–556.1926.
- [21] B. GUSTAVSEN, **“Modal Domain-Based Modeling of Parallel Transmission Lines”**, IEEE Trans.. October, 2012.
- [22] J. B. GERTRUDES, M. TAVARES and C. PORTELA, **“Transient Performance Analysis on Overhead Transmission Line Considering the Frequency Dependent Soil**

- Representation”** Proc. International Conference on Power Systems Transients, June, 14- 17. 2011.
- [23] R. ALIPIO and S. VISACRO, “**Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes**”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, p. pp. 132–139. 2013.
- [24] R. ALIPIO, “**Dependência Da Frequencia Dos Parâmetros Do Solo: Efeito No Comportamento Impulsivo De Aterramentos Elétricos**”, Tese de Doutorado - PPGEE - UFMG, 2013.
- [25] A. DE CONTI and M. EMIDIO, “**Extension Of A Modal-Domain Transmission Line Model To Include Frequency-Dependent Ground Parameters**”, Electric Power Systems Research. Março, 2016.
- [26] A. S. JUNIOR, “**Modelagens de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho Frente à Descargas Atmosféricas**,”Dissertação de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica, UFMG. Belo Horizonte, 2001.
- [27] J. A. M. VELASCO, “**Power Systems Transients – Parameter Determination**”, CRC Press. 2010.
- [28] C. JORDAN, “**Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Ground Wires**,” Part II – GENERAL ELECTRIC REVIEW, pp. Vol. 37, No. 4, p. 180-186. 1934.
- [29] C. F. WAGNER and A. R. HILEMAN, “**New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines**”, Part III, AIEE Transactions Part III, 79(3), 589–603. 1960.
- [30] M. A. SARGENT and M. DARVENIZA, “**Tower Surge Impedance**,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 88(3), 680–687, May, 1969.
- [31] W. CHISHOLM, Y. L. CHOW and K. SRIVASTAVA, “**Lightning Surge Response of Transmission Towers**,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 102(9), 3232–3242, September, 1983
- [32] AMETANI, Y. KASAI, J. SAWADA, A. MOCHIZUKI, and T. YAMADA, “**Frequency Dependent Impedance of Vertical Conductors and a Multi-Conductor**

- Tower Model**", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 141(4), 339–345, July, 1994.
- [33] T. HARA and O. YAMAMOTO, "**Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis**", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 143(3), 283–289, May, 1996.
- [34] J.A. GUTIERREZ, P. MORENO, J.L. NAREDO, J.L. BERMUDEZ, M. PAOLONE, C.A. NUCCI, and F. RACHIDI, "**Nonuniform Transmission Tower Model for Lightning Transient Studies**", IEEE Transactions on Power Delivery, 19(2), 490–496. April, 2004.
- [35] 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. EMC*, Vol. 48, n. 3, pp. 530-536, Aug., 2006.
- [36] A. DE CONTI, S. VISACRO, and E. G. SILVA, "**Calculation of Tower Surge Impedance with Jordan's Equations**", in *Proc. XIX-th International Conf. Electromag. Disturbances*, pp. 35-40, Bialystok, Poland, 2009.
- [37] S. VISACRO and J. SOARES, "**HEM – A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems,**" IEEE Trans. Power Del, pp. Vol. 20, No. 2. 2005.
- [38] L. ZANETTA, "**Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**", Livraria da Física, 2006.
- [39] S. VISACRO, "**Aterramentos Elétricos - Conceritos Básicos, Técnicas de Medição, Instrumentação e Filosofias de Aterramento**", Artliber, 2002.
- [40] R. ALIPIO, F. B. NETO, M. A. O. SCHROEDER and T. A. S. OLIVEIRA, "**Cálculo de Resistência de Rterramento de Ralhas de Aterramento em Baixas Freqüências**". Anais da I Jornada Nacional de Iniciação Científica, Brasil. 2006.
- [41] J. CABRAL, D. GAZZANA, R. LEBORGNE, A. BRETAS, G. DIAS and M. TELLÓ, "**Analysis of distribution lines performance against lightning using ATP-EMTP,**" EMC - International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2014.
- [42] K. FEKETE, S. NIKOLOVSKI, G. KNEZEVIC, M. STOJKOV e Z. KOVAC, "**Simulation of lightning transients on 110 kV overhead-cable transmission line using ATP-EMTP,**" IEE MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE. 2010.
- [43] S. ASSIS, W. BOAVENTURA and J. O. PAULINO, "**Lightning Performance of Transmission Line: Comparison IEEE Flash and Monte Carlo Method,**" IEEE Latin America Transactions, pp. Vol. 15, No. 2, Feb. 2017.

- [44] R. ALÍPIO, **“Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência,”** Dissertação de Mestrado - PPGMMC- CEFET MG. 2008.
- [45] B. R. GUPTA and B. THAPAR, **“Impulse Impedance of Grounding Systems,”** Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, pp. 563-569, 1978.
- [46] L. GRCEV, **“Impulse Efficiency of Ground Electrodes,”** IEEE Trans. Power Delivery, pp. vol. 24, nº 1, pp. 441-451, 2009.
- [47] M. H. R. DUARTE, **“Impacto da Representação de Sistemas de Aterramento no Desempenho de Para-Raios de Linhas de Transmissão,”** Dissertação de Mestrado - PPGEEL CEFET MG, 2018.
- [48] F. M. D. S. BORGES, **“Metodologia para Determinação da Impedância Impulsiva para Arranjos Típicos de Aterramentos Elétricos,”** Dissertação de Mestrado - PPGEEL - CEFET MG, 2018.
- [49] S. VISACRO and F. H. SILVEIRA, **“Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires,”** IEEE Trans. Power Delivery, pp. vol. 31, nº 4, pp. 1524-1532, Aug., 2016.
- [50] R. E. D. S. FILHO, **“Avaliação de Metodologias para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas,”** Dissertação de mestrado, PPGEEL -UFMG, 2013.
- [51] CIGRÉ. Working Group 01 (Lightning) Study Committee 33 (Overvoltages and Isulation Coordination). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. **Cigré Brochure 63**, Out, 1991.
- [52] A. R. HILEMAN, **“Insulation Cordination for Power Systems”** p. 764, New York, 1999.
- [53] J. H. SCOTT, **“Electrical and magnetic properties of rock and soil,”**. U.S. Geological Survey, 1983.
- [54] C. M. PORTELA, **“Measurement and Modeling of Soil Eletromagnetic Behavior,”** in Proc. IEEE Int. Sym. Eetromagnetic Compatibility, pp. 1004-1009, Seattle, 1999.

- [55] S. VISACRO and R. ALÍPIO, **“Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes,”** IEEE Transactions Power Delivery, pp. pp. 927-935, 2012.
- [56] R. ALÍPIO, and S. VISACRO, **“Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil,”** pp. IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, Oct. 2014.
- [57] E. D. SUNDE, **“Earth Conduction Effects in Transmission Systems,”** New York, NY, USA: Dover, 1968.
- [58] M. P. S. EMÍDIO, **“Uma Abordagem para o Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão Aéreas no Domínio do Tempo Considerando uma Representação mais Detalhada dos Efeitos do Solo,”** Dissertação de mestrado, PPGEE – UFMG, 2015.
- [59] S. VISACRO, **“A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning currents,”** IEEE Transactions on Power Delivery, pp. vol. 22, nº 1, pp., JANEIRO, 2007.
- [60] S. VISACRO and C. PORTELA, **“Modeling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications, Including Propagation Effects,”** International Conference Lightning Protection (ICLP), pp. pp. 129-132, 1992.
- [61] S. VISACRO, **“Modelagem de Aterramentos Elétricos,”** Coordenação do Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, (COPPER/UFRJ), 1992.
- [62] A. SOARES; **“Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas,”** Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), 2001.
- [63] A. SOARES; M. A. O. SCHROEDER; and S. VISACRO; **“Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes,”** IEEE Transactions on power delivery, pp. 1447-1452, Abril 2005.
- [64] R. ALÍPIO; M. A. O. SCHROEDER; M. M. AFONSO; and T. A. S. OLIVEIRA; **“Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos de Alta Frequência e Comparação com Resultados Experimentais,”** Revista da Sociedade Brasileira de Automática – Seção: Sistemas de Potência, vol. 22, no. 1, pp. 89–102, Janeiro e Fevereiro, 2011.

- [65] S. VISACRO; R. ALÍPIO; M.H. MURTA, and 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, May 2011.
- [66] R. S. ALÍPIO, 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.
- [67] S. VISACRO; R. ALÍPIO; C. PEREIRA; M. GUIMARÃES and M.A.O. SCHROEDER; **“Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results”**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Feb. 2015, Vol.57(1), pp.121-127.
- [68] R. ALÍPIO; D. CONCEIÇÃO; R.N. DIAS; S. VISACRO; and K. YAMAMOTO; **“The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on The Lightning Performance of Typical Wind-Turbine Grounding Systems,”** in Proc. XIV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA 2017), Natal, Brazil, 2017, pp. 353–358.
- [69] R. F. HARRINGTON; **“Field computation by moment methods”**, New York, 1993.
- [70] B. GUSTAVSEN e A. SEMLYEN, **“Rational Approximation of Frequency domain Responses by Vector Fitting,”** IEEE Trans. on Power Delivery, pp. vol. 14, no. 3, July 1999.
- [71] B. GUSTAVSEN, **“Fast Passivity Enforcement for Pole-Residue Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues,”** IEEE Trans. Power Delivery,, pp. vol. 23, no 4., 2008.
- [72] B. GUSTAVSEN, **“Matrix Fitting Toolbox [Online],”** 2009. [Online]. Available: <https://www.sintef.no/projectweb/vectfit>.
- [73] B. GUSTAVSEN; **“Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices,”** IEEE Trans Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 1093–1098, Oct.2002.
- [74] V. RAKOV, **“Transient Response of a Tall Object to Lightning,”** IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 43, no. 4, pp. 654– 661, Nov. 2001.
- [75] CEMIG, “N.D 3.1 – **“Projetos de Redes de Distribuição”**”, Belo horizonte, 2014.
- [76] R. ALÍPIO, M. H. R. DUARTE, J. C. A. DIAS and A. S. D. MIRANDA, **“Lightning Performance of Transmission Lines Partially Protected by Surge Arresters,”** Xiv Sipda, October 2017.

-
- [77] R. ALIPIO, A. D. CONTI, A. D. MIRANDA e M. T. C. D. BARROS, **“Lightning Strikes to High-Voltage Transmission Lines Including Frequency-Dependent Ground Parameters in the Transmission Line Model,”** *IPST*, 2018.