



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

Tese de Doutorado

Desenvolvimento de Modelo do Sistema de Aterramento de Linhas de Transmissão para Avaliação do Desempenho frente a Descargas Atmosféricas Considerando Elementos Dependentes do Tempo e da Frequência

FELIPE MENDES DE VASCONCELLOS

Salvador – Bahia - Brasil
©Felipe Mendes de Vasconcellos, dezembro de 2020.

Felipe Mendes de Vasconcellos

**Desenvolvimento de Modelo do Sistema de
Aterramento de Linhas de Transmissão para
Avaliação do Desempenho frente a
Descargas Atmosféricas Considerando
Elementos Dependentes do Tempo e da
Frequência**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

Salvador – Bahia
Dezembro de 2020

V331 Vasconcellos, Felipe Mendes de.

Desenvolvimento de modelo do sistema de aterramento de linhas de transmissão para avaliação do desempenho frente a descargas atmosféricas considerando elementos dependentes do tempo e da frequência / Felipe Mendes de Vasconcellos. – Salvador, 2020.

107 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira.
Prof. Dr. Rafael Silva Alípio.

Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2020.

1. Linhas elétricas. 2. Descargas atmosféricas. 3. Aterramento I. Moreira, Fernando Augusto. II. Alípio, Rafael Silva. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 621.319

Felipe Mendes de Vasconcellos

**Desenvolvimento de Modelo do Sistema de
Aterramento de Linhas de Transmissão para
Avaliação do Desempenho frente a
Descargas Atmosféricas Considerando
Elementos Dependentes do Tempo e da
Frequência**

Tese de doutorado aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia.

Banca Examinadora:

Orientador:



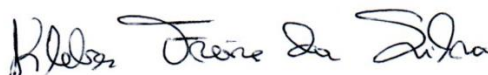
Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira
UFBA

Orientador:



Prof. Dr. Rafael Silva Alípio
CEFET-MG

Membro:



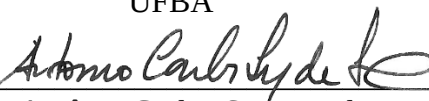
Prof. Dr. Kleber Freire Silva
UFBA



Membro:

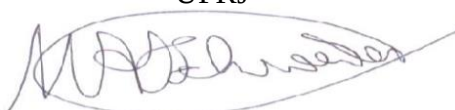
Prof. Dr. Fabiano Fragoso Costa
UFBA

Membro:



Prof. Dr. Antônio Carlos Siqueira de Lima
UFRJ

Membro:



Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder
UFSJ

Salvador, Bahia, 16 de dezembro de 2020.

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu filho Diego e minha esposa Manuella, que viveram a minha ausência durante esta caminhada, com a resignação de que não existem vitórias sem abdicação.

Aos meus pais, Ivan e Fátima, que por terem a visão de que a educação liberta, sempre me incentivaram e me deram todas as oportunidades ao seu alcance.

Agradecimentos

Aos Professores Fernando Augusto Moreira e Rafael Silva Alípio, meus sinceros agradecimentos pela orientação segura e sempre disponível durante o percurso desta tese, e pela oportunidade de trabalhar com um tema tão relevante do ponto de vista científico e técnico. Obrigado por esclarecerem as minhas inúmeras dúvidas sobre aterramentos elétricos, descargas atmosféricas, eletromagnetismo e diversas outras áreas da engenharia elétrica. Definitivamente, os dois foram responsáveis por contribuir expressivamente para minha formação acadêmica e científica.

Agradeço aos Professores Kleber Freire da Silva e Antônio Carlos Siqueira de Lima por aceitarem participar do exame de qualificação (e posterior defesa) desta tese e por suas contribuições e sugestões. Aproveito para agradecer também aos Professores Fabiano Fragoso Costa e Marco Aurélio de Oliveira Schroeder por aceitarem participar da banca da defesa desta tese e por suas futuras contribuições e sugestões, pois tenho certeza de que serão as melhores possíveis.

Gostaria de registrar um agradecimento especial ao Professor Fábio Macedo Velame e ao Sr. Carlos Tadeu de Souza Rodrigues por permitirem que eu me licenciasse do meu cargo de Engenheiro Eletricista da UFBA, a partir de fevereiro deste ano. Apesar de “pouco tempo”, estes dez meses foram essenciais para a conclusão desta tese ainda neste ano.

À Srta Ágatha Sampaio e ao Sr. Jaime Neto, assistentes na secretaria do PPGE-UFBA, que sempre me atenderam com presteza e dedicação.

À minha esposa Manuella Souza, muito obrigado por me dar o suporte e apoio necessários para me dedicar à esta tese, principalmente em tempos de pandemia, mesmo implicando em sobrecarga nas tarefas domésticas e maternas para ela.

Ao meu filho Diego Vasconcellos, por ser fonte de motivação para este e todos os outros projetos de vida/carreira, pois, a partir do seu nascimento, tudo isso é para ele e por ele.

Aos meus pais, Fátima e Ivan, meu muito obrigado também por todo apoio dado, me cedendo espaço de estudo com a tranquilidade necessária para o desenvolvimento desta tese, e me incentivando a me desenvolver sempre.

Ao meu compadre e amigo Yuri Alcântara, pelo seu companheirismo, apoio irrestrito e conselhos “*off-Engenharia*”.

“A mente que se abre para alguma coisa nova, nunca mais será a mesma.”

Albert Einstein

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, com que se sintam humildes.”

Leonardo da Vinci

“Há verdadeiramente duas coisas diferentes: saber e crer que se sabe. A ciência consiste em saber; em crer que se sabe reside a ignorância.”

Hipócrates

“A ciência não é uma ilusão, mas seria uma ilusão acreditar que poderemos encontrar noutro lugar o que ela não nos pode dar.”

Sigmund Freud

“A vida sem ciência é uma espécie de morte.”

Sócrates

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”

Leonardo da Vinci

Resumo

Esta tese é dedicada ao estudo da performance de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Esta se propõe a incluir simultaneamente as características dependentes da frequência e não-lineares dependentes do tempo dos elementos tipicamente envolvidos neste tipo de estudo, com o propósito de estabelecer estratégias consistentes de proteção e minorar o número de desligamentos. Propõe-se um novo modelo para o sistema de aterramento, baseado na teoria de linhas de transmissão, porém que não desconsidera o acoplamento eletromagnético entre os cabos contrapeso paralelamente dispostos, como é feito na maioria dos trabalhos. O modelo é validado computacionalmente comparando-se os resultados com os do *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM), baseado diretamente nas Equações de Maxwell, amplamente utilizado e reconhecido por seu rigor físico. Os resultados obtiveram precisão da ordem de 96,1% a 100% em relação ao HEM, para configurações típicas de aterramento de linhas de transmissão. A partir da realização sistemática de simulações em programas de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo e utilizando o modelo proposto, caracteriza-se também, de forma geral, a influência da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Conclui-se que desprezar esse efeito levaria a estimativas equivocadas do desempenho real da linha, que, quando tomadas como verdade, causariam consequentes erros nas proteções aplicadas a estes sistemas elétricos. Por fim, propõe-se avaliar a eficiência da técnica da proteção parcial de linhas de transmissão por dispositivos para-raios através de uma abordagem inovadora, calculando-se o número de desligamentos por comprimento de linha por ano com a consideração ou não da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. A partir dos resultados encontrados, resta-se comprovada a eficiência da técnica de proteção parcial de linhas de transmissão em manter o desempenho dessas linhas dentro dos requisitos mínimos estabelecidos pelos órgãos reguladores, e, novamente, comprova-se a importância de considerar o efeito dependente da frequência dos parâmetros do solo nas avaliações de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, com o risco de incorrer-se em soluções tecnicamente ineficientes e economicamente dispendiosas.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas, Desempenho de Linhas de Transmissão, Linhas de Transmissão, Transitórios Eletromagnéticos, Sistemas de Aterramento, Dispositivos Para-raios, Efeitos Dependentes da Frequência, Elementos Não-Lineares Dependentes do Tempo.

Abstract

This thesis is dedicated to the study of the lightning performance of transmission lines. It proposes to include both frequency-dependent and non-linear time-dependent characteristics of the elements typically involved in this type of study, to establish consistent protection strategies and reduce the outage rates. A new model for the grounding system is proposed, based on transmission line theory, but not disregarding the electromagnetic coupling between the counterpoise cables arranged in parallel, as most works do. The model is computationally validated comparing the results with those of the Hybrid Electromagnetic Model (HEM), based directly on Maxwell's Equations, widely used and recognized for its accuracy. The results obtained accuracy in the order of 100% to 96.1%, in concern to HEM, for typical configurations of transmission line grounding. From the systematic realization of hybrid time-frequency simulations using the proposed model, it is also characterized, in a general way, the influence of the dependence of the frequency of the soil electrical parameters in the performance of transmission lines against atmospheric discharges. It is concluded that disregarding this effect would lead to wrong estimates of the actual performance of the line, which, when taken as true, would cause consequent errors in the protections applied to these electrical systems. Finally, it is proposed to evaluate the efficiency of the technique of partial protection of transmission lines by lightning devices through an innovative approach, by calculating the number of disconnections per line length per year with consideration or not of the variation of the electrical parameters of the ground with the frequency. Based on the results found, the efficiency of the technique of partial protection of transmission lines in maintaining the performance of these lines within the minimum requirements established by the regulatory agencies is proven, and again the importance of considering the frequency-dependent effect of the soil parameters in evaluating the lightning performance of transmission lines, with the risk of incurring technically inefficient and economically costly solutions.

Palavras-chave: Lightning, Lightning Performance of Transmission Lines, Transmission Lines, Electromagnetic Transients in Power Systems, Grounding Systems, Surge Arresters, Frequency-Dependent Effects, Non-Linear Time-Dependent Elements.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Representação esquemática de uma descarga atmosférica	26
Figura 2.2 - Gráfico Corrente x Tempo de Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo.	27
Figura 2.3 - Gráfico Corrente x Tempo de Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo.	29
Figura 2.4 - Ruptura de isolamento por flashover	32
Figura 2.5 - Ruptura de isolamento por backflashover	33
Figura 2.6 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $0 < Z_{ater} < Z_{torre}$)	34
Figura 2.7 - Característica da suportabilidade elétrica para isolações auto regenerativas.	35
Figura 2.8 - Exemplo de curva tensão-tempo.....	37
Figura 2.9 - Componentes de corrente no solo e circuito equivalente do aterramento. .	40
Figura 2.10 Atenuação e distorção de uma onda de corrente ao longo de um eletrodo.	41
Figura 2.11 - Característica tensão-corrente de um dispositivo para-raios.	43
Figura 2.12 - Característica tensão-corrente de resistores não lineares de ZnO.....	44
Figura 3.1- Geometria da torre de transmissão e disposição dos condutores.....	49
Figura 3.2 - Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica e da existência de torres adjacentes.	50
Figura 3.3- Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas pela soma de sete funções de Heidler obtidas no software ATP.....	52
Figura 3.4 - Desenho ilustrativo do modelagem da torre, com as impedâncias equivalentes de cada trecho.	55
Figura 3.5 - Representação do modelo proposto pelo IEEE.....	55
Figura 3.6 - Relação $V \times I$ para os resistores não lineares do modelo proposto pelo IEEE.	57
Figura 3.7- Configuração típica do aterramento de torres de transmissão autoportantes.	60
Figura 3.8- Comportamento da impedância harmônica do sistema de aterramento	67
Figura 4.1- Circuito de simulação da incidência de descarga atmosférica em linha de transmissão.	72

Figura 4.2 – Sobretensões simuladas comparando a modelagem por LT com acoplamento eletromagnético x HEM, conforme condições base na incidência de uma primeira descarga de retorno para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 300\Omega.m$ e $L = 20m$; (b) $\rho_0 = 500\Omega.m$ e $L = 30m$; (c) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (d) $\rho_0 = 3000\Omega.m$ e $L = 60m$; (e) $\rho_0 = 5000\Omega.m$ e $L = 80m$, (f) $\rho_0 = 10000\Omega.m$ e $L = 130m$	74
Figura 4.3 – Sobretensão simulada na fase A conforme condições base na incidência de uma primeira descarga de retorno para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 300\Omega.m$ e $L = 20m$; (b) $\rho_0 = 500\Omega.m$ e $L = 30m$; (c) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (d) $\rho_0 = 3000\Omega.m$ e $L = 60m$; (e) $\rho_0 = 5000\Omega.m$ e $L = 80m$, (f) $\rho_0 = 10000\Omega.m$ e $L = 130m$	77
Figura 4.4 – Efeito disruptivo calculado para na fase A conforme condições base na incidência de uma primeira descarga de retorno para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 300\Omega.m$ e $L = 20m$; (b) $\rho_0 = 500\Omega.m$ e $L = 30m$; (c) $\rho_0 = 100\Omega.m$ e $L = 40m$; (d) $\rho_0 = 3000\Omega.m$ e $L = 60m$; (e) $\rho_0 = 5000\Omega.m$ e $L = 80m$, (f) $\rho_0 = 10000\Omega.m$ e $L = 130m$	80
Figura 4.5– Probabilidade de Disrupção da Cadeia de Isoladores em função do arranjo do aterramento, para primeiras descargas de retorno.	82
Figura 4.6– Sobretensões nas fases B (esq.) e A (dir.) com para-raios instalados na fase A, para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (b) $\rho_0 = 3.000\Omega.m$ e $L = 60m$; (c) $\rho_0 = 5.000\Omega.m$ e $L = 80m$, (d) $\rho_0 = 10.000\Omega.m$ e $L = 130m$	88
Figura 4.7 - Sobretensões nas fases C (esq.) e B (dir.) com para-raios instalados na fase A e B, para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (b) $\rho_0 = 3.000\Omega.m$ e $L = 60m$; (c) $\rho_0 = 5.000\Omega.m$ e $L = 80m$, (d) $\rho_0 = 10.000\Omega.m$ e $L = 130m$	90

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Densidades de descargas para o solo típicas de algumas regiões do mundo.	29
Tabela 2.2- Parâmetros de primeiras descargas.....	31
Tabela 3.1– Parâmetros utilizados para sintetizar as primeiras descargas de retorno medidas na estação de Morro do Cachimbo.	52
Tabela 4.1- Comprimentos típicos de cabos contrapeso em função da resistividade do solo.	71
Tabela 4.2 – Parâmetros das descargas utilizadas nas simulações	71
Tabela 4.3 – Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores A simuladas considerando a modelagem desenvolvida (LTAEM) e o modelo HEM conforme condições base e incidência de primeiras descargas de retorno.	75
Tabela 4.4 – Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores da fase A simulado conforme condições base e incidência de primeiras descargas de retorno.....	78
Tabela 4.5 – Amplitudes das Correntes de Descarga Críticas para primeiras descargas de retorno, conforme aplicação do método DE.....	81
Tabela 4.6 - Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores para primeiras descargas de retorno, conforme aplicação do método DE.	82
Tabela 4.7 – Taxa de desligamento por <i>backflashover</i> esperada considerando os parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência e diversas distribuições de resistividade de solo ao longo das linhas.....	83
Tabela 4.8- Valores típicos de desligamentos/100 km/ano considerados “aceitáveis” na prática de projetos de Linhas de Transmissão que atendam consumidores comuns (DIAS, 2006).....	84
Tabela 4.9 - Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores da fase A (esq.) e B (dir.) simulado conforme condições base, incidência de primeiras descargas de retorno, sem proteção por dispositivo para-raios (esq.) e com proteção parcial da fase A (dir.).	89
Tabela 4.10 - Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores da fase A (esq.), B(centro) e C (dir.) simulado conforme condições base, incidência de primeiras descargas de retorno, sem proteção por para-raios e com proteção parcial por dispositivo para-raios na fase A (centro) e nas fases A e B (dir.).....	91

Tabela 4.11 - Amplitudes das Correntes de Descarga Críticas para primeiras descargas, conforme método DE e considerando a linha de transmissão ora desprotegida e ora protegida parcialmente.	91
Tabela 4.12 - Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores, para primeiras descargas, segundo o método DE e considerando a linha de transmissão ora desprotegida e ora protegida parcialmente.....	92
Tabela 4.13 - Desempenho frente a descargas atmosféricas esperado considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência, diversas distribuições de resistividade de solo ao longo da linha e considerando a linha de transmissão ora desprotegida e ora protegida parcialmente.	92

Lista de Acrônimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transients Program
BIL	Basic Impulse Level
CAA	Cabo de Aluminíno com Alma de Aço
EHS	Extra High Strength
CC	Corrente contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CFO	Critical Flashover Voltage
CIGRÈ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DE	Disruptive Effect
EMTP	Electromagnetic Transients Program
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FDTD	Finite-difference Time-domain Method
MATLAB	Matrix Laboratory
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MPM	Matrix Pencil Method
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PSCAD	Power Systems CAD

Sumário

Dedicatória.....	5
Agradecimentos	6
Resumo	8
Abstract.....	9
Lista de Ilustrações	10
Lista de Tabelas	12
Lista de Acrônimos.....	14
Sumário.....	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E MOTIVAÇÕES	17
1.2 OBJETIVO GERAL	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	20
1.5 LISTA DE PUBLICAÇÕES.....	21
1.5.1 Produções Científicas Associadas a Este Trabalho	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE	23
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.2.1 Descargas atmosféricas.....	26
2.2.2 Interação entre as linhas de transmissão e as descargas atmosféricas ..	31
2.2.3 Suportabilidade elétrica de isoladores submetidos a impulsos atmosféricos	35
2.2.4 Sistemas de aterramento em torres de linhas de transmissão	38
2.2.5 Comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas.....	39
2.2.6 Para-raios	43
3 METODOLOGIA E MODELAGENS ADOTADAS NO ESTUDO.....	47
3.1 CONDIÇÕES BASE PARA SIMULAÇÃO	49
3.2 MODELO DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	50

3.3	MODELO DA TORRE DE TRANSMISSÃO	53
3.4	MODELO DO PARA-RAIOS	55
3.5	MODELO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA.....	57
3.6	MODELO DA LINHA DE TRANSMISSÃO	58
3.7	MODELO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO	60
3.8	MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DISRUPTIVO NA CADEIA DE ISOLADORES	67
3.9	MÉTODO PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE DESLIGAMENTOS POR BACKFLASHOVER EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	68
4	RESULTADOS	70
4.1	VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO ATERRAMENTO PROPOSTA.....	73
4.2	SOBRETENSÕES RESULTANTES NAS CADEIAS DE ISOLADORES	75
4.3	DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	78
4.4	LINHAS DE TRANSMISSÃO PARCIALMENTE PROTEGIDAS POR DISPOSITIVOS PARA-RAIOS	85
4.4.1	Sobretensões Resultantes nas Cadeias de Isoladores.....	87
4.4.1.1	Para-raios instalado na fase A.....	87
4.4.1.2	Para-raios instalados nas fase A e B	89
4.4.2	Desempenho da Linha de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas	
	91	
5	CONCLUSÕES.....	94
5.1	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E MOTIVAÇÕES

Linhas de transmissão são componentes essenciais no fornecimento de energia elétrica. Em um país com extensão continental, como o Brasil, essa importância faz-se ainda superior. Por conseguinte, é primordial assegurar a maior continuidade possível do funcionamento dessas linhas. Nesse contexto, as descargas atmosféricas apresentam-se como a maior ameaça a essa continuidade, sendo responsáveis por mais de 75% dos desligamentos não programados em linhas de transmissão brasileiras (PEDROSA, 2013).

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão causa sobretensões elevadas nos terminais dos seus isoladores. Essas sobretensões podem ocasionar a ruptura do isolamento da linha, conectando eletricamente a torre aterrada e um dos condutores de fase provocando um curto-circuito o que resulta no seu desligamento. Tais sobretensões acontecem principalmente quando a incidência da descarga atmosférica na linha é direta. Essas rupturas de isolamento da linha podem ser classificadas como descargas disruptivas no isolamento (*flashover*) ou descargas disruptivas de retorno (*backflashover*), sendo a última o principal motivo de desligamentos em linhas de transmissão para classes de tensão abaixo de 500 kV (PEDROSA, 2013).

Com a finalidade de determinar técnicas para mitigar os efeitos da incidência de descargas em linhas de transmissão, as simulações computacionais exercem um papel importante, com destaque para os *softwares* de cálculo no domínio do tempo, nomeadamente os programas ATP (EEUG, 2020), EMTP-RV (EMTP ALLIANCE, 2020) e PSCAD (MANITOBA HYDRO INTERNATIONAL LTD., 2020). Neste contexto, é de primordial relevância a rigorosa modelagem dos componentes do sistema elétrico, considerando que o fenômeno se trata de uma solicitação impulsiva, com amplo espectro de frequências associado. Contudo, as plataformas citadas não dispõem de modelos adequados para os sistemas de aterramento das torres das linhas de transmissão, visto que o comportamento destes sistemas é fortemente dependente da frequência (ALÍPIO, 2008).

Uma grande quantidade de trabalhos na literatura que analisam o desempenho de linhas de transmissão quando atingidas por descargas atmosféricas, utilizando as plataformas mencionadas, faz o uso de uma representação bastante simplória do

aterramento – um resistor linear com resistência igual ao valor da resistência de aterramento em baixas frequências (VISACRO, 2005; CIGRÉ, 1991; MARTINEZ e CASTRO-ARANDA, 2005; AMETANI e KAWAMURA, 2005). Porém, levando em conta o espectro de frequências das descargas atmosféricas, geralmente na faixa de 0 Hz até alguns MHz, a modelagem do sistema de aterramento em programas desse tipo pode provocar resultados incorretos nas simulações. Tal circunstância pode promover estratégias de proteção ineficazes ou ineficientes, as quais podem resultar em diversas consequências. Merecem ser destacadas as seguintes:

- Custos em função de avarias ou destruição de componentes da linha de transmissão submetidos a sobretensões relacionadas às descargas atmosféricas;
- Desligamento do sistema elétrico em razão da incidência de descargas atmosféricas, provocando graves problemas de ordem econômica e social. A ausência de fornecimento de energia é capaz de, por exemplo, ocasionar a parada de processos industriais e, igualmente, prejudicar o funcionamento de equipamentos de saúde e de segurança que atendem à população;
- Custos excedentes resultantes do superdimensionamento do sistema de aterramento das linhas de transmissão, em consequência da falta de compreensão do comportamento do sistema frente a descargas atmosféricas.

A elucidação das complicações mencionadas previamente constitui a motivação fundamental da presente tese. Ademais, a diminuição de custos em geral e do número de desligamentos do sistema elétrico englobam justificativas técnicas, econômicas e sociais relevantes. De forma complementar, os resultados do desenvolvimento desta tese irão preencher uma lacuna da literatura especializada, o que representa motivação e justificativa científicas.

Nesse cenário, a presente tese propõe-se a gerar uma contribuição inovadora na simulação de transitórios, com destaque para aqueles resultantes de descargas atmosféricas, com a inclusão simultânea de elementos e efeitos dependentes do tempo e da frequência. Os resultados alcançados vão propiciar a realização de avaliações mais precisas e o estabelecimento de técnicas confiáveis para a redução de desligamentos e melhoria da qualidade da energia fornecida.

1.2 OBJETIVO GERAL

Esta tese tem como objetivo desenvolver uma modelagem original do sistema de aterramento de linhas de transmissão para a avaliação de do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas através de simulações incluindo simultaneamente elementos e/ou efeitos não lineares que variam com o tempo, tais como dispositivos para-raios, e efeitos e/ou elementos que variam com a frequência, como o comportamento impulsivo do sistema de aterramento e a variação dos parâmetros elétricos do solo. Os resultados obtidos vão permitir a realização de análises rigorosas e a definição de práticas confiáveis para a redução de desligamentos e melhoria do desempenho do sistema elétrico.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desse trabalho:

- Desenvolver uma modelagem do sistema de aterramento de linhas de transmissão no domínio da frequência (0 Hz até cerca de 10 MHz), incluindo o fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo;
- Utilizar uma modelagem dinâmica no domínio do tempo de elementos não lineares dependentes do tempo (para-raios);
- Implementar simulações em programas de cálculo de transitórios no domínio do tempo, com a inclusão simultânea dos modelos desenvolvidos de elementos e/ou fenômenos dependentes do tempo e da frequência;
- Executar simulações sistemáticas, considerando as modelagens desenvolvidas, com o objetivo de realizar análises de sensibilidade no estudo da avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas;
- Estabelecer, a partir dos resultados gerados, práticas de proteção eficientes de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em cinco capítulos, contando com esse introdutório ao tema central deste trabalho, de forma a proporcionar ao leitor uma sequência lógica dos tópicos, com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2:
 - Subcapítulo 2.1, realiza-se a revisão da literatura e estado da arte, o qual é relevante no sentido de estruturar, analisar e estabelecer um rumo a seguir para alcançar a proposta do modelo tempo-frequência do sistema de aterramento das torres de transmissão de energia elétrica para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas;
 - Subcapítulo 2.2, da fundamentação teórica, descreve o fenômeno das descargas atmosféricas, as interações entre linhas de transmissão e estas descargas, a suportabilidade elétrica de isoladores, o sistema de aterramento e seu comportamento impulsivo, enfatizando o fenômeno da variação dos parâmetros do solo com a frequência e por último os dispositivos para-raios.
- No Capítulo 3 é exposta detalhadamente a metodologia que foi utilizada para o desenvolvimento das simulações, compreendendo as etapas básicas destas, as condições base adotadas nas simulações computacionais e as modelagens dos componentes do sistema simulado, que foram desenvolvidas e/ou adotadas, cada uma com sua análise crítica, com o intuito de se realizar avaliações dos transitórios de origem atmosférica suficientemente fidedignas aos aspectos físicos dos fenômenos envolvidos;
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados da validação do novo modelo desenvolvido para o sistema de aterramento de linhas de transmissão, e aplicação deste no estudo da performance de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Por fim, a eficiência da técnica da proteção parcial de linhas de transmissão por dispositivos para-raios é investigada, utilizando como base os casos simulados anteriormente.

- No Capítulo 5 são destacadas as principais realizações e contribuições deste trabalho e apresentadas as propostas de continuidade.

1.5 LISTA DE PUBLICAÇÕES

1.5.1 Produções Científicas Associadas a Este Trabalho

- I. VASCONCELLOS, F. M.; ALÍPIO, R.S.; MOREIRA, F. A. *Grounding modeling using transmission line theory considering the electromagnetic coupling of arrangements with multiple electrodes*. **Artigo em produção a ser submetido para o periódico *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*.**
- II. VASCONCELLOS, F. M.; ALÍPIO, R.S.; MOREIRA, F. A. *The impact of frequency dependence of transmission line grounding systems on the resulting overvoltages of the insulator strings and on the design of these systems*. **Artigo em produção a ser submetido para o periódico *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, a convite da Coordenação Geral do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2020.**
- III. VASCONCELLOS, F. M.; ALÍPIO, R.S.; MOREIRA, F. A. *Assessment of the Lightning Performance of Typical Brazilian Transmission Lines Partially Protected by Surge Arresters Considering the Frequency-Dependent Behavior of Grounding*. **Artigo submetido para o International Conference on Power Systems Transients – IPST 2021 (todos os artigos serão publicados no periódico *Electric Power Systems Research*).**
- IV. VASCONCELLOS, F. M.; MOREIRA, F. A.; ALÍPIO, R.S. *A Influência do Efeito Dependente da Frequência dos Parâmetros Elétricos do Solo sobre o Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas*. In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática, 2020, Porto Alegre (virtual).
- V. BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V.; VASCONCELLOS, F. M. *Avaliação da Resposta em Frequência de Aterramentos Considerando Solo com Parâmetros Dependentes da Frequência Utilizando o MEF*. In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática, 2020, Porto Alegre (virtual).
- VI. VASCONCELLOS, F. M.; MOREIRA, F. A.; ALÍPIO, R.S. *The Impact of the Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on Lightning Overvoltages Developed in a 138 kV Transmission Line*. In: VIII Simpósio Brasileiro de

Sistemas Elétricos, 2020, Santo André (virtual). **Trabalho premiado com carta convite para publicação no periódico publicado pela Sociedade Brasileira de Automática - *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*.**

- VII. VASCONCELLOS, F. M.; MOREIRA, F. A. *The Impact of Including the Frequency Dependence of Soil Parameters on Lightning Overvoltages in a 138-kV Transmission Line. In: XIII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE), 2019, Santiago.*
- VIII. VASCONCELLOS, F. M.; MOREIRA, F. A. *The Influence of Frequency Dependence of Soil Parameters on Lightning Overvoltages in a 138-kV Transmission Line. In: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2019, São Caetano do Sul.*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

Considerando a enorme quantidade de trabalhos relacionados na literatura que tratam do tema alvo desta tese, neste subcapítulo é apresentada uma revisão bibliográfica das principais contribuições encontradas nas produções com um panorama geral das diferentes metodologias aplicadas a avaliação de transitórios eletromagnéticos de origem atmosférica em sistemas elétricos de potência.

Como referência, uma extensa quantidade de trabalhos aborda o cálculo da resposta transitória de origem atmosférica em sistemas elétricos utilizando ferramentas de cálculo de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo do tipo EMTP considerando a representação do sistema de aterramento das torres de transmissão por meio de uma resistência simples, de valor típico arbitrário, sem ter em conta seu comportamento dependente da frequência, o que pode levar a erros grosseiros nos resultados obtidos (AMETANI e KAWAMURA, 2005; HAYASHI, MIZUNO e NAITO, 2008; MUNUKUTLA, VITTAL, *et al.*, 2010; TAKAMI, OKABE e ZAIMA, 2010; BABAEI, BABAEI e NIASATI, 2013).

Ao se prosseguir a revisão bibliográfica, são encontrados também muitos trabalhos que utilizam modelagens do aterramento de sistemas elétricos considerando seu comportamento dependente da frequência (através de resistências, condutâncias indutâncias e capacitâncias), porém a maioria dos trabalhos que abordam a resposta transitória de origem atmosférica em sistemas elétricos despreza a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo e assume que estes são constantes (SUNDE, 1968; VERMA e MUKHEDKAR, 1980; MELIOPOULOS e MOHARAM, 1983; MAZZETTI e VECA, 1983; PAPALEXOPOULOS e MELIOPOULOS, 1987; RAMAMOORTY, NARAYANAN, *et al.*, 1989; XIONG e DAWALIBI, 1994; OLSEN e WILLIS, 1996; GRCEV e HEIMBACH, 1997; GERI, 1999; LORENTZOU, HATZIARGYRIOU e PAPADIAS, 2003; HE, GAO, *et al.*; GRCEV e POPOV; LIU, THEETHAYI e THOTTAPPILLIL, 2005). Via de regra, o valor assumido para a resistividade do solo é aquele medido por instrumentos convencionais, que aplicam sinais de baixa frequência (~100 Hz) ao solo (VISACRO, 2005). Consoante a uma abordagem

semelhante, adota-se um valor de permissividade relativa do solo entre 4 e 81, determinada pela umidade deste (VISACRO, 2005).

Particularmente, deve-se destacar que em duas publicações, Leonid Grcev apresentou uma série de resultados de simulação do comportamento impulsivo de eletrodos (GRCEV, 2009) e malhas de aterramento (GRCEV, 2011). Com base nesses resultados, instituiu-se um conjunto de conclusões relativas a critérios importantes na descrição do comportamento transitório de aterramentos elétricos, por exemplo, o coeficiente de impulso (relação entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento), a área efetiva (malhas de aterramento) e o comprimento efetivo (eletrodos de aterramento). Em todas as simulações, assumiu-se uma permissividade relativa com valor igual a 10 e um valor constante de resistividade, ambos independentes da frequência (GRCEV, 2009, 2011). Todavia, os resultados experimentais relatados no capítulo 3 de Alípio (2013) comprovam que ao assumir incorretamente que os parâmetros elétricos do solo são constantes gera erros consideráveis no cálculo da resposta impulsiva do aterramento. Isso aponta que, embora cautelosos, os resultados apresentados contêm desvios.

É também importante ressaltar, em mais uma contribuição do pesquisador Leonid Grcev (2009), a apresentação de uma abordagem para análise simultânea de efeitos dependentes do tempo e da frequência em eletrodos de aterramento. Porém, o método é válido apenas para solos de resistividade inferior a $1000 \Omega.m$ (em algumas regiões do Brasil, como Minas Gerais, é comum valores bastante superiores) e despreza a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. Outros trabalhos também apresentam abordagem semelhante, com a inclusão simultânea de efeitos dependentes da frequência e do tempo para os sistemas de aterramento de sistemas elétricos, mas em todos eles a variação da resistividade e permissividade do solo com a frequência é desprezada. (ARANEO, MACCIONI, *et al.*; MOKHTARI, ABDUL-MALEK e SALAM, 2015; MASLOWSKI, ZIEMBA, *et al.*, 2016; GRCEV, KUHAR, *et al.*, 2018)

Uma grande quantidade de produções científicas relevantes utiliza abordagem através de teoria de campos eletromagnéticos no domínio do tempo, usualmente o Método das Diferenças Finitas no Domínio de Tempo (FDTD), para avaliação de transitórios de origem atmosféricas em sistemas elétricos de potência, mas que não consideram, por exemplo, dependência da frequência do meio (resistividade e permissividade do solo, por exemplo (TAFLOVE e HAGNESS, 2005; YAMAMOTO, YANAGAWA, *et al.*, 2010; AHMED e ISHII, 2012; OTANI, BABA, *et al.*, 2014; XIONG, CHEN, *et al.*, 2014).

Da análise do artigo produzido por Alemi e Sheshyekani (2015), pode-se observar que é incluído no EMTP o comportamento dependente da frequência do aterramento, via um modelo no espaço de estados. Em seguida, um método modificado do *Matrix Pencil Method* (MPM) é utilizado para a identificação de resíduos e polos da matriz de admitância do sistema de aterramento, representando-a como um bloco de espaço de estado no domínio do tempo. Ainda, tal efeito não é considerado no modelo de linha de transmissão utilizado, o que leva a erros em caso de solos de alta resistividade.

Cabe destacar os trabalhos que incluíram elementos não lineares dependentes do tempo, nestes casos o uso de pára-raios, na avaliação dos transitórios eletromagnéticos provenientes de descargas atmosféricas, mas que apesar deste avanço, desprezaram o uso de modelos mais rigorosos e sofisticados para o aterramento dos sistemas elétricos, como os que consideram seu comportamento impulsivo dependente da frequência (REN, WU, *et al.*, 2006; FEKETE, NIKOLOVSKI, *et al.*, 2010; NOR HASSAN, ABU BAKAR, *et al.*, 2012; MARIUT e HELEREA, 2014; KUSUMA, PRAMANA, *et al.*, 2016).

Nos trabalhos de Silveira e colaboradores (2014), Visacro & Silveira (2015), Koehler e Swingler (2018) e Pedrosa (2010) são avaliadas as tensões induzidas em linhas de transmissão em regiões de solos altamente resistivos, a performance de linhas de transmissão sob condições impulsivas e um modelo prático para sistemas de aterramento de torres de transmissão atingidas por descargas atmosféricas. Em todos estes trabalhos é considerada a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência nas avaliações dos transitórios eletromagnéticos associados, no último inclusive é levada em consideração a ionização do solo, porém nenhum deles incluiu elementos não lineares dependentes do tempo, tais como para-raios.

Nesse contexto, percebe-se que ainda restam lacunas na literatura. Particularmente, as simulações de transitórios eletromagnéticos associados às descargas atmosféricas, em sua maior parte, não consideram conjuntamente os componentes não lineares dependentes do tempo, tais como os para-raios, e os efeitos dependentes da frequência no sistema de aterramento e nos parâmetros elétricos do solo.

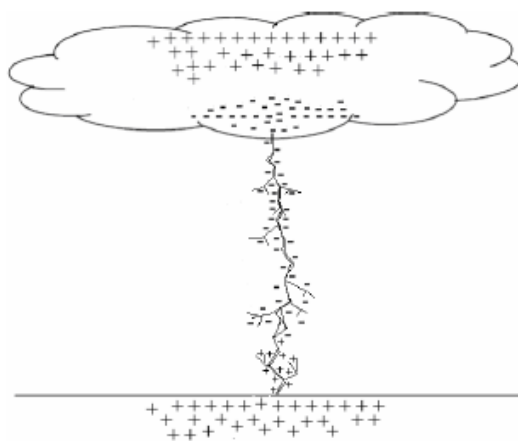
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.2.1 Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas representam a transferência de carga acumulada em nuvens. Podem ocorrer no interior de nuvens (descargas intra-nuvens), entre nuvens, entre a nuvem e a estratosfera, ascendentes entre nuvem e solo, e descendentes entre nuvem e solo (VISACRO, 2005). Nesse trabalho, investiga-se o comportamento de linhas de transmissão submetidas a descargas entre nuvem e solo do tipo descendentes e negativas. Sendo assim, para fins de simplificação, o termo ‘descargas atmosféricas’ apresentado no decorrer desse texto se referem a esse tipo específico de descarga.

As cargas elétricas negativas acumuladas na extremidade inferior de nuvens induzem uma concentração de cargas positivas de mesma magnitude no solo. Esse pareamento de cargas origina um campo elétrico entre a nuvem e o solo de elevada intensidade, que colabora para a criação de canais ionizados descendentes. Caso configure-se um canal ionizado entre a nuvem e a terra, tem-se o fluxo da carga acumulada em direção ao solo por este canal, antes de seu fechamento, o que consiste na descarga atmosférica (IEEE, 1997), e que está representada graficamente na Figura 2.1.

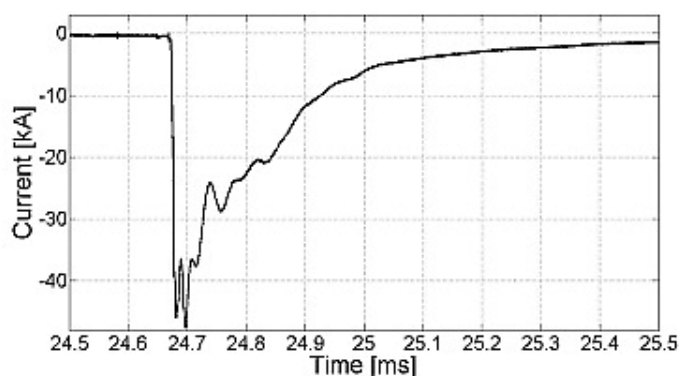
Figura 2.1 - Representação esquemática de uma descarga atmosférica



Fonte: Pinheiro (2008, p. 18)

Esse fenômeno é caracterizado por ondas de corrente de elevada intensidade e curta duração. Uma forma de onda de corrente de uma descarga atmosférica real, medida na estação Morro do Cachimbo é ilustrada na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Gráfico Corrente x Tempo de Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo.



Fonte: VISACRO, VALE, et al. (2010, p. 04)

Nota-se o comportamento impulsivo da onda de corrente da descarga atmosférica. A corrente alcança elevados valores de pico em poucos microssegundos. Em seguida, amplitude da corrente decai de forma mais lenta, até a total extinção da descarga.

2.2.1.1 Primeiras descargas de retorno e descargas e subsequentes

Como exposto anteriormente, as cargas negativas acumuladas na extremidade de nuvens causam o surgimento de um campo elétrico intenso entre nuvem e solo, dando origem a canais ionizados que podem incorrer em descargas atmosféricas. As ondas de corrente que escoam primeiramente por meio destes canais consistem nas primeiras descargas de retorno.

Novas descargas podem, ainda, fluir ao solo a partir do mesmo canal, sendo nomeadas como descargas subsequentes. Essas descargas beneficiam-se do caminho ionizado entre nuvem e solo, e são alimentadas por outros centros de cargas negativas ocasionalmente existentes nas nuvens. As ondas de corrente associadas são, usualmente, mais rápidas, devido ao aproveitamento de um caminho ionizado pré-existente; porém são menos intensas, em razão de, via de regra, estarem associadas a centro de cargas da nuvem de menor intensidade, resultando em um processo de carregamento do canal menos intenso que o processo associado ao canal precursor da primeira descarga (IEEE, 1997).

Descargas subsequentes são fenômenos habituais. A partir de evidências referentes à realidade brasileira, verificou-se que cada canal ionizado esco, em geral, 4,6 descargas

atmosféricas (VISACRO, 2005). De acordo com essas evidências, constatou-se que apenas em 17% dos casos não houve fluxo de descargas subsequentes (CIGRE, 2013).

2.2.1.2 Parâmetros de incidência geográfica

Os parâmetros (ou índices) de incidência geográfica representam a frequência com que as descargas atmosféricas atingem determinado local (ou região). São influenciados por diversos fatores, dentre os quais se destacam a distribuição de chuvas na região, latitude e relevo. Regiões montanhosas e altas, por exemplo, tendem a apresentar índices mais elevados de descargas atmosféricas em relação às regiões mais baixas e planas (SCHROEDER, 2001; RAKOV e UMAN, 2003; VISACRO, 2005).

Historicamente, o primeiro parâmetro de incidência concebido foi o número de trovoadas ouvidas por ano ou nível ceráunico (normalmente, designado por T_d). Como o próprio nome sugere, ele quantifica, simplesmente, o número de dias em um ano em que tempestades com trovoadas são ouvidas. Claramente, trata-se de uma medida rudimentar da atividade de descarga atmosférica de uma determinada região, mas que foi utilizado por bastante tempo.

A posteriori, com a evolução tecnológica, foram desenvolvidas antenas sintonizadas em 10 kHz, com o objetivo de medir o número de descargas atmosféricas por km² por ano. A partir destas medidas, o índice denominado de densidades de descargas atmosféricas para o solo (normalmente, designado por N_g) pôde ser determinado. Tais antenas, designadas contadores de descargas, eram instaladas em regiões estratégicas. A frequência (10 kHz) refere-se à típica dos sinais de campo elétrico característicos de descargas atmosféricas (SCHROEDER, 2001; RAKOV e UMAN, 2003; VISACRO, 2005).

A Tabela 2.1 ilustra as densidades de descargas típicas de algumas regiões do mundo, contabilizadas por este método (SCHROEDER, 2001; VISACRO, 2005).

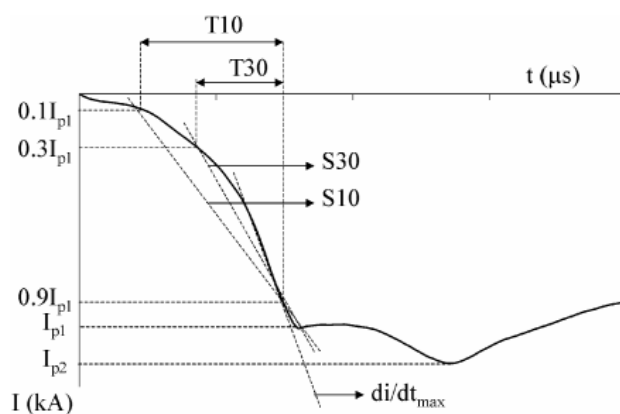
Tabela 2.1 - Densidades de descargas para o solo típicas de algumas regiões do mundo.

Local	Densidade de descargas para o solo (descargas/km ² /ano)
África do Sul	0,5 a 14
Alemanha	1 a 1,5
Austrália	0,2 a 4
Áustria	1 a 6
Brasil (Minas Gerais)	1 a 12
Estados Unidos	0,1 a 14
França	0,5 a 5
Itália	1 a 5
México	1 a 10

É importante destacar que as informações de N_g referem-se às descargas atmosféricas plenas, não fazendo nenhum tipo de distinção de primeiras descargas de retorno e descargas de retorno subsequentes.

2.2.1.3 Parâmetros das correntes de descarga

Apresentadas as características físicas básicas relacionadas às descargas atmosféricas, faz-se necessária a definição de seus parâmetros. Usualmente, os parâmetros de ondas de primeiras descargas de retorno podem ser definidos utilizando a curva estilizada representada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Gráfico Corrente x Tempo de Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo.

Fonte: CONTI e VISACRO (2007, p. 01)

Os parâmetros indicados na figura, que representam o comportamento dessa forma de onda, são apresentados 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);
- T10: tempo compreendido entre os instantes em que a descarga alcança os valores de corrente de 10% e 90% de I_{p1} ;
- T30: tempo compreendido entre os instantes em que a descarga alcança os valores de corrente de 30% e 90% de I_{p1} ;
- S10: taxa média de crescimento da amplitude da corrente de descarga entre 10% e 90% de I_{p1} ;
- S30: taxa média de crescimento da amplitude da corrente de descarga entre 30% e 90% de I_{p1} ;
- $di/dt_{\max}$: inclinação máxima da onda de corrente na frente.

Os parâmetros mencionados são relevantes para se examinar a representatividade dos modelos adotados na literatura, pois propiciam compreender se tais particularidades estão sendo consideradas na onda modelada.

As correntes de descarga são historicamente modeladas de uma maneira bastante simplória, admitindo formas que consideram somente as principais características da descarga real, como o crescimento veloz na frente da onda e a variação relativamente mais lenta após atingir o pico, não representando, por certo, o fenômeno real. Assim, durante os tópicos deste capítulo serão apresentadas as principais representações da onda de corrente utilizadas em plataformas do tipo ATP/EMTP.

2.2.1.4 Particularidades das descargas

O comportamento das descargas atmosféricas é diverso, conforme o tipo de descarga (primeiras descargas de retorno ou subsequentes), características meteorológicas, geográficas, dentre outras. Essas particularidades são refletidas nos parâmetros descritos anteriormente. Destaca-se, ainda, que os parâmetros de descargas atmosféricas não são independentes entre si.

Visacro e outros (2004) publicaram um artigo sobre a análise estatística dos parâmetros de descargas atmosféricas, a partir de medições realizadas na estação do Morro do Cachimbo. A Tabela 2.2 exhibe dados estatísticos dos parâmetros de descargas,

tendo como base funções densidades de probabilidade log-normal, levantados a partir da amostragem de 31 medições de primeiras descargas de retorno, e apresentadas no referido artigo.

Tabela 2.2- Parâmetros de primeiras descargas

Parâmetro da descarga	Percentual de medições que não excedeu os valores apresentados		
	5%	50%	95%
I_{P1} (kA)	22,2	40,4	73,3
I_{P2} (kA)	24,0	45,3	85,2
T_{10} (μ s)	3,1	5,6	9,9
T_{30} (μ s)	1,4	2,9	5,9
T_{cauda} (μ s)	19,7	53,5	145,2
S_{10} (kA/ μ s)	3,5	5,8	9,6
S_{30} (kA/ μ s)	5,1	8,4	13,7
di/dt_{max} (kA/ μ s)	11,9	19,4	31,4

2.2.2 Interação entre as linhas de transmissão e as descargas atmosféricas

Apresentado o fenômeno físico, é fundamental a descrição da forma de interação das linhas de transmissão com esse fenômeno. Como anteriormente relatado, descargas atmosféricas podem prejudicar a operação e a continuidade do funcionamento de linhas de transmissão, tratando-se da razão mais frequente de desligamentos não programados. (PEDROSA, 2013)

Descargas atmosféricas podem incidir em linhas de transmissão de forma direta ou indireta. Quando as descargas atmosféricas atingem os arredores de linhas de transmissão, é constituído um campo eletromagnético que provoca na linha uma força eletromotriz, elevando seu potencial. Essa elevação, contudo, é de baixa amplitude, quando comparada aos casos de incidência direta, de forma que não se configuram como uma ameaça tão significativa para linhas de transmissão, devido às elevadas tensões nominais envolvidas (a partir de 138 kV) e dos níveis de isolamento associados. (VISACRO, 2005). Em razão dos menores níveis de isolamento correspondentes, as linhas de distribuição, tanto em tensão primária, quanto em secundária, são significativamente afetadas por descargas indiretas, através do estabelecimento de sobretensões induzidas.

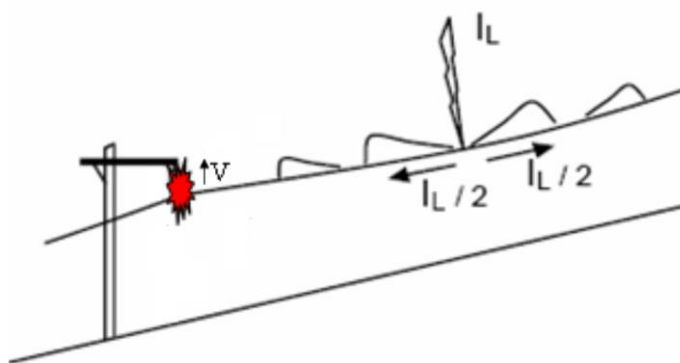
Em contrapartida, a incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão pode ameaçar essa continuidade, em função das amplitudes das sobretensões

causadas por essas correntes de descargas. Adicionalmente, os condutores aéreos e as torres de transmissão tornam-se potencial alvo para incidência das descargas atmosféricas, principalmente pelo fato de linhas de transmissão serem, de forma usual, instaladas em campo aberto. (VISACRO, 2005)

2.2.2.1 Flashover e Backflashover

O *Flashover* ou Descarga Disruptiva Direta é a falha no isolamento que pode ser relacionada à incidência de uma descarga atmosférica em um cabo condutor energizado de uma linha de transmissão. Este tipo de incidência pode ocorrer em linhas de transmissão que não possuam cabos para-raios dispostos adequadamente ou para incidências laterais, caso haja falha na blindagem, conforme representado na Figura 2.4 (CUNHA, 2010).

Figura 2.4 - Ruptura de isolamento por flashover



Fonte: Cunha (2010, p. 09)

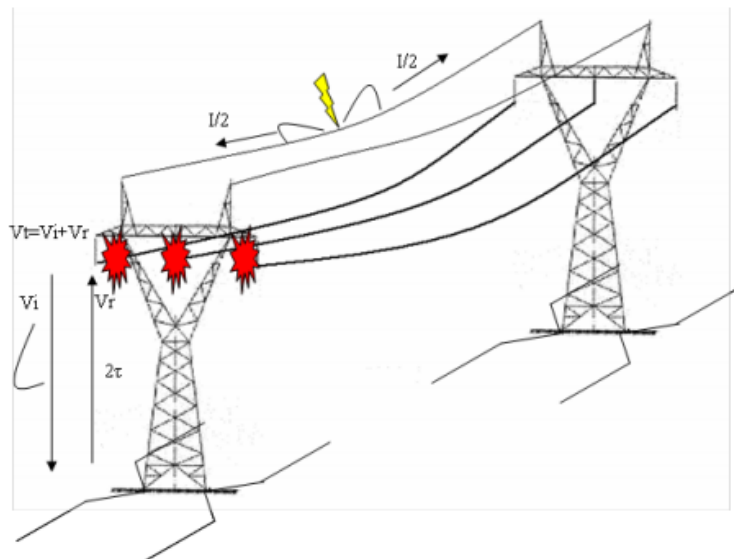
Nas situações em que ocorrem este tipo de incidência de descarga têm-se o estabelecimento de elevados níveis de sobretensão entre os condutores energizados da linha de transmissão e a terra.

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

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

Mesmo com a instalação dos cabos de blindagem, ainda existe a possibilidade de haver ruptura do isolamento quando uma descarga atmosférica atinge os condutores de blindagem ou o topo da torre, como pode-se observar da Figura 2.5, esse fenômeno é conhecido como descarga disruptiva de retorno ou *backflashover* (CUNHA, 2010).

Figura 2.5 - Ruptura de isolamento por backflashover



Fonte: Cunha (2010, p. 10)

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

$$\Gamma = \frac{Z_g - Z_t}{Z_g + Z_t} \quad (2.1)$$

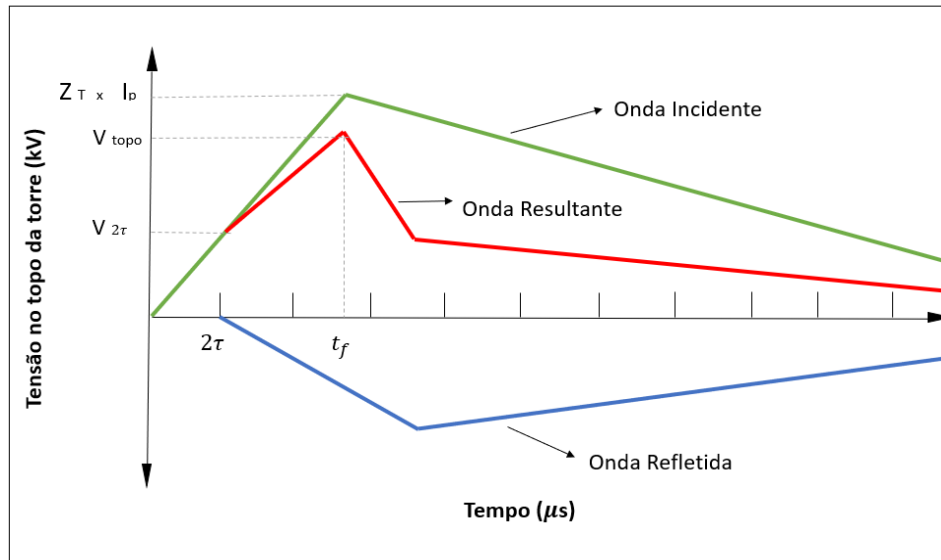
$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad (2.2)$$

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 ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $0 < Z_{\text{ater}} < Z_{\text{torre}}$)



Fonte: Miranda (2019, p. 19)

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 (VISACRO, 2005):

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), mais significativa é a redução da taxa de crescimento das sobretensões nas cadeias de isoladores e menor será também a probabilidade de ocorrência de ruptura do

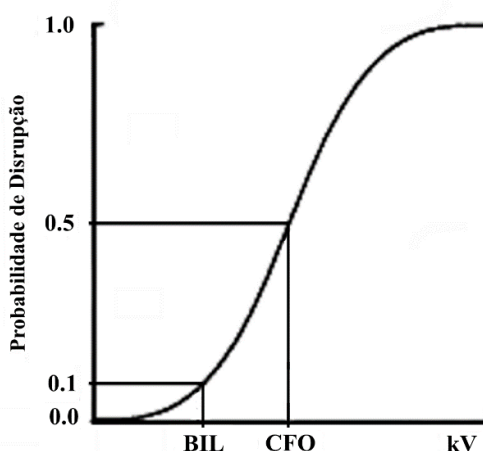
isolamento da linha, considerando ondas de corrente típicas de primeiras descargas de retorno.

2.2.3 Suportabilidade elétrica de isoladores submetidos a impulsos atmosféricos

A suportabilidade elétrica a impulso atmosférico é tipicamente determinada por intermédio da utilização do CFO (*Critical Flashover Overvoltage*). No caso de sistemas de isolamento elétrica auto-recuperantes, como é o arranjo isolante típico de linhas de transmissão, o CFO representa o valor de pico da onda impulsiva padrão de tensão que, ao solicitar o isolador, representa uma probabilidade de 50% de ocorrência de disrupção. Por consequência, quando a isolamento fica submetida a tensões impulsivas padronizadas com valor de pico igual ao CFO deverá ocorrer a disrupção em metade do número de impulsos aplicados. Aplicando este conceito, a suportabilidade elétrica a impulso atmosférico pode ser caracterizada estatisticamente por uma distribuição gaussiana cumulativa tendo um valor médio igual ao CFO, conforme representado na Figura 2.7. O desvio padrão associado fica compreendido entre 1% e 3% do valor do CFO.

Na Figura 2.7, o nível básico de isolamento (BIL-*Basic Impulse Lightning Level*) estatístico corresponde ao valor de crista do impulso atmosférico padrão para o qual a isolamento possui uma probabilidade de 90% de suportabilidade e a consequente probabilidade de 10% de ocorrência de falha.

Figura 2.7 - Característica da suportabilidade elétrica para isolações auto regenerativas.



Fonte: Adaptada de Hileman (1999, p. 14)

O valor do CFO é tradicionalmente determinado com o emprego do método de acréscimos e decréscimos (*up and down*) (HILEMAN, 1999). A metodologia experimental para execução do método *up and down* consiste nos seguintes passos:

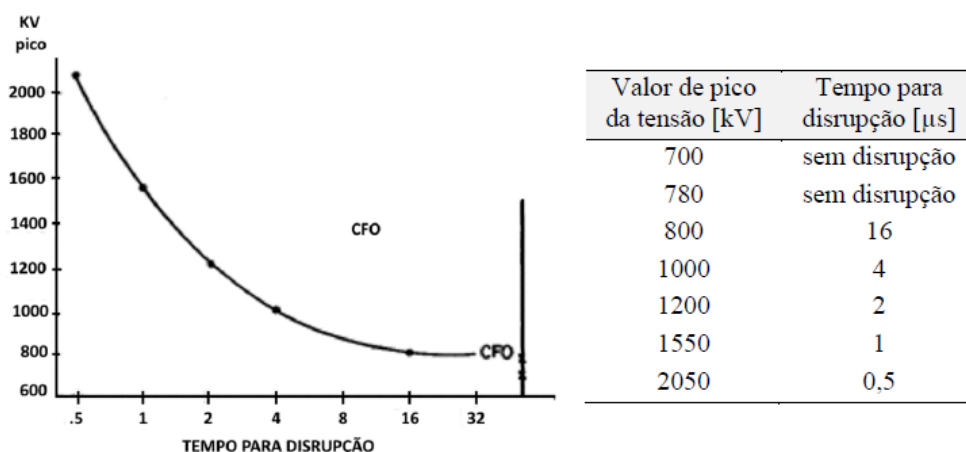
i. Eleger um valor inicial estimado para o CFO, levando em consideração o arranjo isolante e os valores de tensão disruptiva determinados com a aplicação de impulsos preliminares.

ii. Aplica-se um impulso com amplitude da tensão igual ao valor do CFO estimado. Em caso de disrupção, reduz-se o valor da tensão em 3% e aplica-se um novo impulso. Caso não aconteça a disrupção, aumenta-se a tensão em 3% e aplica-se um novo impulso.

iii. Este procedimento é realizado por até 50 aplicações de impulso até a obtenção do valor do CFO. Como critério de confiabilidade do valor do CFO obtido nos testes *up and down* foi considerado o desvio padrão dos valores de tensão disruptiva observado nos testes de impulso. Desta maneira, o teste é concluído ao passo que o valor do CFO obtido alcance um valor de desvio padrão inferior a 1,3%.

Além do habitual uso do CFO, o comportamento de suportabilidade de isoladores pode ser caracterizado de forma mais abrangente através da verificação da curva tensão-tempo. A curva V-t (*Voltage-Time curve ou time-lag curve*) é constituída por um conjunto de pares de pontos formados pelos valores máximos de tensão impulsiva padrão aplicada e pelos instantes de tempo de ocorrência da disrupção, verificados através da realização de ensaios com impulso atmosférico aplicado à isoladores para determinação da suportabilidade elétrica.

A metodologia experimental para a determinação da curva V-t baseia-se na aplicação sucessiva de tensões impulsivas com amplitudes gradualmente crescentes, registrando-se os instantes de tempo de disrupção. Estas curvas são tipicamente auferidas com aplicação de tensões impulsivas com forma de onda padrão a arranjos isolantes auto-recuperantes. A Figura 2.8 ilustra uma curva V-t típica extraída de Hileman (1999). Observa-se que a curva V-t tende a ficar plana próximo ao instante de tempo de 16 μ s. O valor assintótico da curva é igual ao CFO. Para isoladores de ar, o valor do CFO ocorre próximo ao instante de tempo de 16 μ s. É possível que ocorram disrupções em instantes de tempo superiores a este, mas o valor de pico da tensão de impulso será próximo ao valor de pico da tensão para o instante de tempo de 16 μ s, que é o CFO.

Figura 2.8 - Exemplo de curva tensão-tempo.

Fonte: Adaptada de Hileman (1999, p. 67)

Apesar da utilização das curvas V-t para avaliar a ocorrência de ruptura do isolamento ser mais consistente do que a simples comparação com um valor de referência (CFO), deve-se destacar que elas só descrevem o comportamento de isoladores de forma fidedigna caso eles sejam submetidos a tensões impulsivas padronizadas, como por exemplo a onda com formato padrão 1,2/50 μs, definida assim por alcançar seu valor máximo em 1,2 μs e decair para metade deste valor em 50 μs (ALVAREZ, 2011).

Assim sendo, caso seja necessário avaliar a resposta de um isolador quando sujeito a ondas de tensão não padronizadas, a exemplo daquelas decorrentes da ocorrência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, curvas V-t determinadas em ensaios padronizados não podem ser aplicadas diretamente.

Uma maneira de evitar as restrições mencionadas compreende em aplicar técnicas que possibilitam a avaliação do comportamento de isoladores frente a solicitações impulsivas com parâmetros arbitrários. Dentre essas técnicas, destaca-se o Método do Efeito Disruptivo, também conhecido como Método DE (do inglês, *Disruptive Effect*) (HILEMAN, 1999).

A concepção do Método DE consiste na existência de um efeito disruptivo crítico para cada arranjo de isolador. Cada surto de tensão, da mesma forma, apresenta um efeito disruptivo associado que, caso exceda o efeito disruptivo crítico, propiciará uma descarga disruptiva provocando a ruptura do isolamento. A determinação do efeito disruptivo relativo a um surto compreende o cálculo de uma integral que depende da onda de tensão aplicada e de constantes relacionada ao arranjo de isoladores e que são determinadas experimentalmente. O efeito disruptivo crítico da isolação também é determinado

experimentalmente e é considerado um parâmetro intrínseco ao arranjo ensaiado. A maior restrição relativa ao Método DE é que, geralmente, este apresenta resultados adequados apenas se aplicado para avaliar o desempenho de isoladores frente a sobretensões com polaridade única e/ou que não apresentem natureza oscilatória significativa.

2.2.4 Sistemas de aterramento em torres de linhas de transmissão

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

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

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

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

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

- Tornar a impedância de aterramento mais baixa possível para as correntes provenientes de falta à terra;
- Manter potenciais produzidos por correntes de falta entre valores que não provoquem a fibrilação do coração humano;

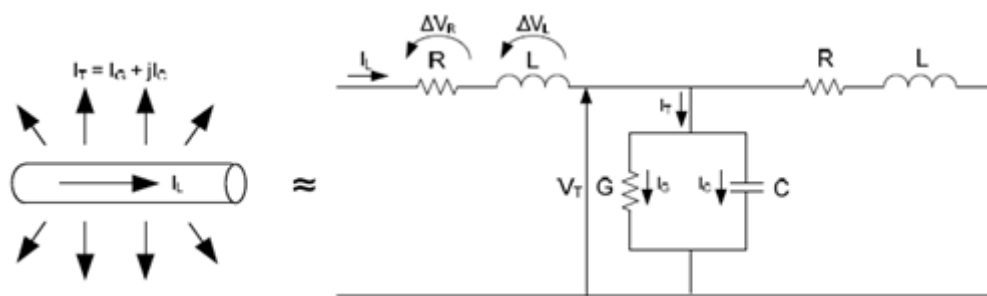
- Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e atuem de forma a isolar rapidamente as faltas à terra;
- Propiciar um caminho adequado para escoar à terra correntes de descargas atmosféricas (KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

A resistividade do solo é uma das principais variáveis que influenciam no dimensionamento do sistema de aterramento de uma linha de transmissão para que este seja eficiente em proteger a linha, sendo este influenciado pelos seguintes fatores: tipo de solo, temperatura, teor de umidade, concentração dos sais da água retida, estratificação e compactação do solo e sua composição química (KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

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

2.2.5 Comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas

Para análise do comportamento do aterramento considera-se que, em geral, uma conexão à terra apresenta efeitos condutivo, resistivo, capacitivo e indutivo. A Figura 2.9 ilustra um circuito equivalente que representa estes efeitos para um pequeno segmento ou elemento de um eletrodo de um sistema de aterramento. A corrente neste elemento é composta de duas parcelas: uma corrente transversal I_T que dispersa para o solo e uma corrente longitudinal I_L que é transferida para o restante do eletrodo (VISACRO, 2002; KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 2.9 - Componentes de corrente no solo e circuito equivalente do aterramento.

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

A corrente longitudinal está associada às perdas características do condutor e gera um campo magnético interno e em volta dele. Na Figura 2.9, uma resistência R e uma indutância L em série são responsáveis pelo padrão desses efeitos. Ambos os parâmetros geram uma queda de tensão (ΔV_R e ΔV_L) ao longo do eletrodo quando este é percorrido por uma corrente (VISACRO, 2002; KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995).

A corrente transversal é formada pelas correntes condutiva e capacitiva. A proporção entre essas duas correntes não depende da geometria do eletrodo, mas apenas da frequência característica do fenômeno solicitante e da condutividade e permissividade elétrica do solo. Os efeitos transversais associados a essa corrente de dispersão são modelados na Figura 2.7 por meio de uma condutância G e uma capacitância C em paralelo (VISACRO, 2002; KINDERMAN e CAMPAGNOLO, 1995). A ilustração apresentada na Figura 2.9 se refere apenas a uma pequena porção do eletrodo. De forma complementar, devem ser considerados os acoplamentos eletromagnéticos próprios e mútuos (capacitivo, condutivo e indutivo) entre os diversos elementos dos eletrodos de aterramento (GRCEV e ARNAUTOVSKI-TOSEVA, 2003). O entendimento do comportamento completo do aterramento demanda a solução de um encadeamento de circuitos similares ao apresentado na Figura 2.9 conectados de acordo com a geometria do aterramento, incluindo os efeitos mútuos (VISACRO, 2007). A solução desse intrincado circuito fornece a impedância vista do ponto de injeção de corrente, que reflete à razão entre a elevação de potencial desenvolvida neste ponto em relação ao terra remoto e a corrente de injeção. A impedância como foi definida é calculada para cada frequência característica da onda de corrente injetada e constitui-se um conceito importante (VISACRO, 2002).

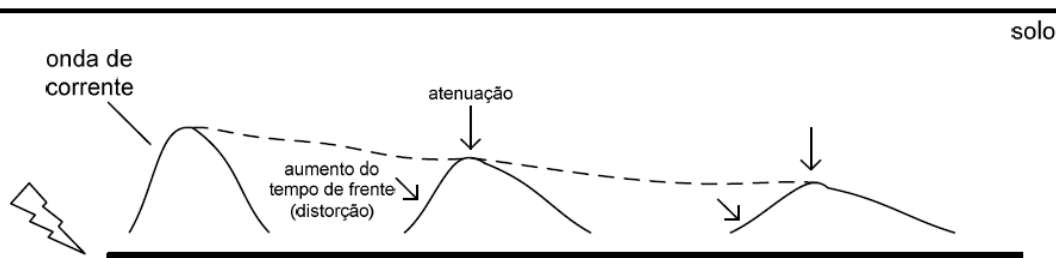
O objetivo da instalação de eletrodos de aterramento é fornecer caminho de baixa impedância para escoamento da corrente elétrica injetada, além de garantir uma

distribuição suave de potenciais no nível do solo, protegendo equipamentos e seres vivos nas proximidades do ponto de injeção de corrente. Essa onda de corrente elétrica injetada viaja pelo eletrodo de aterramento, estando, portanto, sujeita a efeitos de propagação.

O solo é um meio que reúne concomitantemente características condutivas e dielétricas, configurando-se como um meio dielétrico com perdas (FRONTIN, 2013). Dessa forma, ondas de corrente que se propagam em um condutor imerso no solo sofrem dois fenômenos de propagação – a atenuação e a distorção.

Uma onda viajante em um eletrodo imerso em um meio dielétrico com perdas sofre alterações em sua forma à medida que se propaga, configurando-se sua distorção. Adicionalmente, essa onda de corrente tem sua amplitude também variada, tornando-se menor à medida que se propaga ao longo do eletrodo, o que consiste em sua atenuação. Em virtude desses dois fenômenos, quanto maior a distância em relação ao ponto de injeção de corrente, maiores são as deformações e atenuações sofridas pelas ondas de corrente e de tensão. A Figura 2.10 ilustra a propagação de uma onda de corrente ao longo de um eletrodo, onde nota-se a ocorrência de ambos os efeitos descritos.

Figura 2.10 Atenuação e distorção de uma onda de corrente ao longo de um eletrodo.



Fonte: Adaptada de Visacro (2007, p. 13)

Em particular, os efeitos de atenuação em sistemas de aterramento variam expressivamente conforme o solo, tornando-se mais pronunciados em solos de elevada condutividade. Adicionalmente, os efeitos de atenuação são tão mais pronunciados quanto maior for a frequência da onda de corrente (ALÍPIO, 2008).

2.2.5.1 Dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo

O solo possui relevância na modelagem dos componentes do sistema de transmissão para simulação de sobretensões de origem atmosférica. No caso do sistema de aterramento, esta influência é direta, visto que os eletrodos de aterramento estão em

contato direto com o solo. No caso da linha de transmissão, a influência é indireta, particularmente na parcela da impedância longitudinal referente ao retorno pelo solo. Nesse âmbito, faz-se indispensável a modelagem do solo no espectro de frequências típico de descargas atmosféricas para realização de simulações de transitórios eletromagnéticos associados a incidência destas descargas com elevada exatidão (SILVEIRA, DE CONTI e VISACRO, 2014) (VISACRO e SILVEIRA, 2015).

A matéria é composta por partículas elementares carregadas. Quando submetida a campos eletromagnéticos externos, essas partículas interagem com tais campos modificando-os (MACEDO, 1988). Essa interação, sob um ponto de vista macroscópico, é quantificada classicamente por meio dos parâmetros constitutivos da matéria: condutividade elétrica (σ), permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) (STRATTON, 1941; MACEDO, 1988; BALANIS, 1989; JACKSON, 1998). Quando se consideram campos estáticos, tais parâmetros apresentam, em geral, valores bem definidos, que dependem basicamente das características do meio, tais como tipo de solo, umidade, concentração e tipos de sais dissolvidos na água, temperatura, compacidade e granulometria do solo. Por outro lado, quando se considera a aplicação de campos alternados, dentro de uma faixa desde frequências mais baixas (~ 100 Hz) até frequências mais elevadas (alguns MHz), têm-se alguns efeitos complementares, que podem afetar o comportamento dos parâmetros eletromagnéticos em função da frequência do campo aplicado. Note-se que as ligações entre átomos resultam em moléculas que são, na verdade, sistemas dinâmicos bastante complexos, sujeitos a leis quânticas, não clássicas (MACEDO, 1988). Contudo, tendo em conta uma abordagem macroscópica e sob um ponto de vista de engenharia aplicada, o tratamento clássico do tema, embasado nas Equações de Maxwell, é suficiente. É importante citar que, na maioria dos casos, a permeabilidade magnética do solo pode ser suposta igual à do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) e independente da frequência, com a exceção de certos tipos específicos de minério de ferro (PORTELA, 1997). Desse modo, são abordados nesta tese apenas os fundamentos físicos associados à dependência da frequência dos parâmetros condutividade e permissividade do solo.

Há alguns trabalhos de cunho analítico que propõem modelos para determinação da dispersão dos parâmetros elétricos do solo. De certa forma, esses trabalhos têm origem em estudos pioneiros realizados por Maxwell (1873) e por Wagner (1914).

A despeito desses estudos analíticos, é fundamental enfatizar a dificuldade de se estabelecer uma relação entre o comportamento dos parâmetros elétricos do solo e os

diversos fatores de influência (incluindo aqueles decorrentes da variação da frequência), que seja consistente e aplicável a uma ampla variedade de categorias de solo. Ademais, os citados modelos analíticos são geralmente baseados em uma série de variáveis (porosidade, tamanho e formato dos grãos, umidade etc.), cuja medição, além de adicionar complexidades desnecessárias no contexto de aplicação deste trabalho, pode conter erros que, somados, reduzem a confiabilidade e dificulta a utilização de tais modelos.

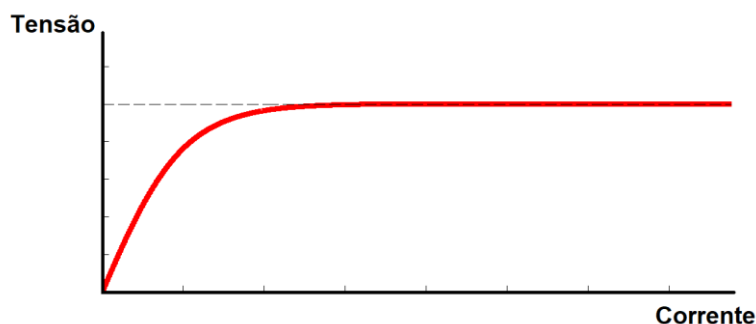
Isso confere maior importância à medição de tais parâmetros, principalmente em contextos práticos de engenharia elétrica.

2.2.6 Para-raios

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

O princípio de funcionamento de para-raios baseia-se no dos resistores não lineares, em que a resistência interna varia conforme a tensão aplicada entre seus terminais. Os para-raios de linha são instalados em paralelo com cadeias de isoladores do sistema, e atuam por meio da limitação das tensões sobre estas. Quando dispositivos para-raios estão sob tensão inferior a determinado valor de projeto, atuam idealmente como um circuito aberto, e assim impedem a circulação de corrente. Quando submetidos a tensão superior ao valor projetado, sua resistência interna é consideravelmente reduzida, favorecendo a condução de corrente e limitando o valor de tensão na cadeia de isoladores. A Figura 2.11 descreve o comportamento tensão-corrente de um dispositivo para-raios.

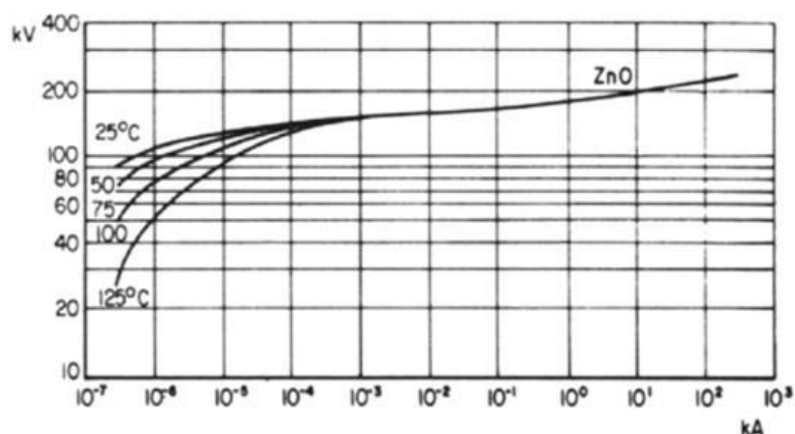
Figura 2.11 - Característica tensão-corrente de um dispositivo para-raios.



Fonte: Viana (2009, p. 09)

Os resistores não lineares utilizados na fabricação de para-raios são, usualmente, fabricados a partir de óxidos metálicos, normalmente o óxido de zinco (ZnO). Esses elementos possuem um comportamento altamente não linear, contribuindo para sua utilização em dispositivos para-raios. A Figura 2.12 ilustra a característica tensão versus corrente de resistores não lineares de ZnO.

Figura 2.12 - Característica tensão-corrente de resistores não lineares de ZnO.



Fonte: Viana (2009, p. 09)

Ainda que os aspectos básicos do comportamento de dispositivos para-raios sejam relativamente simples, sua especificação deve ser criteriosa, com o objetivo de garantir o adequado cumprimento de suas funções de proteção. Abaixo, são indicados alguns dos principais parâmetros avaliados na especificação de para-raios para linhas de transmissão.

2.2.6.1 Tensão nominal e máxima tensão de operação contínua

A tensão nominal representa o máximo valor de tensão eficaz aplicável entre os terminais do para-raios, em frequência industrial, que assegure sua adequada operação em condições de sobretensão. Este é um parâmetro de referência, que define a capacidade operativa de dispositivos para-raios. Cabe ressaltar que os para-raios não devem ser submetidos ao seu valor nominal de tensão indefinidamente, sendo o período limite de tempo definido pelo fabricante (10 segundos, segundo ABNT (2012), com o objetivo de manter a estabilidade térmica do equipamento e sua capacidade de operação (HINRICHSSEN, 2011; ABNT, 2012).

Nesse contexto, a máxima tensão de operação contínua dos para-raios representa o valor máximo de tensão que pode ser continuamente aplicado nos terminais do para-raios, também em frequência industrial (ABNT, 2012; FRONTIN, 2013).

Em linhas de transmissão de 138 kV (máxima tensão entre fase e neutro 83,72 kV (ONS, 2016), são utilizados, usualmente, para-raios de tensão nominal de 120 kV e máxima tensão de operação contínua de 98 kV.

2.2.6.2 Correntes nominais de descarga

Correntes nominais de descargas representam valores de crista de impulso de corrente usado para classificar o para-raios. Referem-se às máximas correntes que podem circular nos resistores não lineares dos para-raios quando em condição de surto. Destaca-se que esse parâmetro não tem relação com o valor de pico de descargas atmosféricas no sistema, mas à corrente do próprio dispositivo. Para-raios do tipo estação são comumente aplicados em linhas de transmissão, esta classificação “estação” é proveniente das correntes nominais de descarga entre 10 kA e 20 kA.

Em ensaios para avaliação da capacidade de escoamento do dispositivo, é aplicada uma onda de corrente padronizada do tipo 8/20 μ s (ABNT, 2012; CEMIG, 2012; FRONTIN, 2013).

2.2.6.3 Energia específica

Quando ocorre uma falta ou uma descarga atmosférica, dispositivos para-raios são submetidos a severas condições de operação, sendo expostos a elevadas correntes e sobretensões. Nesse cenário, a energia específica do para-raios refere-se ao máximo valor de energia que pode ser absorvida pelo equipamento em condições de surto, sem que suas características de operação sejam comprometidas.

Esse parâmetro relaciona a tensão nominal do equipamento e a sua capacidade de absorção de energia. Dispositivos para-raios de linhas de transmissão, geralmente, possuem energia específica entre 2,7 e 3,4 kJ/kV (FRONTIN, 2013). Frisa-se que, em geral, os valores de capacidade de absorção de energia de para-raios são extremamente

conservadores, considerando uma série de incertezas, tais como envelhecimento do dispositivo frente a surtos, entre outros (FRONTIN, 2013).

3 METODOLOGIA E MODELAGENS ADOTADAS NO ESTUDO

A metodologia de desenvolvimento do presente trabalho compreende a realização de sete etapas básicas, que são:

1. Desenvolvimento de modelagem do sistema de aterramento de linhas de transmissão no domínio da frequência (0 Hz até cerca de 10 MHz), incluindo o fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo;
2. Utilização de estratégias para acoplamento da modelagem do aterramento dependente da frequência com programa de cálculo de transitórios no domínio do tempo;
3. Utilização de modelagem no domínio do tempo de elementos e/ou fenômenos não lineares dependentes do tempo (dispositivos para-raios);
4. Validação computacional das modelagens desenvolvidas no domínio do tempo e da frequência, utilizando programas de cálculo de transitórios no domínio do tempo.
5. Implementação de simulações em programas de cálculo de transitórios no domínio do tempo, com a inclusão simultânea dos modelos de elementos e/ou fenômenos dependentes do tempo e da frequência;
6. Realização de simulações sistemáticas, considerando as modelagens desenvolvidas, para o desenvolvimento de análises de sensibilidade para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas;
7. Determinação, a partir dos resultados gerados, de práticas de proteção de sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas.

De modo geral, a vantagem fundamental de empregar metodologias de solução de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo em relação ao emprego de metodologias no domínio da frequência é que, tipicamente, as primeiras necessitam de menor tempo computacional para os cálculos, contanto que sejam escolhidos intervalos de tempo convenientes para a solução numérica. Outra particularidade relevante dos métodos no domínio do tempo é o fato de possibilitarem com alguma facilidade a modelagem de elementos não lineares ou de fenômenos com comportamento não linear que dependam do tempo. Em contrapartida, a inclusão da variação com a frequência de elementos de circuito e/ou parâmetros do meio físico em que esse circuito está inserido é tarefa difícil no domínio do tempo, como, por exemplo, na modelagem de cabos aéreos,

aterramentos elétricos e solos reais, os quais têm acentuada variação com a frequência, notadamente na faixa de poucos Hz até dezenas de MHz.

Em função do exposto anteriormente, a presente tese pretende empregar uma abordagem tempo-frequência. Os fenômenos e/ou elementos dependentes da frequência serão modelados diretamente no domínio da frequência. Estas modelagens serão desenvolvidas utilizando variadas técnicas, de acordo com a complexidade do elemento e/ou fenômeno em questão, as quais podem ser citadas: teoria de campo e método dos momentos, teoria de ondas trafegantes no domínio modal, teoria de circuitos e medições. Adiante, estes modelos desenvolvidos no domínio da frequência serão acoplados com programas do tipo EMTP utilizando-se de várias ferramentas, em função da natureza do elemento e/ou fenômeno associado, dentre as quais podem ser citadas: funções racionais e convoluções recursivas, circuitos equivalentes e transformação tempo/frequência/tempo. Por fim, as simulações sistemáticas completas do sistema elétrico incluindo simultaneamente os elementos e/ou fenômenos dependentes do tempo e da frequência para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas serão realizadas em plataformas do tipo EMTP.

Das plataformas referidas, destaca-se o *software* ATP, pois além de ser um programa do tipo não comercial, deve ser o programa utilizado nos estudos de transitórios eletromagnéticos para elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão, , de acordo com as diretrizes do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (ONS, 2009). Assim posto, o ATP é assumido como plataforma base neste trabalho.

No que concerne à avaliação das sobretensões resultantes do fenômeno, é de fundamental importância a correta modelagem dos elementos envolvidos.

Inicialmente, será caracterizado o caso base, o qual fornece os parâmetros físicos dos componentes e fenômenos considerados nas modelagens e servirá para todos os estudos de caso relacionados à avaliação dos transitórios eletromagnéticos de origem atmosférica alvo deste trabalho.

As seções a seguir apresentam uma descrição e o detalhamento das modelagens desenvolvidas e adotadas nesta tese para representação desses elementos no ATP, ressaltando suas vantagens em relação a outras representações comumente utilizadas, as quais consistem na motivação para seu desenvolvimento e adoção neste estudo.

Por último, será apresentado o método utilizado para avaliar o efeito disruptivo na cadeia de isoladores. Este por sua vez influencia diretamente a ocorrência de ruptura do

isolamento e consequente probabilidade de desligamento da linha de transmissão simulada.

3.1 CONDIÇÕES BASE PARA SIMULAÇÃO

A linha simulada, cujas torres apresentam dimensões conforme ilustração da 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 400 metros de vão entre torres.

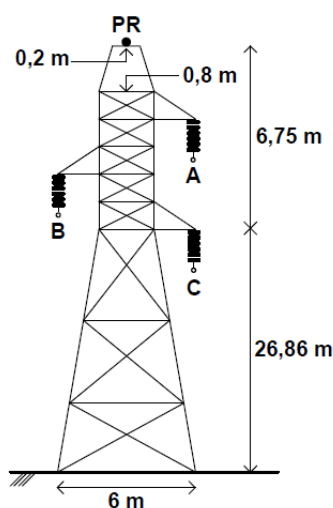
Esta estrutura é tipicamente utilizada em linhas de transmissão de 138 kV, com 33,61 metros de altura, cuja base forma um quadrado de 36 m² de área.

A posição dos condutores no espaço, em relação a torre de transmissão, é definida 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.

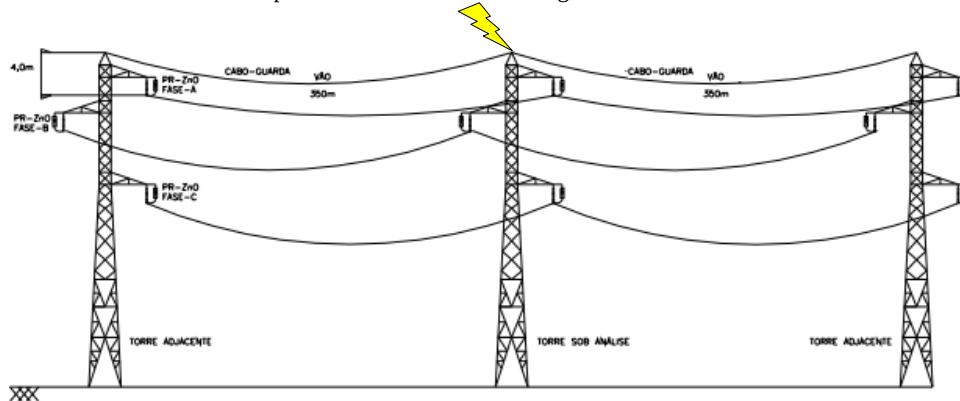
Figura 3.1- Geometria da torre de transmissão e disposição dos condutores.



Fonte: Adaptada de Alípio (2018, p. 03)

Na modelagem do circuito elétrico a ser simulado, a descarga atmosférica incide no topo da torre central, considerando também duas torres adjacentes, conforme ilustra a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica e da existência de torres adjacentes.



Fonte: Adapta de Viana (2009, p. 53)

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 (ALIPIO, DUARTE, *et al.*, 2017). Para além das torres de transmissão das extremidades, são considerados trechos de linhas suficientemente longas para que as reflexões das ondas de corrente e tensão nas extremidades da linha não alcancem a torre atingida e não influenciem os resultados e análises realizadas, considerando o intervalo de tempo de simulação.

3.2 MODELO DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

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

A curva de Heidler contempla a natureza côncava da onda nos seus instantes iniciais. Também, observa parcialmente o posicionamento adequado da derivada máxima próximo ao pico e tem, ainda, o decaimento de sua amplitude após a ocorrência do pico muito similar àquele das curvas medianas. A curva é obtida através da aplicação de uma expressão analítica, chamada de Função de Heidler. Esta permite o ajuste, de forma

independente, da amplitude de corrente, da derivada máxima de corrente e da carga transferida, através da variação das constantes I_0 , τ_1 e τ_2 . A expressão dessa função é apresentada a seguir (VISACRO, 2005).

$$i_0(t) = \frac{I_p}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)}, \quad (3.1)$$

onde:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right], \quad (3.2)$$

e:

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

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

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

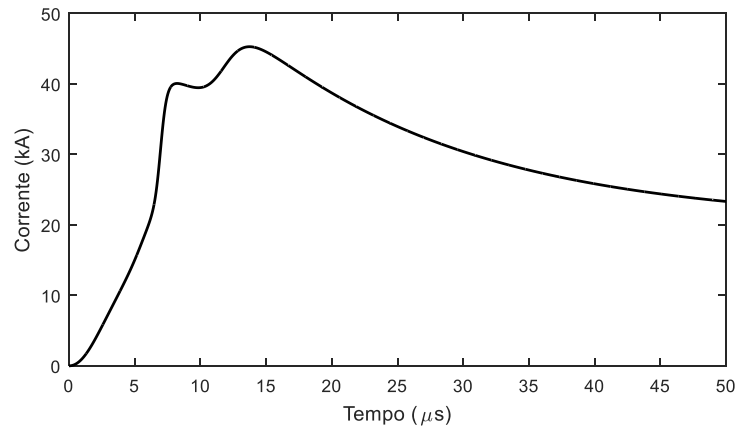
η = Fator de correção da amplitude;

n = Fator de inclinação da corrente.

Porém, para contemplar precisamente 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. Assim, De Conti e Visacro (2007) propuseram a utilização de sete funções de Heidler para representar as primeiras descargas de retorno medidas nas estações de San Salvatore e do Morro do Cachimbo, considerando seus principais parâmetros medidos (DE CONTI e VISACRO, 2007).

A Figura 3.3 ilustra a forma de onda obtida a partir da soma de sete funções de Heidler. Os parâmetros da formas de onda característica ilustrada no gráfico representam os valores medianos da distribuição estatística dos dados medidos na estação do Morro do Cachimbo-MG e estão explicitados na Tabela 3.1 após a referida figura (DE CONTI e VISACRO, 2007).

Figura 3.3- Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas pela soma de sete funções de Heidler obtidas no software ATP.



Fonte: Acervo do autor.

Tabela 3.1- Parâmetros utilizados para sintetizar as primeiras descargas de retorno medidas na estação de Morro do Cachimbo.

k	Primeiras Descargas			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μs)	τ_{2k} (μs)
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

É importante salientar que a forma de onda proposta em De Conti e Visacro (2007), é representativa de ondas chamadas medianas. Recentemente, e tendo como base o trabalho de De Conti e Visacro (2007), apresenta-se em Oliveira e colaboradores (2017) um procedimento que permite sintetizar formas de ondas com características similares à da onda ilustrada na Figura 2.15, 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 de De Conti e Visacro (2007) e Oliveira e colaboradores (2017) correspondem ao estado da arte em termos de representação de ondas de corrente de primeiras descargas de retorno para fins de avaliação da performance de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas associada à incidência direta de descargas em linhas de transmissão. Consequentemente, esta é a modelagem utilizada neste trabalho. As correntes de primeira descarga utilizadas nas simulações deste trabalho serão as medidas na estação do Morro do Cachimbo – MG (VISACRO, SOARES JR., *et al.*, 2004), por possuírem valores mais conservadores (com maiores picos de corrente) e por terem sido

medidas em solo brasileiro, sendo assim condizentes para a realização da avaliação considerando a realidade local, em relação aos medidos na estação do Monte San Salvatore (BERGER, ANDERSON e KRONINGER, 1975), e que são costumeiramente considerados na literatura internacional.

3.3 MODELO DA TORRE DE TRANSMISSÃO

A modelagem da torre de transmissão utilizada foi proposta por De Conti e colaboradores (2009), fundamentada em um sistema de multicondutores verticais paralelos (AMETANI; KASAI, *et al.*, 1994; HARA e YAMAMOTO, 1996; GUTIERREZ; MORENO, *et al.*, 2004; CONTI, VISACRO, *et al.*, 2006; CONTI, VISACRO e SILVA, 2009), e é capaz de produzir resultados suficientemente precisos considerando uma abordagem de engenharia. Ressalta-se que este método foi validado tomando-se como referência um modelo eletromagnético rigoroso baseado na teoria de campo, o *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) (VISACRO e J. SOARES, 2005). A torre simulada é formada por um sistema de quatro condutores verticais que são modelados por linhas de transmissão, sem perdas, conectadas em série para se levar em conta a variação dos efeitos mútuos desses condutores, em função da variação da distância entre os condutores da base até o topo. A impedância de surto Z associada a cada linha é calculada a partir da fórmula de Jordan (DE CONTI, VISACRO, *et al.*, 2006):

$$Z = 60 \left[\ln \frac{4h}{r} - 1 \right], \quad (3.3)$$

em que

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

A Equação (3.3) é válida para um único condutor e, frequentemente, faz-se necessário representar estruturas compostas por vários condutores, como são as torres de transmissão. Assim sendo, a Equação (3.3) foi estendida para considerar a impedância de surto mútua de condutores verticais de mesma altura h . Calculando-se a tensão induzida no j -ésimo condutor produzida pela corrente que flui pelo i -ésimo condutor vertical, obtém-se a seguinte expressão (DE CONTI, VISACRO, *et al.*, 2006):

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{\frac{1 + d_{ij}^2}{4h^2}} \quad (3.4)$$

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, podem ser calculadas as tensões e correntes resultantes a partir do seguinte equacionamento:

$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdot & \cdot & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdot & \cdot & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

em que:

- V_i e I_i são tensões e correntes no i -ésimo condutor vertical;
- Z_{nn} é a impedância de surto própria de cada um dos condutores, calculada com a equação (2.5);
- Z_{ij} representa as impedâncias de surto mútuas calculadas com a equação (3.4).

Levando-se em consideração que os n condutores são interconectados no ponto de injeção de corrente, têm-se que, neste ponto, $V1 = V2 = \dots = Vn$ e $I = I1 + I2 + \dots + In$, em que I é a corrente total injetada. Portanto, é possível considerar todo o sistema por uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente Z_{eq} , dada por:

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z_{11} + Z_{12} + \dots + Z_{1n}}{n} \quad (3.6)$$

Para aplicar a modelagem considerando a torre ilustrada na Figura 2.13, apresentada na seção 2.3.1 Caso base, a dividimos em quatro seções, sendo a parte inferior subdividida em três seções (duas de 9 m e uma de 8,86 m) e a parte superior em uma seção única (6,75 m). Conforme exposto anteriormente, essa consideração 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, as alturas $h = 9$ m; 18 m; 26 m e 33,61m e as Equações (3.4), (3.5) e (3.6) foram calculadas as impedâncias equivalentes Z_{eq} , adotando-se em todos os cálculos o valor do raio igual a 6,5 cm. As seguintes impedâncias foram obtidas para cada seção da torre:

- $Z_{eq1} = 289,75 \, \Omega$; Comprimento: 6,75 m;
- $Z_{eq2} = 235,24 \, \Omega$; Comprimento: 8,86 m;

O modelo proposto pelo IEEE (1992; 2009) é um dos mais empregados nas simulações de transitórios, obtendo resultados suficientemente precisos dentro de suas premissas de validade (tempo de subida entre 0,5 μ s e 45 μ s). É, portanto, recomendável para estudos com raios (onde alcança seu melhor desempenho), conseguindo representar o pico de tensão residual que ocorre antes do pico de corrente nos ensaios reais de alta frequência com para-raios.

As equações desse modelo são as seguintes:

$$L_0 = \frac{0,2d}{n} \quad (3.7)$$

$$R_0 = \frac{100d}{n} \quad (3.8)$$

$$L_1 = \frac{15d}{n} \quad (3.9)$$

$$R_1 = \frac{65d}{n} \quad (3.10)$$

$$C = \frac{100n}{d} \quad (3.11)$$

Em que:

L_0 – Representa a indutância associada aos campos magnéticos nas proximidades do para-raios, em microHenry;

R_0 – Resistência, em ohm, usada para estabilizar a integração numérica quando o modelo é implantado em alguns simuladores computacionais, a exemplo do ATP;

L_1 – Indutância do filtro passa baixas, em microHenry. É o parâmetro de maior impacto nas simulações;

R_1 – Resistência do filtro passa baixas, em ohm;

C – Representa a capacitância entre terminais do para-raios, em picoFarad;

A_0 e A_1 – Representam a não linearidade da curva $V \times I$ do para-raios. Seus valores podem ser obtidos da curva da Figura 3.6. Na curva, a tensão residual é obtida pela Equação (2.11);

d – Altura estimada do para-raios, obtida de catálogos, em metro;

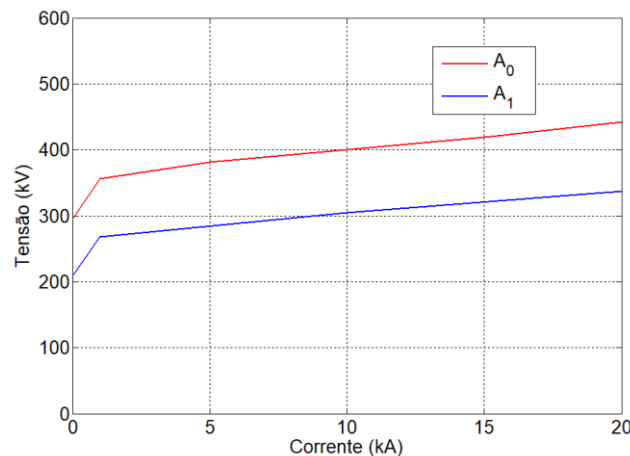
n – Número de colunas de discos de ZnO em paralelo no para-raios.

$$V_{R_{10}} = [Tensão \text{ p.u.}] \times \frac{V_{10}}{1,6} \quad (3.12)$$

Em que:

Tensão p.u. – Tensão, em p.u., obtida do eixo das ordenadas da Figura 3.6;

V_{10} – Tensão residual de impulso atmosférico para uma corrente de 10 kA, 8/20 μ s.

Figura 3.6 - Relação $V \times I$ para os resistores não lineares do modelo proposto pelo IEEE.

Fonte: IEEE (2009)

3.5 MODELO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA

O solo exerce influência na modelagem de alguns componentes do sistema de transmissão para simulação de sobretensões de origem atmosférica. No caso do sistema de aterramento, esta influência é direta, visto que os eletrodos de aterramento estão imersos diretamente no solo. Em relação à linha de transmissão, a influência é indireta, particularmente na parcela da impedância longitudinal atinente ao componente do modo terra. Nesse âmbito, para realizar simulações de sobretensões atmosféricas com elevada exatidão, torna-se fundamental a modelagem do solo no espectro de frequências típico de descargas atmosféricas.

Estudos e trabalhos experimentais descritos em Scott (1983) e Portela (1999) e pesquisas recentes teóricas e aplicadas em laboratório por Visacro & Alípio (2012) e Alípio & Visacro (2014), evidenciam que a permissividade ϵ_g e condutividade σ_g , parâmetros elétricos do solo, não apresentam 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 pode ser assumido constante e igual à permeabilidade do vácuo μ_0 , em quase todos os tipos de aplicações (PORTELA, 1999).

Em estudo recentes, as equações (3.13) e (3.14) foram propostas para considerar a variação dos parâmetros elétricos do solo ε_g e σ_g com a frequência, fundamentadas em extensivas e sistemáticas medições em campo e nas equações de Maxwell e Kramers-Kronig's (ALIPIO e VISACRO, 2014).

$$\varepsilon_g = \varepsilon'_{\infty} + \frac{\tan\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right) \cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1\text{MHz})^{\zeta}} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \cdot f^{\zeta-1} \quad (3.13)$$

$$\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1\text{MHz}}\right)^{\zeta} \quad (3.14)$$

em que:

- ε_g é a permissividade elétrica do solo em F/m;
- ε'_{∞} é a permissividade elétrica do solo em altas frequências;
- 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;
- f é a frequência em Hz.

Os seguintes parâmetros são recomendados para considerar uma variação média dos parâmetros ε_g e σ_g (SOARES, SCHROEDER e VISACRO, 2005):

$$\zeta = 0.54 \cdot \varepsilon'_{\infty} \therefore \varepsilon'_{\infty} = 12\varepsilon_0;$$

$$h(\sigma_0) = 1,26\sigma_0^{0,73}$$

em que:

- ε_0 é a permissividade no vácuo.

Deve-se ressaltar que as equações (3.13) e (3.14) geram resultados consistentes da variação de ε_g e σ_g , com a frequência, levando-se em consideração um vasto conjunto de resultados experimentais. Complementarmente, essas equações introduzem a relação de causalidade inerente entre a variação da condutividade e permissividade elétricas do solo (ALIPIO e VISACRO, 2014).

3.6 MODELO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

O *software* ATP dispõe de alguns modelos que representam linhas de transmissão, estes podem ser apropriados ou não para certas aplicações, de acordo com a exatidão e eficiência desejadas (ARAÚJO e NEVES, 2005). Entre os modelos pré-existentes do ATP, as linhas de transmissão podem ser modeladas a parâmetros concentrados ou

distribuídos (MARTI, 1982). Os modelos a parâmetros distribuídos contemplam a natureza distribuída dos parâmetros da linha, o que possibilita considerar o fenômeno de propagação de ondas. Deste modo, uma perturbação propaga-se sujeita a distorções e atenuações até ser refletida nos terminais da linha, havendo um atraso entre tensões (e correntes) em terminais opostos. Em geral, os modelos a parâmetros distribuídos são mais precisos do que os que utilizam parâmetros concentrados para o cálculo de transitórios em linhas de transmissão (DE CONTI, 2016).

O ATP possui quatro modelos pré-existent de linhas: Bergeron, JMarti, Semlyen e Noda (CANADIAN/AMERICAN EMTP USER GROUP, 1987-98), sendo que o primeiro considera os parâmetros constantes e nos três últimos a variação destes com a frequência é incluída.

Com a finalidade de evitar as limitações do modelo Bergeron, principalmente em relação a desprezar a variação dos parâmetros com a frequência, José R. Marti (1982) propôs um novo modelo que 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 de propagação e a impedância característica são determinadas por uma soma de funções racionais, e os polos e resíduos dessas funções são definidos através do método assintótico de Bode. Isto posto, as convoluções decorrentes 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, a decomposição é realizada via uma transformação de similaridade, em 'n' linhas monofásicas no domínio modal e a impedância característica e as funções de propagação de cada modo são ajustadas, em um intervalo de frequências definido pelo usuário, igualmente empregando um modelo de polos e resíduos. A matriz de transformação modal é calculada para uma única frequência, determinada pelo usuário. A impedância de retorno pelo solo é calculada aplicando a formulação de Carson e os parâmetros elétricos do solo são supostos constantes; a admitância do solo é desprezada (CARSON, 1926).

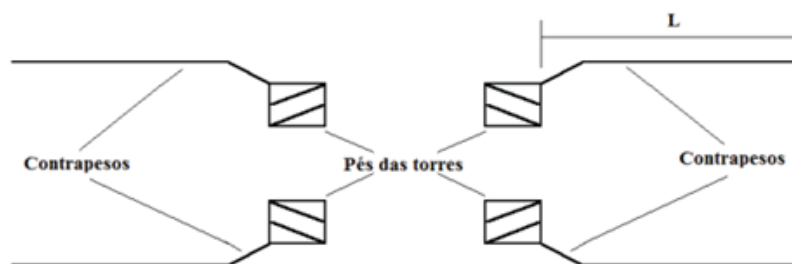
O modelo JMarti é o mais confiável e também o mais utilizado, entre os disponíveis no ATP, a despeito de apresentar limitações para simular casos em que a variação da matriz de transformação modal com a frequência não possa ser desconsiderada, como nas aplicações com cabos subterrâneos ou linhas de transmissão com condutores em configurações fortemente assimétricas (GUSTAVSEN, 2012; CONTI, 2016).

Ao considerar a plataforma ATP e as particularidades das condições adotadas neste trabalho, notadamente a incidência de descarga atmosférica no topo da torre de transmissão e a configuração da linha, que não possui assimetria em seus condutores, entende-se que o modelo JMarti é aquele que fornece resultados com maior exatidão. Sendo assim, este modelo faz-se a alternativa ideal para ser aplicada nesta tese.

3.7 MODELO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO

O sistema de aterramento da torre de transmissão é formado, fundamentalmente, pelos eletrodos de aterramento, conexões com a torre e o solo ao redor. Tipicamente, o arranjo de aterramento utilizado é composto de eletrodos paralelamente dispostos, chamados usualmente de cabos contrapeso. Tal arranjo é ilustrado na Figura 3.7, considerando uma torre de transmissão autoportante.

Figura 3.7- Configuração típica do aterramento de torres de transmissão autoportantes.



Fonte: Adaptada de Salari e Portela (2007, p.07)

Conforme mencionado anteriormente, o *software* ATP não possui uma modelagem própria que considere os efeitos dependentes da frequência de um sistema de aterramento. Deste modo, no que compete 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 baixas frequências (AMETANI e KAWAMURA, 2005; HAYASHI, MIZUNO e NAITO, 2008; MUNUKUTLA, VITTAL, *et al.*, 2010; TAKAMI, OKABE e ZAIMA, 2010; BABAEI, BABAEI e NIASATI, 2013). Considerando os efeitos reativos e de propagação, que se tornam importantes no aterramento quando submetido a solicitações transitórias de alta frequência, uma modelagem mais consistente deve ser considerada para simulações desses fenômenos (GRCEV e ARNAUTOVSKI-TOSEVA, 2003; GRCEV, 2009;

GRCEV e GRCEVA, 2009; ALÍPIO e VISACRO, 2013; ALEMI e SHESHYEKANI, 2015).

Para as mais diferenciadas solicitações no espectro de frequência, a impedância harmônica reproduz rigorosamente o comportamento do sistema de aterramento, contanto que seja definida a faixa de frequência adequada (ALÍPIO, 2008). Por conseguinte, a aplicação da impedância harmônica como modelo para os eletrodos do aterramento é adequada para análises que envolvam solicitações atmosféricas, uma vez que esse fenômeno contém um extenso espectro de frequências. Por definição, a impedância harmônica é a razão entre os fasores da elevação de potencial no aterramento no ponto de injeção $V(\omega)$ e da corrente $I(\omega)$ injetada, ou seja:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (3.15)$$

Contextualizando para as linhas de transmissão aéreas, e considerando torres autoportantes, existem quatro pontos de injeção de corrente no sistema de aterramento. Assumindo a simetria da torre, pode-se afirmar que a corrente que desce por esta se distribui uniformemente entre os quatro cabos contrapeso. Ademais, tendo em consideração a simetria do sistema de aterramento, a impedância harmônica vista de cada ponto de injeção é igual. Ante essas suposições, a impedância harmônica do aterramento de pé de torre equivale à impedância harmônica vista por um cabo contrapeso, na presença dos demais, dividida por quatro.

A modelagem rigorosa do comportamento dependente da frequência do aterramento requer a aplicação de ferramentas complexas que podem ser baseadas em teorias de campos eletromagnéticos, de circuitos ou de linhas de transmissão, sendo esta última a mais aplicada historicamente pela comunidade científica, em função de necessitar de menor tempo de processamento computacional se comparada aos cálculos utilizando teoria de campos e também pelo alto custo de *softwares* que utilizam a teoria de campos eletromagnéticos para realizar as simulações (SILVA, 2016). Por estas mesmas razões, a modelagem do sistema de aterramento desenvolvida nesta tese foi realizada aplicando a teoria de linhas de transmissão.

Em uma abordagem simplificada, os eletrodos horizontais de aterramento, tais como os cabos contrapeso, são frequentemente tratados na literatura como uma linha de transmissão enterrada no solo, e a impedância harmônica de aterramento é computada como sua impedância de entrada (GRCEV e POPOV, 2005; GRCEV e GRCEVA, 2009). Entretanto, na maioria dos trabalhos, a teoria da linha de transmissão é usada para avaliar

a resposta ao impulso atmosférico de apenas um eletrodo horizontal, e por conseguinte, desprezando o acoplamento eletromagnético entre os cabos contrapeso (LIU, ZITNIK e THOTTAPPILLIL, 2001; LORENTZOU, HATZIARGYRIOU e PAPADIAS, 2003; HE, GAO, *et al.*, 2005). Esta simplificação resulta em redução da precisão deste tipo de abordagem se comparadas às que consideram a teoria de campos eletromagnéticos (SILVA, 2016). No caso de arranjos de aterramento mais complexos compostos de um conjunto de eletrodos horizontais, uma aproximação de circuitos a parâmetros concentrados é frequentemente usada e as equações de linhas de transmissão não são resolvidas diretamente (LIU, ZITNIK e THOTTAPPILLIL, 2001; LORENTZOU, HATZIARGYRIOU e PAPADIAS, 2003).

Um dos principais objetivos deste trabalho é desenvolver uma modelagem original tempo-frequência para o sistema de aterramento composto por cabos contrapeso, com precisão e nível de esforço computacional adequados, e aplicável ao espectro de frequência das correntes impulsivas para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Para isto, estendeu-se a teoria de linhas de transmissão para avaliar sistemas de aterramento compostos de múltiplos eletrodos paralelos considerando o acoplamento eletromagnético entre estes, a fim de se alcançar resultados mais precisos.

Recentemente, Alípio *et. al.* (2016) desenvolveu uma modelagem com abordagem semelhante, porém alguns aperfeiçoamentos foram realizados no modelo desenvolvido nesta tese. Estes serão destacados a seguir, durante a descrição do modelo.

As equações de onda para uma linha de transmissão de um único condutor posicionado ao longo do eixo z podem ser escritas no domínio da frequência como (PAUL, 2008):

$$\frac{d^2}{dz^2} V(z) = ZYV(z) \quad (3.16)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} I(z) = YZI(z) \quad (3.17)$$

em que $V(z)$ e $I(z)$ são, respectivamente, os fasores de tensão e corrente ao longo da linha. A impedância por unidade de comprimento, Z , e a admitância, Y , são:

$$Z = j\omega L \quad (3.18)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (3.19)$$

em que L , G e C são, respectivamente, a indutância, condutância e capacitância por unidade de comprimento. A resistência longitudinal R foi desprezada, já que seu valor

não é importante para a análise de eletrodos de aterramento sob condições impulsivas (ALÍPIO, 2008).

Considerando as expressões clássicas propostas por Sunde (SUNDE, 1968), a condutância por unidade de comprimento de um cabo horizontal enterrado no solo pode ser calculada por:

$$G = \frac{\pi}{\rho} \left[\ln \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right]^{-1} \quad (3.20)$$

em que:

- ρ é a resistividade do solo ($\Omega.m$);
- l é o comprimento do eletrodo de aterramento (m);
- a é o raio do eletrodo (m);
- d é a profundidade em que o eletrodo está enterrado (m).

A capacitância de aterramento é calculada considerando a relação de dualidade entre C e G,

$$\frac{C}{G} = \rho \varepsilon \quad (3.21)$$

em que ε é a permissividade elétrica do solo (F/m).

Finalmente, a indutância é calculada por:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{a} - 1 \right]^{-1} \quad (3.22)$$

em que μ é permeabilidade magnética do solo (H/m).

Por sua vez, as equações de onda para uma linha de transmissão de n condutores paralelos posicionados ao longo do eixo z podem ser escritas no domínio de frequência como (PAUL, 2008):

$$\frac{d^2}{dz^2} \hat{V}(z) = \hat{Z} \hat{Y} \hat{V}(z) \quad (3.23)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \hat{I}(z) = \hat{Y} \hat{Z} \hat{I}(z) \quad (3.24)$$

em que $\hat{V}(z)$ e $\hat{I}(z)$ são vetores coluna $n \times 1$ contendo n tensões e correntes da linha.

Note que as equações (3.23) e (3.24) estão acopladas porque $\hat{Z} \hat{Y}$ e $\hat{Y} \hat{Z}$ são matrizes completas. Isso significa que as tensões e correntes de um condutor do sistema de aterramento afetam as tensões e correntes de todos os condutores do sistema. As matrizes $n \times n$ de impedância, $\hat{Z}$, e admitância, $\hat{Y}$, por unidade de comprimento são dadas por:

$$\hat{Z} = j\omega \hat{L} \quad (3.25)$$

$$\hat{Y} = \hat{G} + j\omega \hat{C} \quad (3.26)$$

em que $\hat{L}$, $\hat{G}$ e $\hat{C}$ são, respectivamente as matrizes de indutância, condutância e capacitância por unidade de comprimento.

Os elementos da diagonal principal de tais matrizes, que representam os efeitos próprios, são calculados usando as expressões (3.20), (3.21) e (3.22). Os elementos fora da diagonal principal, representando os efeitos mútuos, são calculados usando as mesmas expressões, mas substituindo o raio pela distância horizontal entre os condutores enterrados (SUNDE, 1968) (THEETHAYI, THOTTAPPILLIL, *et al.*, 2007).

Para melhorar a consistência física do efeito do acoplamento eletromagnético entre os condutores que estão imersos no solo, foi incluído o efeito do solo na propagação das ondas de tensão e corrente entre os condutores. Vale destacar que esta consideração se trata de um aperfeiçoamento em relação ao modelo proposto por Alípio *et. al.* (2016). Assim sendo, as equações dos parâmetros G_m , C_m e L_m , representando os efeitos mútuos são:

$$G_m = \exp(-\gamma * D1) * \frac{\pi}{\rho} \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2aD1}} - 1 \right]^{-1} \quad (3.27)$$

$$C_m = \rho \varepsilon G_m \quad (3.28)$$

$$L = \exp(-\gamma * D1) * \frac{\mu}{2\pi} \left[\log \frac{2l}{a} - 1 \right]^{-1} \quad (3.29)$$

em que:

- $D1$ é a distância entre os eletrodos (m);
- γ é a constante de propagação intrínseca do solo, dada por:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu * (\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (3.30)$$

em que:

- j é a unidade imaginária;
- ω é a frequência (rad/s);
- σ é a condutividade elétrica do solo ($\mu\text{S/m}$).

Como neste caso não há o interesse em se visualizar o perfil de tensão ao longo do circuito, pode-se obter a matriz de admitância nodal Y_n , apenas através das tensões e corrente terminais da linha.

Na modelagem desenvolvida, a matriz Y_n é obtida diretamente em coordenadas de fase, sendo esta solução mais um aperfeiçoamento ao modelo desenvolvido por Alípio *et. al.* (2016), em que Y_n foi obtida através da decomposição em componentes modais (PAUL, 2008), o que aumenta a complexidade do cálculo.

Para isso, é necessário obter a matriz Γ (LIMA, 2006):

$$\Gamma = \sqrt{ZY} \quad (3.31)$$

e a matriz de deformação de tensão A , também conhecida na literatura técnica como matriz de propagação:

$$A = \exp(-\Gamma l) \quad (3.32)$$

em que l é o comprimento da linha.

Desta forma a matriz Y_n será representada por (LIMA, 2006):

$$Y_n = \begin{bmatrix} Y_c(I + A^2)(I - A^2)^{-1} & -2Y_c(I - A^2)^{-1} \\ -2Y_c(I - A^2)^{-1} & Y_c(I + A^2)(I - A^2)^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

em que I a matriz de identidade, Y_c é a matriz de admitância característica, definida por $Y_c = Z^{-1}\sqrt{ZY}$ e A é definida em (3.32).

Uma vez calculada a matriz de admitância nodal, as equações de linhas de transmissão são resolvidas incorporando as duas seguintes condições terminais:

- 1) Uma extremidade das linhas é alimentada por uma corrente harmônica de tempo de 1 A na faixa de frequência de interesse para o estudo transitório;
- 2) A outra extremidade da linha é aberta. Então, a matriz de impedância harmônica de aterramento $Z_T(j\omega)$ é calculada como a impedância de entrada das linhas em cada frequência, que é dada por:

$$Z_T(j\omega) = \frac{V(0)}{1A} \quad (3.34)$$

em que $V(0)$ é o fasor da tensão na extremidade das linhas que é alimentada pela corrente harmônica.

No caso específico de torres de transmissão autoportantes, o arranjo do sistema tipicamente utilizado é composto de dois pares simétricos de eletrodos paralelamente dispostos, conforme ilustrado na Figura 3.8. Por esta razão, as matrizes de admitância e impedância por unidade de comprimento e de admitância nodal puderam ser calculadas inicialmente com um par, e, por fim, para calcular a impedância harmônica total vista do ponto de injeção da corrente, divide-se o valor calculado para um par por 2.

Para incluir o comportamento dependente da frequência do aterramento em plataformas de transitórios no domínio do tempo podem ser utilizados circuitos elétricos equivalentes, formados por elementos lineares de circuitos. Após definido o comportamento da matriz impedância harmônica do aterramento, a obtenção do circuito equivalente é realizada através de duas etapas principais. Primeiro, determina-se um modelo de polos e resíduos para a matriz de admitância de aterramento, que equivale ao

inverso da matriz de impedância harmônica. Após determinar o modelo de aterramento a partir de uma soma de funções racionais é possível sintetizar um circuito equivalente, formado por ramos conectados entre um dado nó e o nó de referência (terra). Este circuito equivalente reproduz o comportamento dependente da frequência do elemento em questão e pode ser implementado no ATP por meio do componente “LIBRARY” em “USER SPECIFIED”.

Para determinar o modelo de polos e resíduos dos cabos contrapeso que compõem o sistema de aterramento, aplica-se nesta tese a técnica de ajuste matricial (Matrix Fitting) (GUSTAVSEN, 2002), sendo a passividade do modelo garantida por perturbação dos parâmetros do modelo, conforme proposto por Gustavsen (2008). O algoritmo do Matrix Fitting implementado no MATLAB® é de domínio público e está disponível em website (GUSTAVSEN, 2009). Em todos os casos deste trabalho essa rotina será utilizada para determinar a admitância de aterramento na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz. Posteriormente, emprega-se a rotina *netgen.m* apresentada por Gustavsen (2002) e disponibilizada em website (GUSTAVSEN, 2009). Esta rotina faz a síntese do circuito elétrico equivalente a partir do modelo de polos e resíduos gerado pela técnica de ajuste matricial. Esse circuito é gravado em um arquivo de texto que pode ser facilmente incorporado ao ATP, pois já é gerado na linguagem própria desta plataforma.

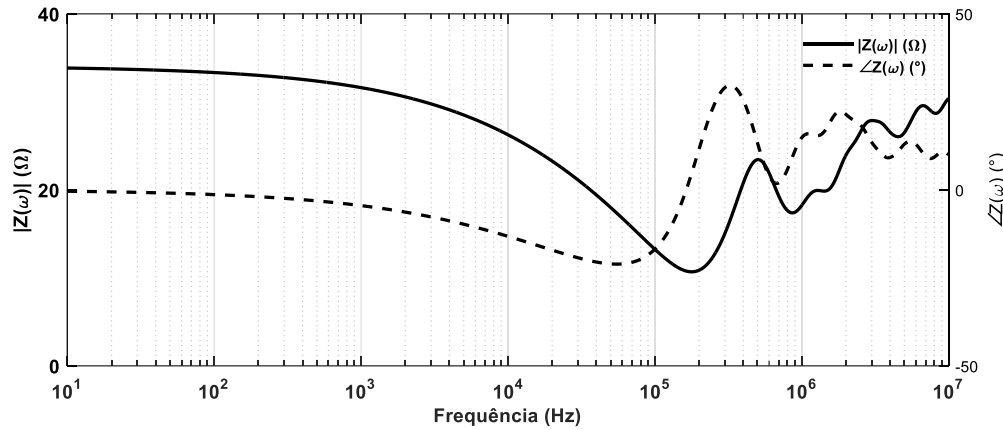
Faz-se demonstrado, após o exposto, que o processo para determinar a impedância harmônica com precisão suficiente e o acoplamento deste modelo ao ATP é trabalhoso, pois este *software* não possui modelos nativos de aterramento que representem sua característica dependente da frequência. Por conta disso, sua implementação intrincada converte-se num limitador para que ela seja empregada vastamente nos estudos envolvendo sistemas de aterramento e descargas atmosféricas.

A Figura 3.8 descreve o comportamento dependente da frequência para um arranjo típico de aterramento (ver Figura 3.7) de torres de transmissão autoportantes, formado por quatro cabos contrapeso de aço cobreado 4/0 com 60 metros de comprimento e imersos a 50 cm de profundidade em um solo de $3.000 \Omega.m$ (CEMIG, 2014; ENERGISA, 2017). Esse gráfico foi obtido com a utilização do modelo original apresentado anteriormente e incluindo a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência utilizando o modelo causal proposto por Alípio e Visacro (2014).

Com base na curva apresentada na Figura 3.8, é possível visualizar o comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento. Pode-se constatar, da mesma forma, que tal dependência não é significativa até aproximadamente 1 kHz e

que no caso de aplicações de solicitações com espectro de frequência típicas limitadas a este valor de frequência, a impedância poderia ser aproximada pela resistência de aterramento em baixas frequências.

Figura 3.8- Comportamento da impedância harmônica do sistema de aterramento



Fonte: Acervo do Autor.

3.8 MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DISRUPTIVO NA CADEIA DE ISOLADORES

A ocorrência do *backflashover* está relacionada à sobretensão resultante na cadeia de isoladores, que pode romper sua rigidez dielétrica a depender do nível de tensão a que a cadeia fica sujeita. Com o objetivo de aferir a incidência de ruptura do isolamento, emprega-se neste estudo o método DE (*Disruptive Effect*) em razão de sua relativa simplicidade e consistência física (HILEMAN, 1999).

Como descrito anteriormente, essa ferramenta 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 ultrapassar o valor crítico, o surto de tensão ocasionará uma descarga disruptiva, provocando a ruptura do isolamento. O efeito disruptivo da onda de tensão é calculado por (HILEMAN, 1999):

$$DE = \int_{t_0}^t [e(t) - V_0]^k dt \quad (3.35)$$

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 uma cadeia de isoladores tipicamente empregada em linhas de transmissão de 138 kV pode-se considerar as seguintes constantes (HILEMAN, 1999):

- 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 possibilita determinar se as ondas de tensão resultantes de simulações no ATP podem provocar ou não a ruptura da rigidez dielétrica de isoladores, e o consequente desligamento da linha.

3.9 MÉTODO PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE DESLIGAMENTOS POR BACKFLASHOVER EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

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

Além deste, outro parâmetro importante é o número de descargas que atingem uma linha de transmissão por 100 km por ano (N_S), que é definido pela seguinte expressão (IEEE, 1997):

$$N_S = N_g \times \left(\frac{28h^{0,6}+b}{10} \right) \quad (3.36)$$

em que:

- N_g é a densidade de descargas atmosféricas para o solo (descargas/ km^2 /ano);
- h é a altura da torre (m);
- b é a distância entre os cabos guarda da torre (m);

- Fator 1/10 corresponde a um fator de conversão de unidades, pois N_g é fornecido em [descargas/km²/ano]] e h e b em metros.

No cálculo da taxa de *backflashover* somente as descargas atmosféricas que incidem diretamente na torre são consideradas. De maneira empírica, assume-se que 60% das descargas que atingem uma linha de transmissão incidem diretamente nas torres (GRANT, ANDERSON e HILEMAN, 1985; ANDERSON, CLAYTON, ELAHIT *et. al.*, 1993). Desta forma, o número de descargas que atingem a torre de uma linha (N_T) é fornecido pela equação 3.37:

$$N_T = 0,6 \times (N_S) \quad (3.37)$$

em que N_S é o número de descargas que atingem uma linha de transmissão por 100 km por ano.

Pode-se, enfim, calcular a taxa de *backflashover* (N_{BF}). A equação (3.38) mostra o cálculo de N_{BF} (número de desligamentos por *backflashover* por 100 km de linha por ano), representada a seguir:

$$N_{BF} = \frac{N_T}{100} \times P[I \geq I_c] \quad (3.38)$$

em que:

- N_T é o número de descargas que atingem a torre;
- $P[I \geq I_c]$ é a probabilidade de uma corrente de descarga atmosférica ser superior a mínima corrente de descarga suficiente para que ocorra o desligamento da linha de transmissão.

A divisão por “100” na equação (3.30) é para transformar $P[I \geq I_c]$ de porcentagem para p.u.

4 RESULTADOS

Esta seção tem por objetivo apresentar e analisar os resultados provenientes das simulações de transitórios eletromagnéticos de origem atmosférica aplicando as condições base para simulação, considerando as modelagens e metodologia descritos no capítulo 3. Estas foram realizadas e fazendo o uso da plataforma ATP, mais especificamente o ATPDraw, que consiste numa interface gráfica, permitindo assim a criação dos arquivos de entrada de dados, com base no circuito a ser simulado, através de modelos gráficos. Cada componente gráfico permite a inclusão dos parâmetros correspondentes em janelas próprias que ajustam os dados aos formatos de entrada requeridos pelo ATP.

Especificamente em relação ao sistema de aterramento, é utilizada a modelagem desenvolvida na seção 2.2.4, que utiliza teoria de linhas de transmissão e inclui o acoplamento eletromagnético, em função das suas características e vantagens apresentadas anteriormente, e considera os parâmetros do solo ora constantes, ora variantes com a frequência, a fim de se avaliar o impacto da inclusão da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência nos resultados simulados.

Nas simulações, são considerados seis valores de resistividade em baixa frequência, $\rho_0 = 300, 500, 1.000, 3.000, 5.000$ e $10.000 \Omega.m$, os quais abrangem solos de resistividade baixa (300 e $500 \Omega.m$), moderada e elevada (1.000 e $3.000 \Omega.m$) e bastante elevada (5.000 e $10.000 \Omega.m$). Vale ressaltar que esta ampla faixa de valores de resistividade do solo em baixa frequência é utilizada para analisar a sensibilidade do modelo proposto.

Neste trabalho não são considerados os efeitos associados ao processo de ionização do solo, cujos efeitos são desprezados nas simulações em virtude dos longos cabos contrapeso usualmente empregados em sistemas de aterramento de linhas de transmissão, tornando este efeito desprezível sem perda de consistência dos resultados levantados (VISACRO, 2007).

A Tabela 4.1 apresenta os comprimentos (L) dos cabos contrapeso empregados no aterramento de pé de torre, que correspondem aos tipicamente adotados pelas concessionárias de transmissão de energia em função da resistividade do solo (ENERGISA, 2017). Vale ressaltar que estes valores foram definidos em razão do comprimento efetivo destes condutores, desconsiderando a variação dos parâmetros

elétricos do solo com a frequência, o que é tradicionalmente feito em aplicações na indústria. Em todos os casos, os cabos contrapeso que formam o sistema de aterramento são do tipo aço cobreado 4/0, e enterrados a 50 cm de profundidade em relação a superfície do solo.

Tabela 4.1- Comprimentos típicos de cabos contrapeso em função da resistividade do solo.

Resistividade do solo ($\Omega \cdot m$)	300	500	1.000	3.000	5.000	10.000
L (m)	20	30	40	60	80	130

As descargas atmosféricas incidentes adotadas nestas simulações representam as primeiras descargas de retorno, com seus parâmetros medianos, cujas definições foram apresentadas na seção 3.1.1, e medidos por torre instrumentada no Morro do Cachimbo – MG. Os valores destes parâmetros estão explicitados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros das descargas utilizadas nas simulações

Descargas Atmosféricas	
Parâmetros	Primeiras Descargas
I_{p2} (kA)	45,3
T_{10} (μs)	5,6
T_{30} (μs)	2,9
S_{10} (kA/ μs)	5,8
S_{30} (kA/ μs)	8,4

É importante salientar que, para a representação da onda de corrente, adicionou-se uma resistência concentrada em paralelo com a fonte de corrente, de 1.500Ω (e que pode ser vista na Figura 2.24), destinada a representar a impedância equivalente do canal de descarga (RAKOV, 2001). Em todos os casos analisados nesta seção, considera-se a descarga atmosférica incidindo no topo da torre.

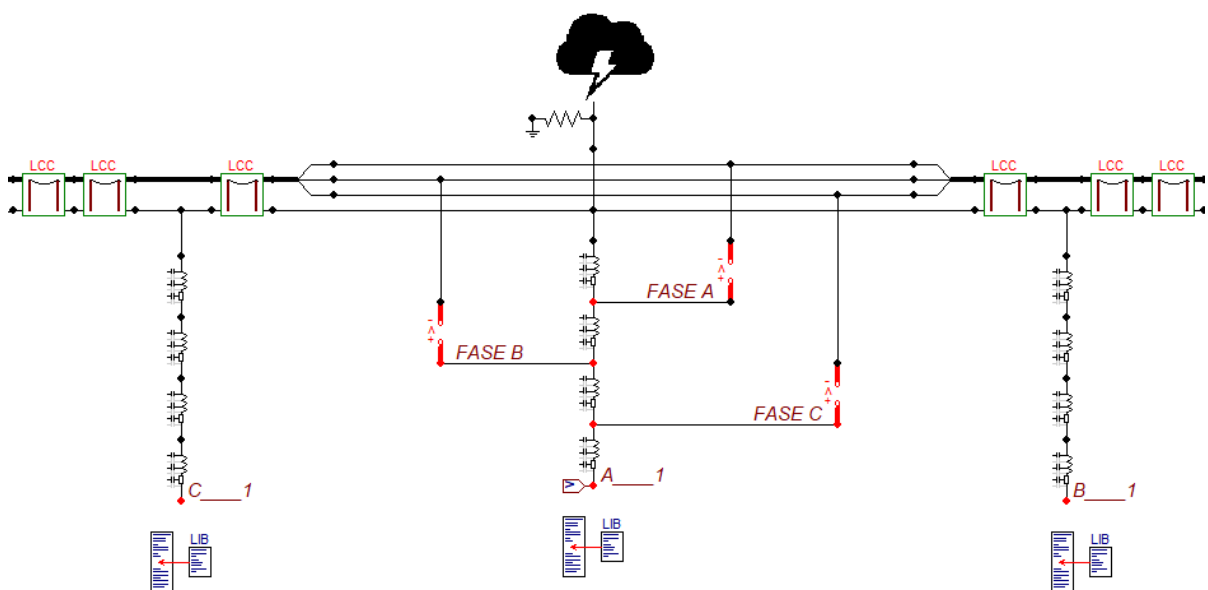
As linhas de transmissão foram modeladas conforme o modelo original JMarti, anteriormente descrito na seção 2.3.6, sem prejuízo de consistência nos resultados alcançados. Isto ocorre pois, quando uma descarga atmosférica incide no topo da torre, a onda de corrente e a onda de tensão associadas podem 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. Assim sendo, 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 (ALIPIO, CONTI, *et al.*, 2019).

A partir das simulações dos circuitos implementados no ATP, são apresentados inicialmente os resultados das sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores da torre de transmissão estudada, utilizando o modelo desenvolvido e proposto nesta tese e uma modelagem bastante precisa, o *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) (VISACRO e J. SOARES, 2005), baseada diretamente nas Equações de Maxwell, e amplamente utilizada para a simulação de aterramentos elétricos sob condições impulsivas, para efeito de validação computacional da modelagem. Em seguida, serão expostos os resultados das sobretensões resultantes na cadeia de isoladores da torre de transmissão utilizando a modelagem desenvolvida nesta tese, considerando os parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência, e posteriormente, os efeitos disruptivos associados aos isoladores da linha e o desempenho correspondente desta linha frente a descargas atmosféricas. Por fim, será realizada uma comparação destes resultados, caso seja considerada a aplicação da técnica de proteção parcial da linha por dispositivos para-raios.

A título de exemplo, a Figura 4.1 apresenta um dos circuitos simulados no ATP.

Figura 4.1- Circuito de simulação da incidência de descarga atmosférica em linha de transmissão.



Fonte: Acervo do Autor.

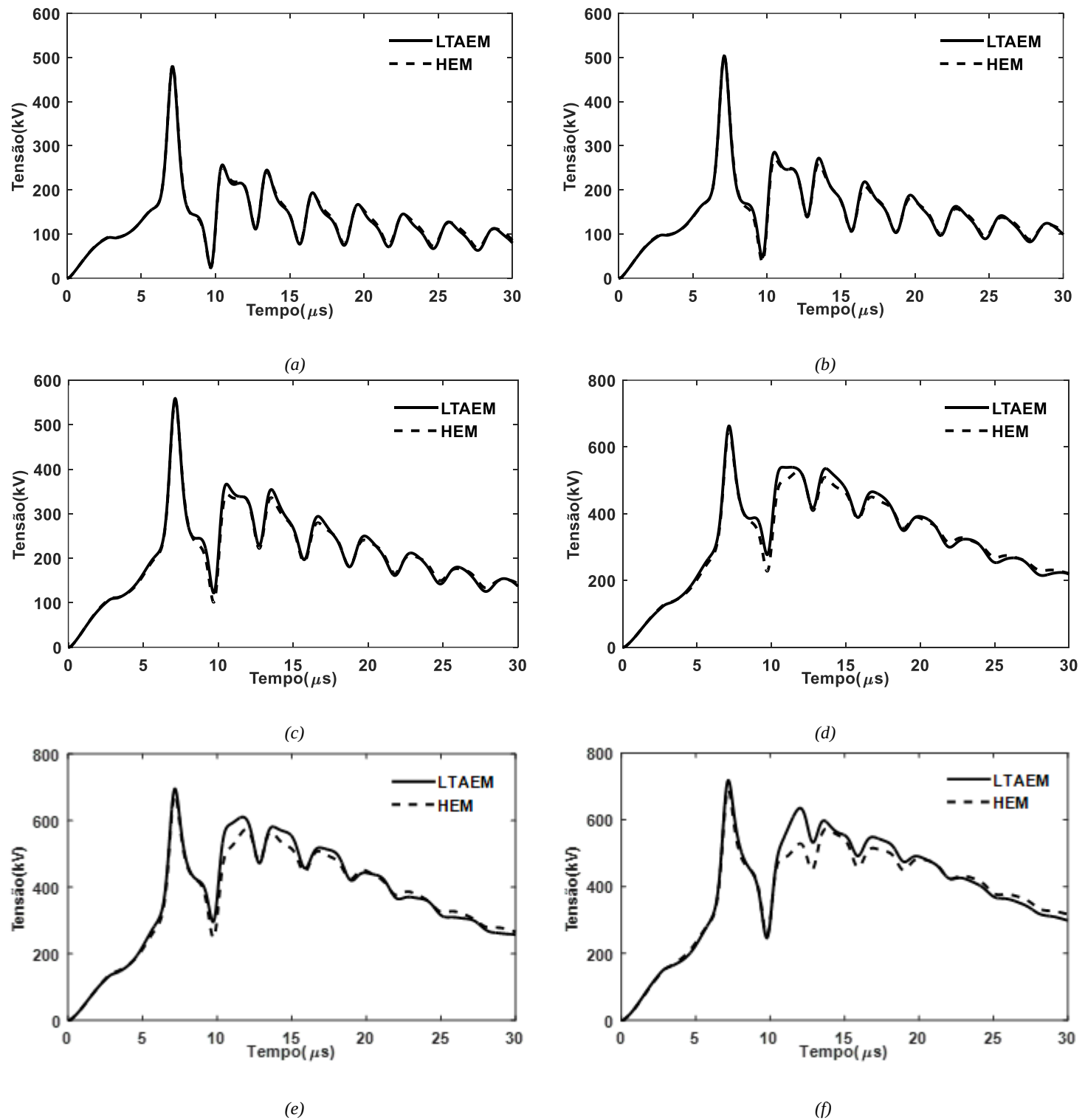
4.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO ATERRAMENTO PROPOSTA

Conforme mencionado anteriormente, nesta seção será realizada uma comparação entre os resultados utilizando a modelagem do aterramento desenvolvida nesta tese com os de um modelo amplamente utilizado e reconhecido por sua precisão, o *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM), baseado na teoria de campos eletromagnéticos, e validado experimentalmente (VISACRO e J. SOARES, 2005).

Esta comperação foi feita com o objetivo de validar computacionalmente a precisão e a eficiência do modelo desenvolvido nesta tese, para assim justificar sua utilização, sendo esta, uma das principais contribuições deste trabalho.

A Figura 4.2 apresenta as sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores da linha simulada conforme as condições base apresentadas na seção 3.1.1., para primeiras descargas de retorno e comparando as duas modelagens mencionadas no parágrafo anterior. Com o objetivo de tornar mais amigável a análise gráfica, serão apresentados os resultados da sobretensão apenas da cadeia de isoladores da fase A (fase mais alta da linha). Por sua vez, a Tabela 4.3 sumariza os valores de pico das sobretensões simuladas e explicita a precisão da modelagem do aterramento desenvolvida neste trabalho, inclusive de forma percentual.

Figura 4.2 – Sobretensões simuladas comparando a modelagem por LT com acoplamento eletromagnético x HEM, conforme condições base na incidência de uma primeira descarga de retorno para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 300\Omega.m$ e $L = 20m$; (b) $\rho_0 = 500\Omega.m$ e $L = 30m$; (c) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (d) $\rho_0 = 3000\Omega.m$ e $L = 60m$; (e) $\rho_0 = 5000\Omega.m$ e $L = 80m$; (f) $\rho_0 = 10000\Omega.m$ e $L = 130m$.



Fonte: Acervo do Autor.

Tabela 4.3 – Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores A simuladas considerando a modelagem desenvolvida (LTAEM) e o modelo HEM conforme condições base e incidência de primeiras descargas de retorno.

Arranjos do aterramento	Sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores (kV)		
	LTAEM	HEM	$\Delta(\%)$
$\rho_o = 300\Omega.m$; L = 20m	480	480	0,0%
$\rho_o = 500\Omega.m$; L = 30m	504	503	-0,2%
$\rho_o = 1.000\Omega.m$; L = 40m	559	554	-0,9%
$\rho_o = 3.000\Omega.m$; L = 60m	663	650	-2,0%
$\rho_o = 5.000\Omega.m$; L = 80m	696	677	-2,8%
$\rho_o = 10.000\Omega.m$; L = 130m	718	691	-3,9%

Da análise das curvas apresentadas na Figura 4.2 e dos valores de pico de sobretensão da Tabela 4.3, pode-se constatar que o modelo proposto neste trabalho possui um nível de precisão bastante próximo ao benchmark, variando entre 100% e 96,1% de precisão em relação aos valores de pico em comparação à utilização do HEM. Em relação à eficiência computacional das simulações, a modelagem desenvolvida nesta tese possui vantagem bastante relevante, pois possui tempo médio de simulação menor do que 10 segundos, enquanto para as simulações utilizando o método HEM, é necessário em média 60 minutos, utilizando o mesmo equipamento (Processador Core i5-6200U @ 2,3 GHz e 8 GB de RAM).

A qualidade dos resultados alcançados nesta validação preliminar motivou a aplicação da modelagem desenvolvida para estudos adicionais, inclusive realizando uma análise de sensibilidade desta em relação ao efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo sobre o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. As seções a seguir apresentam os demais estudos realizados.

4.2 SOBRETENSÕES RESULTANTES NAS CADEIAS DE ISOLADORES

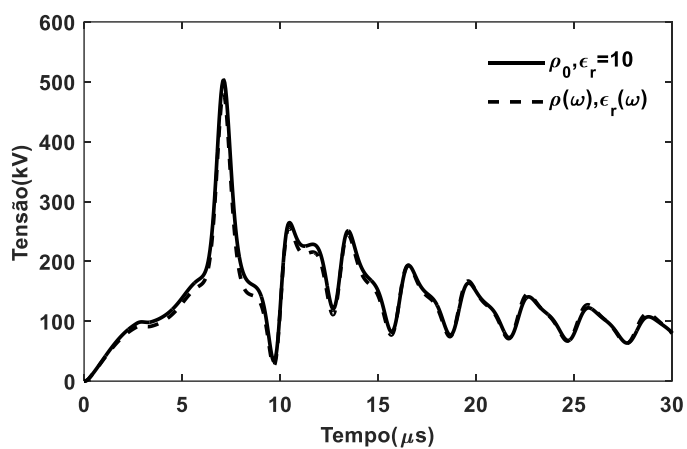
Para as resistividades e comprimentos de cabo contrapeso típicos apresentados na Tabela 4.1, avalia-se a influência da inclusão da variação dos parâmetros elétricos do solo na representação do aterramento sobre as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores da torre. Com o objetivo de tornar mais amigável a análise gráfica, além do fato da condição mais severa ser também de maior relevância em relação às ocorrências de interrupção da cadeia de isoladores e consequente desempenho da linha de transmissão

frente a descargas atmosféricas, serão apresentados os resultados da sobretensão apenas da cadeia de isoladores da fase A (fase mais alta da linha).

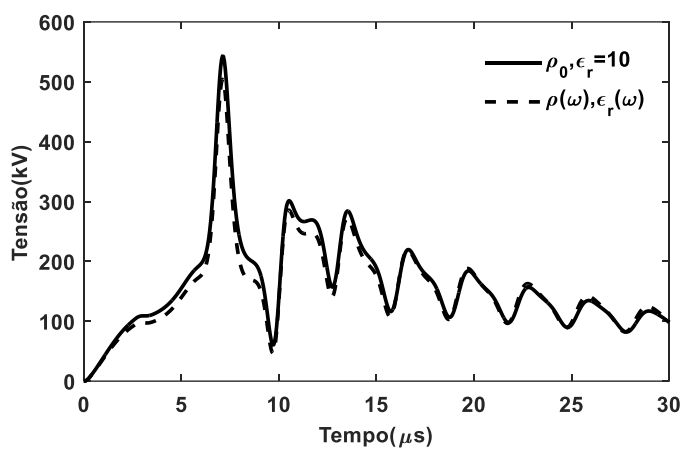
Na cadeia de isoladores da fase A, em razão da configuração do caso base utilizado nas simulações, os valores de pico da sobretensão são maiores que os das fases mais baixas (B e C). Isto corrente, pois, a parcela da onda tensão que é refletida de volta para o topo da torre (lembrando que esta possui polaridade oposta à onda de tensão desenvolvida na cadeia de isoladores em razão do surto atmosférico), “alcança” a fase A após as fases B e C, em função da posição delas em relação ao solo.

A Figura 4.3 apresenta as sobretensões simuladas conforme as condições base apresentadas na seção 3.1.1., para primeiras descargas de retorno e utilizando a modelagem original proposta, considerando os parâmetros do solo constantes e variantes com o tempo, para efeito de comparação. Por sua vez, a Tabela 4.4 sumariza os valores de pico das curvas de sobretensões apresentadas e explicita a redução alcançada com a inclusão da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, inclusive de forma percentual.

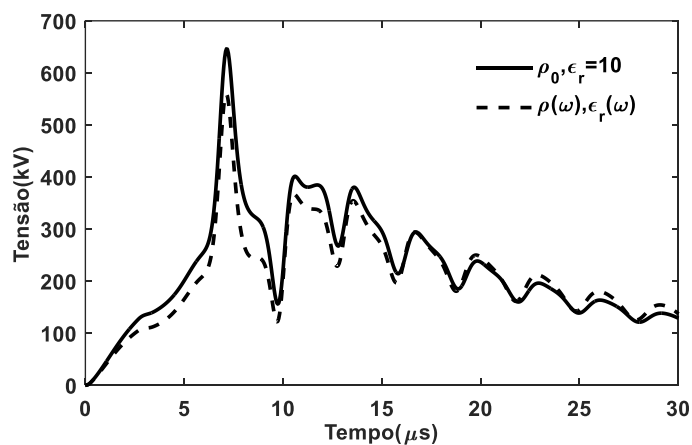
Figura 4.3 – Sobretensão simulada na fase A conforme condições base na incidência de uma primeira descarga de retorno para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 300\Omega.m$ e $L = 20m$; (b) $\rho_0 = 500\Omega.m$ e $L = 30m$; (c) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (d) $\rho_0 = 3000\Omega.m$ e $L = 60m$; (e) $\rho_0 = 5000\Omega.m$ e $L = 80m$; (f) $\rho_0 = 10000\Omega.m$ e $L = 130m$.



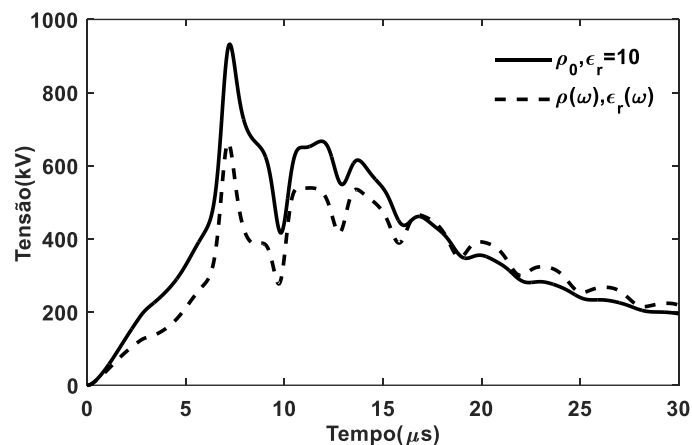
(a)



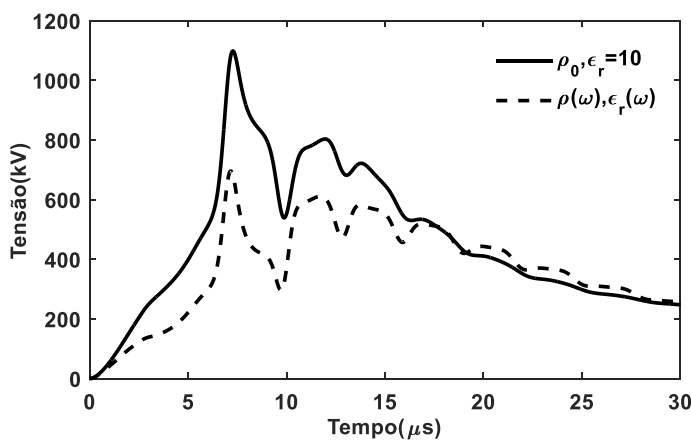
(b)



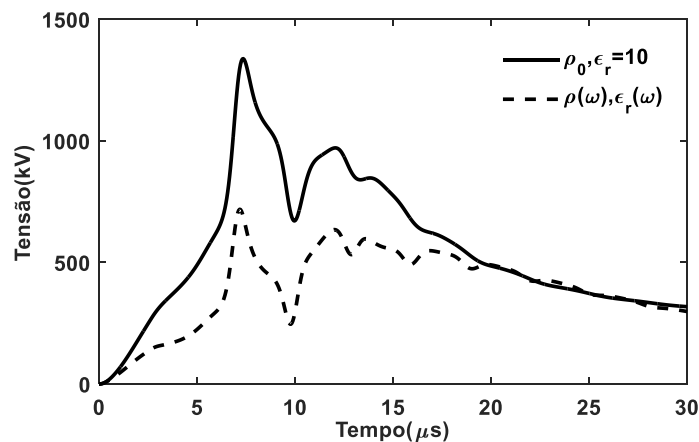
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Acervo do Autor.

Tabela 4.4 – Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores da fase A simulado conforme condições base e incidência de primeiras descargas de retorno.

Arranjos do aterramento	Sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores (kV)		
	$\rho = \rho_0, \varepsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega), \varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_0 = 300\Omega.m; L = 20m$	503	480	-4,6%
$\rho_0 = 500\Omega.m; L = 30m$	543	504	-7,2%
$\rho_0 = 1.000\Omega.m; L = 40m$	646	559	-13,5%
$\rho_0 = 3.000\Omega.m; L = 60m$	933	663	-28,9%
$\rho_0 = 5.000\Omega.m; L = 80m$	1098	696	-36,6%
$\rho_0 = 10.000\Omega.m; L = 130m$	1338	718	-46,3%

Os resultados das curvas apresentadas anteriormente e da Tabela 4.4 mostram que, como esperado, a variação dos parâmetros do solo com a frequência causa uma redução, de forma geral, das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores e que esse efeito se torna mais relevante à medida que a resistividade de baixa frequência é aumentada.

Pode-se constatar que esta redução é baixa para solos de resistividade baixa ($\rho_0 = 300$ e $500\Omega.m$), se torna significativa para os solos de resistividade moderada ($\rho_0 = 1.000\Omega.m$) e passa a ser extremamente significativa em solos com resistividade elevada e bastante elevada ($\rho_0 = 3.000, 5.000$ e $10.000\Omega.m$). Vale ressaltar que, para solos com resistividade igual ou superior a $1.000\Omega.m$, o efeito da inclusão da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência faz com que a amplitude da onda de tensão permaneça reduzida durante um período ao longo da onda após o valor de pico, e que isso reduz o potencial de ocorrência de falha na suportabilidade da cadeia dos isoladores, como pode ser deduzido facilmente da definição do método DE (vide seção 2.3.8), que será objeto de análise da próxima subseção.

4.3 DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de uma linha de transmissão impactam diretamente o desempenho destas, visto que podem causar a ruptura da rigidez dielétrica dos isoladores do sistema. Sendo assim, é de fundamental importância estabelecer um critério de avaliação do potencial de ruptura do isolamento de uma linha

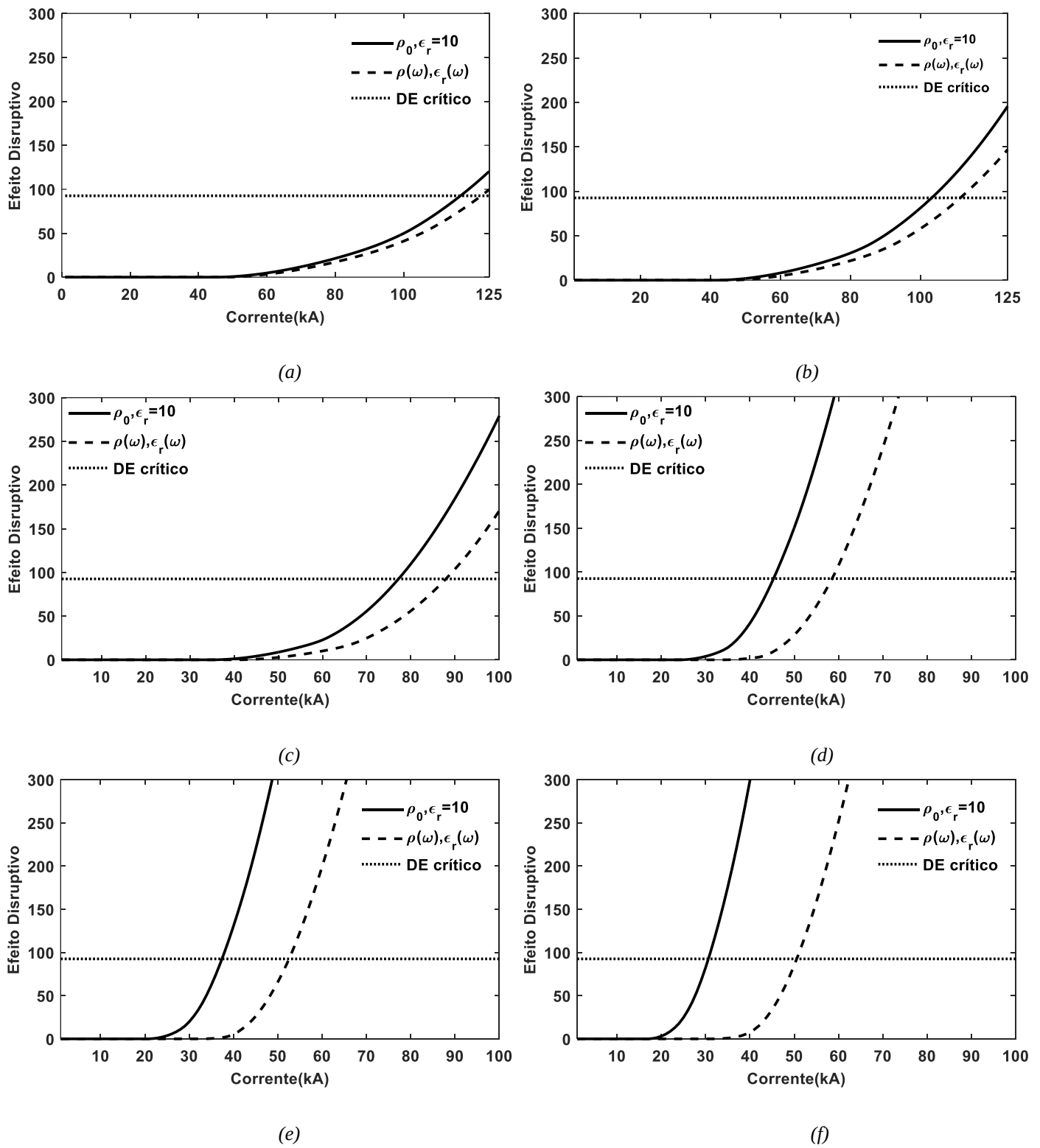
por efeito de uma onda de tensão desenvolvida em seus isoladores. Conforme mencionado na Seção 2.2.3, o Método DE permite esta avaliação.

Conforme exposição anterior, para os casos estudados, as fases superiores da linha são expostas a condições mais severas de sobretensão, resultando em maiores efeitos disruptivos em seus isoladores, em comparação aos efeitos disruptivos em isoladores instalados mais abaixo na torre de transmissão. Assim, são apresentados a seguir gráficos com os efeitos disruptivos (DE) observados na fase mais alta da linha de transmissão, especificamente nesse caso a fase A, de acordo com a configuração da torre ilustrada na seção 2.3.1. A exemplo dos gráficos apresentados nos itens anteriores, os efeitos disruptivos são levantados para as duas condições do sistema de aterramento abordadas neste trabalho: impedância harmônica com parâmetros elétricos do solo constantes e variantes com a frequência.

Adicionalmente, para o cálculo do efeito disruptivo associado, a amplitude da descarga é variada. Para as primeiras descargas de retorno, os parâmetros são: solos de resistividades baixas ($\rho_0 = 300$ e $500 \Omega.m$), a amplitude do valor de pico foi variada de 1 a 120 kA, e para os demais casos de 1 a 100 kA. Estes valores foram selecionados em função da ocorrência de disrupção da cadeia de isoladores para o método DE. No que diz respeito às variações na amplitude, a forma de onda destas descargas permanece as mesmas, conservando os parâmetros de tempos de frente e de meia onda, conforme os valores medianos das correntes medidas na estação Morro do Cachimbo (VISACRO, SOARES JR., *et al.*, 2004). Vale ressaltar, que este procedimento foi realizado com efeito de ilustração didática, pois é sabido que existe correlação entre os parâmetros característicos das ondas de corrente.

Nos gráficos a seguir, a linha horizontal tracejada equivale ao efeito disruptivo crítico ($DE_c = 92,5735$ kV. μs) da cadeia de isoladores considerada. Similarmente aos gráficos apresentados anteriormente, as legendas contendo ρ_0 , $\varepsilon_r = 10$ e $\rho(\omega)$, $\varepsilon_r(\omega)$, representam, respectivamente, o aterramento por meio sua impedância harmônica com parâmetros elétricos do solo constantes e variantes com a frequência, e às curvas representadas por estas legendas, equivalem aos efeitos disruptivos associados. Os resultados estão apresentados na Figura 4.4, para solos de resistividades baixa, moderada e/ou elevada e muito elevada.

Figura 4.4 – Efeito disruptivo calculado para na fase A conforme condições base na incidência de uma primeira descarga de retorno para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 300\Omega.m$ e $L = 20m$; (b) $\rho_0 = 500\Omega.m$ e $L = 30m$; (c) $\rho_0 = 100\Omega.m$ e $L = 40m$; (d) $\rho_0 = 3000\Omega.m$ e $L = 60m$; (e) $\rho_0 = 5000\Omega.m$ e $L = 80m$, (f) $\rho_0 = 10000\Omega.m$ e $L = 130m$.



Fonte: Acervo do Autor.

Conforme o esperado, em função da redução dos valores de pico das sobretensões desenvolvidas nas cadeias dos isoladores com a inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência apresentados na Tabela 4.4, as curvas do efeito disruptivo em função da amplitude da corrente determinadas explicitam que a disrupção da cadeia de isoladores acontece com valores de pico superiores para a corrente da descarga atmosférica, quando comparadas com as curvas dos casos em que os parâmetros do solo são considerados constantes. Seguindo a mesma tendência, pode-se constatar que a desigualdade entre as curvas aumenta conforme os valores de resistividade do solo aumenta.

A partir dos resultados expostos nos gráficos do efeito disruptivo (Figura 4.5), a Tabela 4.5 apresenta as amplitudes críticas de descarga, definida como o valor de amplitude a partir do qual ocorre a ruptura da rigidez dielétrica da cadeia de isoladores, levantado a partir do método DE, para cada sistema de aterramento de pé de torre avaliado para representações do sistema de aterramento ora considerando e ora desconsiderando a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência.

Tabela 4.5 – Amplitudes das Correntes de Descarga Críticas para primeiras descargas de retorno, conforme aplicação do método DE.

Arranjos do aterramento	Amplitude da Corrente de Descarga Crítica (kA)		
	$\rho=\rho_o,$ $\epsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_o= 300\Omega.m; L = 20m$	117	123	5,1%
$\rho_o= 500\Omega.m; L = 30m$	103	111	7,8%
$\rho_o= 1.000\Omega.m; L = 40m$	77	88	14,3%
$\rho_o= 3.000\Omega.m; L = 60m$	46	59	28,3%
$\rho_o= 5.000\Omega.m; L = 80m$	38	53	39,5%
$\rho_o= 10.000\Omega.m; L = 130m$	31	51	64,5%

Com base nos valores de amplitude crítica levantados, calcula-se a probabilidade de uma descarga atmosférica exceder esses valores, considerando distribuição cumulativa das primeiras descargas de retorno registradas no Morro do Cachimbo (VISACRO, SOARES JR., *et al.*, 2004), por meio da equação:

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{45,3}\right)^{3,9}} \quad (2.20)$$

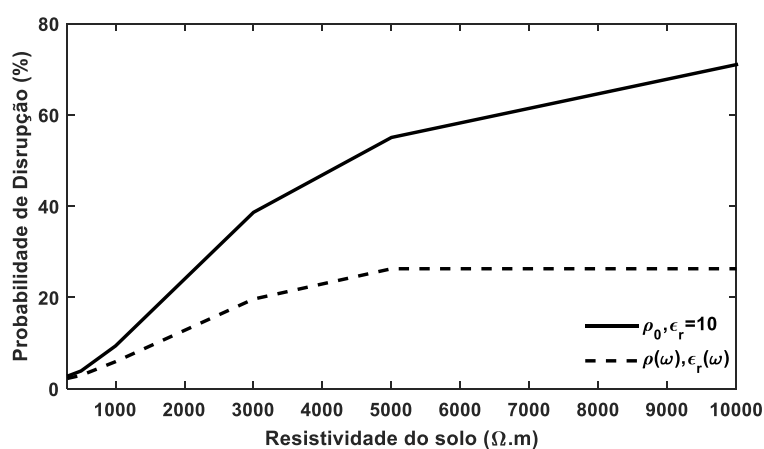
Em que: P_I é a probabilidade de uma descarga atmosférica exceder um dado valor I de amplitude, dado em kA.

A partir da equação (2.20), a Tabela 4.6 apresenta a probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores, segundo o método DE, para cada sistema de aterramento de pé de torre e representação desse aterramento em simulações no domínio do tempo. Estes resultados, relatados na referida tabela, serão também apresentados em forma de gráfico na Figura 4.5, de forma a facilitar a análise qualitativa.

Tabela 4.6 - Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores para primeiras descargas de retorno, conforme aplicação do método DE.

Arranjos do aterramento	Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores (%)		
	$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega), \epsilon_r(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_0 = 300\Omega.m; L = 20m$	2,41%	1,99%	-17,4%
$\rho_0 = 500\Omega.m; L = 30m$	3,90%	2,94%	-24,6%
$\rho_0 = 1.000\Omega.m; L = 40m$	11,22%	6,98%	-37,8%
$\rho_0 = 3.000\Omega.m; L = 60m$	48,51%	26,30%	-45,8%
$\rho_0 = 5.000\Omega.m; L = 80m$	66,49%	35,15%	-47,1%
$\rho_0 = 10.000\Omega.m; L = 130m$	81,45%	38,65%	-52,5%

Figura 4.5– Probabilidade de Disrupção da Cadeia de Isoladores em função do arranjo do aterramento, para primeiras descargas de retorno.



Fonte: Acervo do Autor.

As expressivas diferenças observadas na Tabela 4.5 (amplitudes críticas de corrente de descarga) reverberaram nas probabilidades apresentadas na Tabela 4.6 (probabilidade de disrupção das cadeias de isoladores) e no gráfico da Figura 4.6. Observa-se que a probabilidade de uma descarga alcançar a amplitude crítica para uma determinada condição de simulação são consideravelmente majoradas para a representação do sistema de aterramento por sua impedância considerando os parâmetros elétricos do solo constantes.

A partir dos valores obtidos na Tabela 4.6 (probabilidade de disrupção das cadeias de isoladores), da geometria da torre (vide seção 3.1.1) e do método detalhado em 3.1.9, é calculada a taxa de desligamento por *backflashover* da linha de transmissão estudada. O valor considerado de densidade de descargas plenas para solo foi $N_g = 5$, por se tratar de um valor médio encontrado no estado de Minas Gerais (ABNT, 2015), onde também está localizada a estação do Morro do Cachimbo.

Para analisar as taxas de desligamento por *backflashover* estimadas foram consideradas nove diferentes distribuições de resistividade do solo ao longo desta: seis distribuições uniformes (ρ_0 a partir de 300 a 10.000 $\Omega\cdot m$) e três distribuições não-uniformes. Estas representam condições diferentes de solo ao longo da linha, sendo assim mais realistas. Destas três, uma prevê apenas solos de resistividade baixa a moderada (sem incluir amostras acima de 1.000 $\Omega\cdot m$), outra prevê solos de resistividade moderada (amostras de todos os valores de resistividade incluídos, com maior frequência os solos com resistividade de 500 e 1.000 $\Omega\cdot m$), e a última prevê solos de resistividade alta a extremamente alta (sem amostras abaixo de 3.000 $\Omega\cdot m$).

A Tabela 4.7 sumariza os resultados da análise relatada anteriormente e indica a redução nas taxas de desligamento (Δ) esperadas.

Tabela 4.7 – Taxa de desligamento por *backflashover* esperada considerando os parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência e diversas distribuições de resistividade de solo ao longo das linhas.

Hipóteses de distribuição de ρ ao longo da Linha de Transmissão (%)						Desligamentos/100km/ano		
300 ($\Omega\cdot m$)	500 ($\Omega\cdot m$)	1.000 ($\Omega\cdot m$)	3.000 ($\Omega\cdot m$)	5.000 ($\Omega\cdot m$)	10.000 ($\Omega\cdot m$)	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
100%	0%	0%	0%	0%	0%	1,7	1,4	-19,4%
0%	100%	0%	0%	0%	0%	2,7	2	-25,9%
0%	0%	100%	0%	0%	0%	7,7	4,8	-37,7%
0%	0%	0%	100%	0%	0%	33,5	18,1	-46,0%
0%	0%	0%	0%	100%	0%	45,9	24,3	-47,1%
0%	0%	0%	0%	0%	100%	56,2	26,7	-52,5%
30%	30%	40%	0%	0%	0%	4,4	2,9	-34,1%
10%	30%	30%	10%	10%	10%	16,9	9,1	-46,2%
0%	0%	0%	40%	30%	30%	44,0	22,5	-48,9%

Considerando as distribuições uniformes, os resultados da Tabela 4.7 mostram que considerar a dependência de frequência dos parâmetros do solo provoca uma forte diminuição da estimativa da taxa de desligamentos por *backflashover* em todos os casos, partindo de 19,4% até aproximadamente 53%. As taxas de desligamento estimadas (por

100 km por ano) sob a hipótese de parâmetros de solo constantes variam de 1,7 a 56,2, o que demonstra o crescimento acentuado conforme a resistividade do solo é aumentada.

Esta redução também é significativa para as distribuições não-uniformes. Considerando as taxas de desligamento de 4,4; 16,9 e 44,0 (para as condições de resistividade do solo de baixa a moderada, moderada, e alta a extremamente alta) são reduzidas em 34,1%, 46,2%, e 48,9%, respectivamente, devido ao efeito da dependência da frequência. Dos resultados apresentados, fica claro que a dependência da frequência dos parâmetros do solo pode afetar muito significativamente as taxas de desligamentos das linhas de transmissão, tornando evidente a relevância da sua inclusão em estudos deste tipo.

A partir dos resultados, poderia se argumentar que as estimativas via parâmetros constantes são mais conservadoras, do ponto de vista da proteção dos sistemas elétricos. Porém quando tais erros se tornam muito elevados, estimativas grosseiras do desempenho real da linha podem ser tomadas como verdade, causando consequentes erros, também grosseiros, nas proteções aplicadas a estes sistemas elétricos. Partindo deste estudo, pode-se concluir, ainda, que estes erros crescem proporcionalmente com o aumento da resistividade do solo para baixas frequências.

Por fim, objetivando-se caracterizar as práticas de projeto usualmente utilizadas por algumas concessionárias brasileiras em termos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, a Tabela 4.8 quantifica as taxas de desligamento “aceitáveis” por classe de tensão, considerando consumidores comuns, aqueles que a interrupção do fornecimento de energia causará perdas econômicas, mas não causará prejuízos graves, afetando seriamente o processo produtivo ou a segurança pública (DIAS, 2006).

Tabela 4.8- Valores típicos de desligamentos/100 km/ano considerados “aceitáveis” na prática de projetos de Linhas de Transmissão que atendam consumidores comuns (DIAS, 2006).

Desempenho Típico Aceitável das LT's	
Tensão Nominal da LT	Desligamentos/ 100km / Ano
69 kV	10 - 15
138 kV	≤ 10
230 kV	≤ 5
345 kV	2 - 3
500 kV	1 - 2

Considerando o número de desligamentos “aceitável” menor ou igual a 10 por 100 km de linha por ano para linhas de classe de tensão de 138 kV e os resultados da Tabela 4.7, é necessário fazer uso de outras estratégias para atender aos critérios mínimos de qualidade/confiabilidade definidos pelos órgãos reguladores em linhas que atravessam regiões com resistividade do solo média a partir de 3.000 $\Omega.m$ (DIAS, 2006). Dentre essas possíveis estratégias, destaca-se o uso de dispositivos para-raios (ALIPIO, DUARTE, *et al.*, 2017), e este fato serviu de motivação para o estudo que será apresentado a partir da próxima seção desta tese.

4.4 LINHAS DE TRANSMISSÃO PARCIALMENTE PROTEGIDAS POR DISPOSITIVOS PARA-RAIOS

Com o objetivo de melhorar o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, aumentando a confiabilidade dos sistemas de energia, podem ser utilizados para-raios (SADOVIC, JOULIE, *et al.*, 1997; TARCHINI e GIMENEZ, 2003; MARTINEZ e CASTRO-ARANDA, 2007; HE, ZENG, *et al.*, 2008; MOHAJERYAMI e DOOSTAN, 2016). Esses dispositivos são instalados, normalmente, em paralelo com as cadeias de isoladores, sendo que um de seus terminais é conectado à torre de transmissão, que está aterrada. Nesse sentido, o aterramento também apresenta papel relevante na atuação e no desempenho do dispositivo para-raios (ALIPIO, PINTO, *et al.*, 2016; ALIPIO, DUARTE, *et al.*, 2017).

Os para-raios são instalados especialmente em regiões com alta densidade de descargas atmosféricas para o solo e/ou locais onde é difícil fornecer valores de impedância de aterramento suficientemente baixos, devido aos altos valores de resistividade do solo. Ambos os aspectos, ou seja, alta densidade de descargas atmosféricas para o solo e altos valores de resistividade do solo são comuns no Brasil. Além disso, as correntes de descarga atmosféricas no Brasil, considerando as medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo, apresentam valores de pico médios maiores do que as correntes medidas na Estação San Salvatore, geralmente assumidas como referência na literatura internacional (BERGER, ANDERSON e KRONINGER, 1975; VISACRO, SOARES JR., *et al.*, 2004), aumentando a probabilidade de interrupção do isolamento ao longo da linha.

Devido a restrições de custo, os para-raios não são normalmente instalados em todas as torres ao longo da linha de transmissão, mas somente naquelas localizadas em regiões críticas, apresentando alta densidade de descargas atmosféricas para o solo e/ou alto valores de impedância de aterramento do pé da torre (ASSIS, BOAVENTURA, *et al.*, 2017). Pela mesma razão, é comum instalar para-raios apenas em uma ou duas fases da torre (ASSIS, BOAVENTURA, *et al.*, 2017; VISACRO, SILVEIRA, *et al.*, 2017).

A instalação dos dispositivos para-raios somente em uma ou duas fases evita a disrupção do isolamento na fase em que os para-raios são instalados. Além disso, também reduz a probabilidade de disrupção do isolamento nas fases sem para-raios instalados, uma vez que as sobretensões através delas também são reduzidas. Embora a não instalação de para-raios em todas as fases seja uma prática comum, a eficiência de tal técnica na redução da taxa de interrupção da linha de transmissão devido a descargas atmosféricas nem sempre é clara (ALIPIO, DUARTE, *et al.*, 2017).

Até onde vai o conhecimento do autor, não há nenhum estudo abrangente no qual o comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento e dos parâmetros elétricos do solo sejam incluídos simultaneamente com elementos não-lineares dependentes do tempo, neste caso os dispositivos para-raios, para avaliar a taxa de interrupção das linhas de transmissão. Isto é devido, provavelmente, à tarefa desafiadora de considerar simultaneamente o comportamento não-linear dependente do tempo dos para-raios e as características dependentes da frequência do aterramento (ALIPIO, PINTO, *et al.*, 2016). Sendo assim, esta é mais uma contribuição original desta tese.

O objetivo desta seção é avaliar a eficiência da técnica de proteção parcial de linhas de transmissão utilizando dispositivos para-raios, considerando diferentes valores de resistividade do solo e possíveis configurações de proteção das linhas, tomando como referência a linha de transmissão utilizada nas simulações anteriores desta tese, ilustrada na seção 3.1.

Partindo desta introdução, foram conduzidas simulações para avaliação do comportamento de linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas protegidas parcialmente por para-raios, isto é, quando a instalação dos dispositivos para-raios é feita em apenas uma ou duas fases das torres. Em um primeiro momento, foram levantadas as sobretensões nos isoladores de torres de transmissão, a partir das quais são avaliados os potenciais de ruptura do isolamento da linha e o número de desligamentos estimado para cada condição de resistividade do solo e configuração de proteção das linhas.

Essas avaliações foram conduzidas utilizando a modelagem original desenvolvida nesta tese para o sistema de aterramento das linhas de transmissão, que considera o efeito dependente da frequência deste sistema, e considerando os parâmetros elétricos do solo ora constantes e ora dependentes da frequência, com o objetivo de realizar uma análise de sensibilidade destes efeitos simultaneamente com a inclusão dos dispositivos para-raios para proteção parcial da linha de transmissão.

As sobretensões desenvolvidas são levantadas a partir de simulações no domínio do tempo, visto que fenômenos atmosféricos e dispositivos para-raios são mais bem representados neste domínio. É simulada no programa ATP a incidência de uma descarga atmosférica no topo de uma torre de transmissão com forma de onda representativa de primeira descarga de retorno, para diversas condições passíveis de ocorrência. São consideradas variações nas resistividades e comprimentos de cabo contrapeso típicos (vide Tabela 4.1), porém apenas para valores da resistividade do solo acima de $1.000 \Omega.m$, pois para valores inferiores não se justifica economicamente o uso dos dispositivos para-raios. Também são feitas variações na quantidade de fases protegidas por dispositivos para-raios.

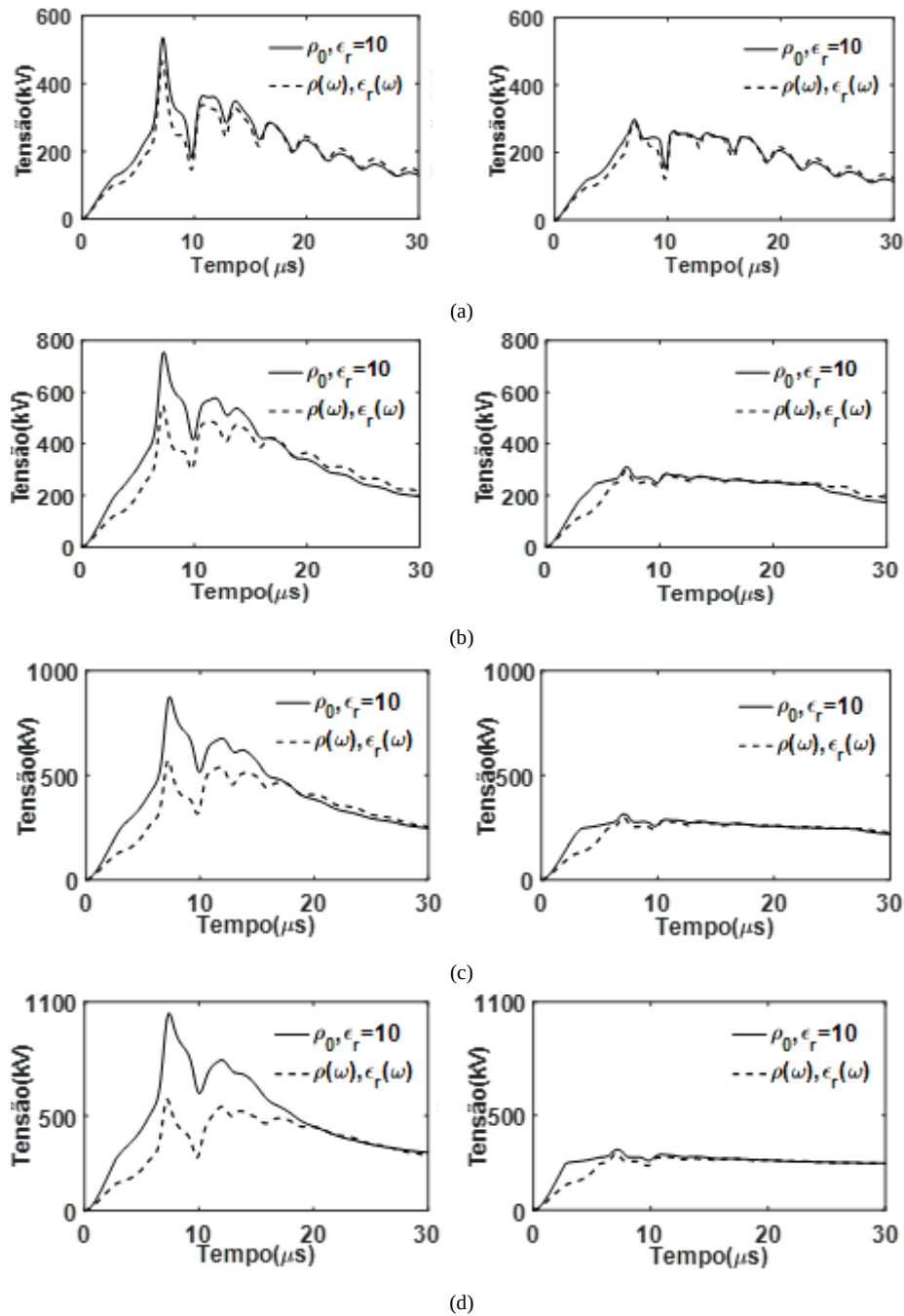
Vale ressaltar que nas simulações realizadas, os dispositivos para-raios são instalados apenas na torre atingida pela descarga, e mantêm-se as mesmas condições do sistema elétrico apresentado anteriormente.

4.4.1 Sobretensões Resultantes nas Cadeias de Isoladores

4.4.1.1 Para-raios instalado na fase A

São apresentadas na Figura 4.6, as ondas de tensão na fase B (fase desprotegida com maiores valores de tensão) e na fase A (fase protegida por para-raios) da linha de transmissão simulada.

Figura 4.6— Sobretensões nas fases B (esq.) e A (dir.) com para-raios instalados na fase A, para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (b) $\rho_0 = 3.000\Omega.m$ e $L = 60m$; (c) $\rho_0 = 5.000\Omega.m$ e $L = 80m$, (d) $\rho_0 = 10.000\Omega.m$ e $L = 130m$.



Fonte: Acervo do Autor.

Nota-se que, em fases protegidas, prevalece o efeito limitador de tensão do dispositivo para-raios. Não há diferenças significativas entre as máximas tensões alcançadas nos terminais do isolador a partir da inclusão ou não do efeito dependente da frequência dos parâmetros elétricos do solo, elucidando o papel impactante do para-raios na proteção da linha.

Para essa condição de proteção, as sobretensões nas fases desprotegidas (B e C) apresentam formas de onda semelhantes, diferenciando-se pelos valores de pico alcançados. Conforme o esperado, mantém-se a influência da inclusão do efeito dependente da frequência dos parâmetros elétricos do solo sobre as sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores, embora levemente diminuída, conforme pode-se constatar na Tabela 4.8.

Observa-se, ainda, outro papel importante do dispositivo para-raios na proteção de linhas de transmissão, pois após a instalação deste, reduziram-se significativamente as sobretensões nas fases não protegidas da linha. Essa condição foi observada para todas as simulações.

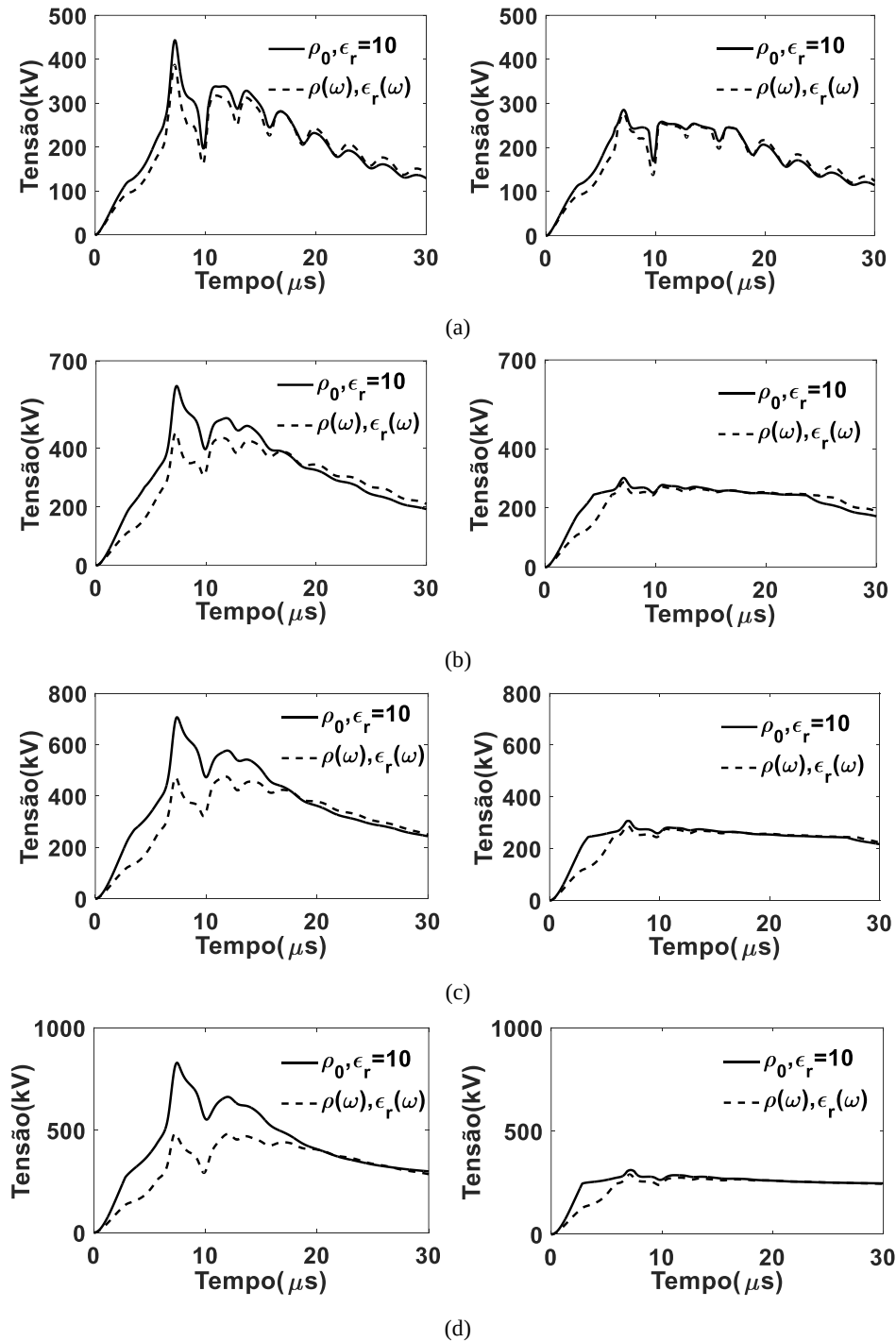
Tabela 4.9 - Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores da fase A (esq.) e B (dir.) simulado conforme condições base, incidência de primeiras descargas de retorno, sem proteção por dispositivo para-raios (esq.) e com proteção parcial da fase A (dir.).

Arranjos do aterramento	Sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores (kV)					
	SEM PARA-RAIOS			PARA-RAIOS FASE A		
	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_o= 1.000\Omega.m; L = 40m$	646	559	-13,5%	535	465	-13,1%
$\rho_o= 3.000\Omega.m; L = 60m$	933	663	-28,9%	754	548	-27,3%
$\rho_o= 5.000\Omega.m; L = 80m$	1098	696	-36,6%	875	572	-34,6%
$\rho_o= 10.000\Omega.m; L = 130m$	1338	718	-46,3%	1041	587	-43,6%

4.4.1.2 Para-raios instalados nas fase A e B

Para essa condição de proteção, as sobretensões nas fases protegidas por para-raios (fases A e B) são semelhantes. Nesse sentido, são apresentados gráficos das tensões da fase C (fase desprotegida por para-raios) e da fase B da linha de transmissão simulada. As ondas de tensão são levantadas para diferentes condições de aterramento (1.000 a 10.000 Ω .), e apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Sobretensões nas fases C (esq.) e B (dir.) com para-raios instalados na fase A e B, para os parâmetros do aterramento: (a) $\rho_0 = 1.000\Omega.m$ e $L = 40m$; (b) $\rho_0 = 3.000\Omega.m$ e $L = 60m$; (c) $\rho_0 = 5.000\Omega.m$ e $L = 80m$, (d) $\rho_0 = 10.000\Omega.m$ e $L = 130m$.



Fonte: Acervo do Autor.

As curvas acima confirmam as observações relatadas no item 4.1.1.1. Vale ressaltar o crescimento do impacto do efeito causado pela inclusão de mais um dispositivo para-raios, tanto na diminuição do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo na redução dos valores de sobretensão, quanto no aumento do efeito que induz a

redução dos valores de pico das sobretensões das fases não protegidas, como pode ser constatado da Tabela 4.9, apresentada a seguir.

Tabela 4.10 - Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores da fase A (esq.), B(centro) e C (dir.) simulado conforme condições base, incidência de primeiras descargas de retorno, sem proteção por para-raios e com proteção parcial por dispositivo para-raios na fase A (centro) e nas fases A e B (dir.).

Arranjos do aterramento	Sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores (kV)								
	SEM PARA-RAIOS			PARA-RAIOS FASE A			PARA-RAIOS FASE A E B		
	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_o= 1.000\Omega.m; L = 40m$	646	559	-13,5%	535	465	-13,1%	443	387	-12,6%
$\rho_o= 3.000\Omega.m; L = 60m$	933	663	-28,9%	754	548	-27,3%	614	452	-26,4%
$\rho_o= 5.000\Omega.m; L = 80m$	1098	696	-36,6%	875	572	-34,6%	706	475	-32,7%
$\rho_o= 10.000\Omega.m; L = 130m$	1338	718	-46,3%	1041	587	-43,6%	828	483	-41,7%

4.4.2 Desempenho da Linha de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas

Nesta seção, apresentam-se os resultados do impacto da proteção parcial das linhas de transmissão por dispositivos para-raios no desempenho esperado da linha de transmissão analisada, mantendo-se todas as outras condições de simulação anteriores, para efeitos de comparação. Sendo assim, serão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, os valores das correntes críticas, probabilidade de ocorrência de interrupção da cadeia de isoladores e o número estimado de desligamentos por *backflashover* por 100 km por ano das linhas considerando a proteção parcial destas.

Tabela 4.11 - Amplitudes das Correntes de Descarga Críticas para primeiras descargas, conforme método DE e considerando a linha de transmissão ora desprotegida e ora protegida parcialmente.

Arranjos do aterramento	Amplitude Crítica da Corrente de Descarga (kA)								
	SEM PARA-RAIOS			PARA-RAIOS FASE A			PARA-RAIOS FASE A E B		
	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_o,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_o= 1.000\Omega.m; L = 40m$	77	88	14,3%	91	104	14,3%	111	125	12,6%
$\rho_o= 3.000\Omega.m; L = 60m$	46	59	28,3%	53	68	28,3%	64	81	26,6%
$\rho_o= 5.000\Omega.m; L = 80m$	38	53	39,5%	44	61	38,6%	54	73	35,2%
$\rho_o= 10.000\Omega.m; L = 130m$	31	51	64,5%	39	59	51,3%	45	70	55,6%

Tabela 4.12 - Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores, para primeiras descargas, segundo o método DE e considerando a linha de transmissão ora desprotegida e ora protegida parcialmente.

Arranjos do aterramento	Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores (%)								
	SEM PARA-RAIOS			PARA-RAIOS FASE A			PARA-RAIOS FASE A E B		
	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
$\rho_0=1.000\Omega.m$; L = 40m	11,22%	6,98%	-37,8%	6,18%	3,76%	-39,2%	2,94%	1,87%	-36,4%
$\rho_0=3.000\Omega.m$; L = 60m	48,51%	26,30%	-45,8%	35,15%	17,02%	-51,6%	20,62%	9,39%	-54,5%
$\rho_0=5.000\Omega.m$; L = 80m	66,49%	35,15%	-47,1%	52,84%	23,86%	-54,8%	33,51%	13,46%	-59,8%
$\rho_0=10.000\Omega.m$; L = 130m	81,45%	38,65%	-52,5%	64,20%	26,30%	-59,0%	50,65%	15,48%	-69,4%

Tabela 4.13 - Desempenho frente a descargas atmosféricas esperado considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência, diversas distribuições de resistividade de solo ao longo da linha e considerando a linha de transmissão ora desprotegida e ora protegida parcialmente.

Hipóteses de distribuição de ρ ao longo da Linha de Transmissão (%)				Primeiras Descargas								
				Desligamentos/100km/ano								
				SEM PARA-RAIOS			PARA-RAIOS FASE A			PARA-RAIOS FASE A E B		
1.000 ($\Omega.m$)	3.000 ($\Omega.m$)	5.000 ($\Omega.m$)	10.000 ($\Omega.m$)	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
100%	0%	0%	0%	7,7	4,8	-37,7%	4,3	2,6	-39,5%	2	1,3	-35,0%
0%	100%	0%	0%	33,5	18,1	-46,0%	24,3	11,7	-51,9%	14,2	6,5	-54,2%
0%	0%	100%	0%	45,9	24,3	-47,1%	36,5	16,5	-54,8%	23,1	9,3	-59,7%
0%	0%	0%	100%	56,2	26,7	-52,5%	44,3	18,1	-59,1%	34,9	10	-71,3%
50%	30%	20%	0%	23,1	12,7	-45,0%	16,7	8,1	-51,5%	9,9	4,5	-54,5%
30%	10%	10%	10%	26,5	13,9	-47,5%	19,7	9,0	-54,3%	13,0	5,0	-61,5%
0%	40%	30%	30%	44,0	22,5	-48,9%	34,0	15,1	-55,6%	23,1	8,4	-63,6%

Atestou-se o efeito positivo da proteção parcial de linhas de transmissão a partir da instalação de dispositivos para-raios em uma ou duas de suas fases. Nota-se que, em comparação à condição de linhas não protegidas, as amplitudes críticas de descarga de todas as condições de aterramento foram significativamente maiores quando da instalação de dispositivos para-raios na fase A, e ainda maiores quando da proteção das fases A e B da torre. Por sua vez, isto causou redução relevante na probabilidade de disrupção das cadeias de isoladores e consequentemente no desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Para o caso mais crítico ($\rho_0 = 10.000 \Omega.m$ e parâmetros do solo constantes) essa redução variou respectivamente de 56,2 desligamentos por 100 km por ano esperados, para 44,3 com a instalação de um para-raios e para 34,9 com a proteção de duas fases, perfazendo uma redução de 37,9%. Quando considerados os parâmetros do solo variáveis com a frequência, esta redução chegou a 69,3%, partindo de 26,7 desligamentos estimados, para 18,1 com a proteção da fase A e 10 com a proteção das fases A e B. Para

todos os outros casos estudados, também houve melhoria significativa do desempenho da linha.

É importante mencionar que, considerando o número de desligamentos mínimo “aceitável” definido pelos órgãos reguladores para linhas de classe de tensão de 138 kV, $N_{BF} \leq 10$ (DIAS, 2006), e os resultados da Tabela 4.13, a proteção parcial por dispositivos para-raios foi capaz de manter o desempenho das linhas que atravessam regiões com resistividade do solo média a partir de 3.000 $\Omega.m$, e considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência, dentro dos índices de qualidade para todos os casos estudados.

Sendo assim, resta-se comprovado que a proteção parcial das linhas de transmissão por dispositivos para-raios trate-se de uma estratégia extremamente eficaz para melhoria do desempenho destas frente a descargas atmosféricas, e que a inclusão do efeito dependente da frequência dos parâmetros do solo em estudos deste tipo é imprescindível. Destaca-se, novamente, que considerando o conhecimento deste autor, este tipo de estudo trata-se de uma contribuição original sobre o tema da análise do desempenho de linhas de transmissão.

5 CONCLUSÕES

Esta tese concentra-se no desenvolvimento de um modelo tempo-frequência para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas utilizando plataformas do tipo EMTP.

O estudo teve como motivação principal a necessidade de contribuições adicionais ao tema, notadamente com relação à inclusão conjunta de elementos não-lineares dependentes do tempo e de efeitos dependentes da frequência do aterramento das linhas de transmissão e nos parâmetros elétricos do solo, e à análise do impacto do destas inclusões no comportamento transitório dos sistemas de potência simulados.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Desenvolvimento de um novo modelo para o sistema de aterramento de linhas de transmissão, aplicável na faixa de frequências de interesse na avaliação de transitórios associados às descargas atmosféricas, baseado na teoria de linhas de transmissão, com acurácia semelhante a outro modelo reconhecidamente preciso, baseado na teoria de campos eletromagnéticos e com esforço computacional muito reduzido em comparação ao último.
- Análise sistemática do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória e na performance de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, empregando-se formulações validadas experimentalmente e sinais de corrente com forma de onda típica de primeiras descargas de retorno.
- Realizar uma avaliação inovadora em relação à performance de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, notadamente em relação ao número de desligamentos por 100 km, por ano, incluindo simultaneamente elementos não-lineares dependentes do tempo, através da proteção parcial da linha por dispositivos para-raios, e os efeitos dependentes da frequência no aterramento da linha de transmissão e nos parâmetros elétricos do solo.

Parte dos resultados obtidos nesta tese foram publicados, aceitos, ou se encontram em processo de submissão/revisão, em periódicos e/ou em anais de congressos, o que demonstra a originalidade e a relevância das contribuições apresentadas (vide item 1.4).

5.1 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

As propostas de continuidade deste trabalho consistem em aplicações dos resultados alcançados nesta tese a estudos gerais relativos aos transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão provenientes da incidência de descargas atmosféricas, quais sejam:

- Extensão das análises realizadas nesta tese considerando uma abordagem probabilística pela aplicação do método de Monte Carlo.
- Extensão das análises realizadas nesta tese para determinar alocações otimizadas de para-raios em linhas de transmissão, levando-se em conta o atendimento aos parâmetros mínimos de desligamentos e a viabilidade econômica da proteção.
- Realização de novas análises baseadas nas consideradas nesta tese para incidências de descargas atmosféricas no meio do vão da linha de transmissão.
- Extensão das análises realizadas para linhas de outros níveis de tensão, abarcando diferentes topologias de torre.

Finalmente, espera-se que as realizações e os resultados obtidos neste trabalho, em função de seus aspectos originais forneçam uma contribuição relevante ao tema desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, e estabeleçam estratégias confiáveis para a redução de desligamentos e o aumento da qualidade da energia fornecida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 5422 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~joao/CE/Trabalho/Trabalho2013/NBR5422.pdf>>. Acesso em: 2016.

ABNT. **NBR 16050 - Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ABNT. **NBR 5419-2 Proteção Contra Descargas Atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de Risco**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

AHMED, M. R.; ISHII, M. **Effectiveness of interconnection of wind turbine grounding influenced by interconnection wire**. Proc. of 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012). Vienna: [s.n.]. 2012.

ALEMI, M. R.; SHESHYEKANI, K. Wide-Band Modeling of Grounding for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines. **IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility**, v. 57, n. 6, p. 1627-1636, Dec. 2015.

ALIPIO, R. et al. **EVALUATION OF LINE SURGE ARRESTERS PERFORMANCE CONSIDERING FREQUENCY-DEPENDENT CHARACTERISTICS OF TOWER-FOOTING GROUNDING**. International Conference on Grounding and Earthing & 7th International Conference on Lightning Physics and Effects. Porto de Galinhas: [s.n.]. 2016.

ALIPIO, R. et al. **Evaluation of line surge arresters performance considering frequency-dependent characteristics of tower-footing grounding**. Proc. GROUND'2016 & 7thLPE. Porto de Galinhas, Brazil: [s.n.]. 2016. p. 1-5.

ALIPIO, R. et al. **Grounding modeling using transmission line theory: Extension to arrangements composed of multiple electrodes**. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril: [s.n.]. 2016. p. 1-5.

ALIPIO, R. et al. **Lightning Performance of Transmission Lines Partially Protected by Surge Arresters**. Xiv Sipda. [S.l.]: [s.n.]. 2017.

ALIPIO, R. et al. Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical Brazilian conditions. **2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)**, Natal, 2017. 365-369.

ALIPIO, R. et al. **Lightning Performance of Transmission Lines Partially Protected by Surge Arresters Considering Typical Brazilian Conditions**. Proc. of 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). Natal, Brazil: [s.n.]. 2017.

ALIPIO, R. et al. **Lightning Strikes to High-Voltage Transmission Lines Including Frequency-Dependent Ground Parameters in the Transmission Line Model**. Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2019 (IPST 2019). Perpignan, France: [s.n.]. 2019.

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

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

ALÍPIO, R. S., “**MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA**”, Dissertação de Mestrado, PPGMMC – CEFET-MG, 2008.

ALÍPIO, R. S., “**DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO - EFEITO NO COMPORTAMENTO IMPULSIVO DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**”, Tese de Doutorado, PPGE – UFMG, 2013.

ALIPIO, R.; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility**, v. 55, n. 1, p. 132–139, 2013.

ALIPIO, R.; VISACRO, S. Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 56, n. 5, p. 1163–1171, Oct. 2014.

ALVAREZ, C. G. C., “**Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas**”, Dissertação de Mestrado, PPGE – CEFET MG. Março, 2011.

AMETANI, A.; KAWAMURA, T. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 20, n. 2, p. 867-875, 2005.

AMETANI, Y. et al. Frequency Dependent Impedance of Vertical Conductors and a Multi-Conductor Tower Model. **IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, v. 141, n. 4, p. 339–345, July 1994.

ARANEO, et al. **Hybrid and pi-circuit approaches for grounding system lightning response**. PowerTech 2015 IEEE Eindhoven. Eindhoven: [s.n.]. 2015. p. 1-6.

ARAÚJO, A. E.; NEVES, W. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

ASSIS, S. C. et al. Lightning performance of transmission line with and without surge arresters: comparison between a monte carlo method and field experience. **Electric Power System Research**, v. 149, p. 169–177, 2017.

BABAEI, ; BABAEI, M.; NIASATI, M. **Parametric Analysis of Overvoltages Caused by Backflashover In "Siah-bishe" 400kV GIS Substation**. Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). Istambul: Yildiz Teclmical University. 2013. p. 1-6.

BALANIS, A. C. **Advanced engineering electromagnetic**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRONINGER, H. Parameters of lightning. **Electra**, v. 80, p. 223-237, 1975.

BORGES, F. M. D. S. “**Metodologia para Determinação da Impedância Impulsiva para Arranjos Típicos de Aterramentos Elétricos**” Dissertação de Mestrado - PPGEL - CEFET MG, 2018.

CANADIAN/AMERICAN EMTP USER GROUP. **Alternative Transient Program (ATP) Rule Book**. [S.l.]: [s.n.], 1987-98.

CARSON, J. R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. **Bell Systems Technical Journal**, v. 5, p. 539–556, 1926.

CEMIG. **Para-raios de resistor não linear de óxido metálico para sistemas de potência. Especificação técnica 02.118**. [S.l.]: CEMIG - 266d., 2012.

CIGRE. **Lightning Parameters for Engineering Applications**. WG C4.407. [S.l.]. 2013.

CIGRÉ, W. G. 3.-0. **Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines**. Study Committee 33. Dallas, TX, USA. 1991.

DE CONTI, A. **Notas de Aula do Professor Alberto De Conti do curso "Análise de Redes Elétricas no Domínio do Tempo**. PPGEE - UFMG. Belo Horizonte. 2016.

DE CONTI, A. et al. Revision, Extension and Validation of Jordan’s Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors. **IEEE Trans. EMC**, v. 48, n. 3, p. 530-536, Aug. 2006.

DE CONTI, A.; EMIDIO, M. Extension Of A Modal-Domain Transmission Line Model To Include Frequency-Dependent Ground Parameters. **Electric Power Systems Research.**, Março 2016.

DE CONTI, A.; VISACRO, S. Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 49, n. 2, p. 448 - 451, May 2007.

DE CONTI, A.; VISACRO, S.; SILVA, E. G. **Calculation of Tower Surge Impedance with Jordan's Equations**. Proc. XIX-th International Conf. Electromag. Disturbances. Bialystok, Poland: [s.n.]. 2009. p. 35-40.

DIAS, N. R., “**NOVA METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS DE DESEMPENHO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**”, Tese de Doutorado, PPGEE – UFMG, 2006.

EMÍDIO, M. P. S. “**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.

EEUG. European EMTP-ATP Users Group. **Site do EEUG**, 2020. Disponível em: <<https://www.emtp.org/>>. Acesso em: 30 abril 2020.

EMTP ALLIANCE. EMTP Alliance. **Site da EMTP Alliance**, 2020. Disponível em: <<https://www.emtp-software.com/en>>. Acesso em: 30 abril 2020.

ENERGISA. **NTU 004 - CRITÉRIOS BÁSICOS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO**. [S.l.]: [s.n.], 2017.

FEKETE, et al. **Simulation of lightning transients on 110 kV overhead-cable transmission line using ATP-EMTP**. MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 856-861.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de alta tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília: Goya, 2013.

GERI, A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: The model and its validation. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 14, n. 3, p. 1008-1017, Apr. 1999.

GERTRUDES, J. B.; TAVARES, M.; PORTELA, C. **Transient Performance Analysis on Overhead Transmission Line Considering the Frequency Dependent Soil Representation**. Proc. International Conference on Power Systems Transients. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

GRANT, I. S; ANDERSON, J.G.; HILEMAN, A.R., A Simplified Method For Estimating Lightning Performance of Transmission Lines”, **IEEE Trans. Power App. Syst.**, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932, Jul. 1985.

GRCEV,. Time- and Frequency-Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Set 2009. 2186 - 2196.

- GRCEV, L. Impulse efficiency of ground electrodes. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 24, n. 1, p. 441-451, Jan. 2009.
- GRCEV, L. Lightning surge efficiency of grounding grids. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 26, n. 3, p. 1692-1699, Jul. 2011.
- GRCEV, L. D. et al. Evaluation of High-Frequency Circuit Models for Horizontal and Vertical Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 6, p. 3065-3074, May 2018.
- GRCEV, L.; ARNAUTOVSKI-TOSEVA, V. Grounding systems modeling for high frequencies and transients: some fundamental considerations. **Proceedings of the IEEE Bologna Powertech Conference**, Bolonha, Junho 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1304516/>>. Acesso em: 2016.
- GRCEV, L.; GRCEVA, S. On HF Circuit Models of Horizontal Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 873 - 875, June 2009.
- GRCEV, L.; GRCEVA, S. On HF circuit models of horizontal grounding electrodes. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 51, n. 3, p. 873-875, Aug. 2009.
- GRCEV, L.; HEIMBACH, M. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 12, n. 1, p. 172–178, Jan. 1997.
- GRCEV, L.; POPOV, M. On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod. **IEEE Transactions on power delivery**, 2, abril 2005. 1598-1603. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1413431/>>. Acesso em: 2016.
- GUSTAVSEN, B. Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices. **IEEE Trans Power Delivery**, v. 17, n. 4, p. 1093–1098, Oct. 2002.
- GUSTAVSEN, B. Fast Passivity Enforcement for Pole-Residue Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 2278 - 2285, March 2008.
- GUSTAVSEN, B. **Matrix Fitting Toolbox**, 2009. Disponível em: <<https://www.sintef.no/projectweb/vectfit>>. Acesso em: Março 2020.
- GUSTAVSEN, B. Modal Domain-Based Modeling of Parallel Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 4, Oct. 2012.
- GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Rational Approximation of Frequency domain Responses by Vector Fitting. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 14, n. 3, p. 1052 - 1061, July 1999.

- GUTIERREZ, J. A. et al. Nonuniform Transmission Tower Model for Lightning Transient Studies. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 490–496, April 2004.
- HARA, T.; YAMAMOTO, O. Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis. **IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, v. 143, n. 3, p. 283–289, May 1996.
- HASBROUCK, R. T. **Lightning**: Understanding it and Protecting Systems from its Effects. [S.l.]: Lawrence Livermore National Laboratories, 1989.
- HATZIARGYRIOU, N. D.; LORENTZOU, M. **Grounding Systems Design Using EMTP**. 23rd European EMTP Users Group Meeting. Barcelona: [s.n.]. 1997.
- HAYASHI, T.; MIZUNO, Y.; NAITO, K. Study on transmission-line arresters for tower with high footing resistance. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 2456–2460, Oct. 2008.
- HE, J. et al. Effective length of counterpoise wire under lightning current. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 20, n. 2, p. 1585–1591, Apr 2005.
- HE, J. et al. **Design and application of line surge arresters to improve lightning protection characteristics of transmission lines**. Proc. of 2008 IEEE PES T&D Conference and Exposition. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1–8.
- HEIDLER, F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP - Berechnung. **Proceedings of 18th ICLP**, Munich, Sept. 1985. 63–66.
- HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. 1st Edition. ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- HINRICHSSEN, V. **Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems**. [S.l.]: Siemens, v. 3, 2011.
- IEEE. **Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines**. IEEE Standard 1243-1997. [S.l.]. 1997.
- IEEE. **IEEE guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems**. New York: IEEE, 2009.
- IEEE WORKING GROUP 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, p. 302–309, 1992.
- JACKSON, J. D. **Classical electrodynamics**. New York: JohnWiley & Sons, 1998.
- KINDERMAN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Editora Sagra;DCLuzzatto, 1995.

- KOEHLER, F.; SWINGLER, J. Practical model for tower earthing systems in lightning simulations. **Electric Power Systems Research**, v. 158, p. 306-314, May 2018.
- KUSUMA, A. A. et al. **Studying of lightning surge transient effect on 500 kV quadruple circuit transmission line**. Engineering Seminar (InAES) International Annual. Yogyakarta: [s.n.]. 2016. p. 276-279.
- LIMA, A. C. S. **Notas de aula do Professor Antônio Carlos Siqueira de Lima do curso Transitórios Eletromagnéticos**. Escola Politécnica - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 40. 2006.
- LIU, Y.; ZITNIK, M.; THOTTAPPILLIL, R. An improved transmission-line model of grounding system. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 43, n. 3, p. 348-355, Aug. 2001.
- LORENTZOU, M. I.; HATZIARGYRIOU, N. D. **Modelling of long grounding conductors using EMTP**. Proc. of International Conference on Power Systems Transients. Budapest, HU: [s.n.]. 1999.
- LORENTZOU, M. I.; HATZIARGYRIOU, N. D.; PAPADIAS, B. C. Time domain analysis of grounding electrodes impulse response. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 18, n. 2, p. 517-524, Apr. 2003.
- MACEDO, A. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.
- MANITOBA HYDRO INTERNATIONAL LTD. Sobre a Empresa: Manitoba Hydro International Ltd. **Site do PSCAD**, 2020. Disponível em: <<https://www.pscad.com/>>. Acesso em: 30 abril 2020.
- MARIUT, L.; HELEREA, . **Electromagnetic analysis - Application to lightning surge phenomena on power lines**. Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE) 2014 International Symposium. Bucureste: [s.n.]. 2014. p. 1-6.
- MARTI, J. R. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Eletromagnetic Transient Simulations. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, v. vol. PAS-101, n. 1, p. 147–157, Jan. 1982.
- MARTINEZ, J. A.; CASTRO-ARANDA, F. Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP. **IEEE Trans. Power Del**, v. 20, n. 3, p. 2200-2210, 2005.
- MARTINEZ, J. A.; CASTRO-ARANDA, F. **Lightning flashover rate of an overhead transmission line protected by surge arresters**. Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 1-6.

- MASLOWSKI, et al. **High-frequency grounding impedance measurements at test site in Huta Poreby Poland**. Lightning Protection (ICLP) 2016 33rd International Conference. Estoril: [s.n.]. 2016. p. 1-4.
- MATHWORKS. Sobre o produto: MATLAB. **Site do MATLAB**, 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 30 abril 2020.
- MAXWELL, J. C. **A treatise on electricity and magnetism vol. I e II**. [S.l.]: Macmillan and Company, 1873.
- MAZZETTI, C.; VECA, G. M. Impulse behavior of grounded electrodes. **IEEE Trans. Power App. Syst.**, v. PAS-102, n. 9, p. 3148–3156, Sep. 1983.
- MELIOPOULOS, A. P.; MOHARAM, M. G. Transient Analysis of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, n. 2, p. 389 - 399, Feb. 1983.
- MIRANDA, A. S., “**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**”, Dissertação de Mestrado, PPGEL – CEFET-MG, 2019.
- MOHAJERYAMI, S.; DOOSTAN, M. **Including surge arresters in the lightning performance analysis of 132kV transmission line**. Proc. of 2016 IEEE PES T&D Conference and Exposition. Dallas, TX: [s.n.]. 2016.
- MOKHTARI, M.; ABDUL-MALEK, Z.; SALAM, Z. An Improved Circuit-Based Model of a Grounding Electrode by Considering the Current Rate of Rise and Soil Ionization Factors. **IEEE Transactions on Power Delivery** , v. 30, n. 1, p. 211 - 219, Feb. 2015.
- MUNUKUTLA, K. et al. A Practical Evaluation of Surge Arrester Placement for Transmission Line Lightning Protection. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 25, n. 3, p. 1742-1748, Jul. 2010.
- NOR HASSAN, N. H. et al. **Analysis of arrester energy for 132kV overhead transmission line due to back flashover and shielding failure**. Power and Energy (PECon) 2012 IEEE International Conference. Kota Kinabalu Sabah: [s.n.]. 2012. p. 683-688.
- NUCCI, C. A. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines - Part III: Sensitivity Analysis. **CIGRÉ WG 33.01**, Bolonha, Sept 2000.
- OLIVEIRA, A. J. et al. **Adjustment of Current Waveform Parameters for First Lightning Strokes**. International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). [S.l.]: [s.n.]. 2017.

OLSEN, R.; WILLIS, M. C. A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 11, n. 3, p. 1071–1081, Jul. 1996.

ONS. **Relação dos Sistemas e Modelos em Procedimentos de Rede**. Brasil: ANEEL, v. Submódulo 18.2, 2009.

ONS. **Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS**. 2016.12. ed. [S.l.]: [s.n.], 2016.

OTANI, K. et al. FDTD surge analysis of grounding electrodes considering soil ionization. **Electric Power Systems Research**, v. 113, p. 171-179, Aug. 2014.

PAPALEXOPOULOS, A. D.; MELIOPOULOS, A. P. Frequency dependent characteristics of grounding systems. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 2, n. 4, p. 1073–1081, Oct. 1987.

PAUL, C. R. **Analysis of Multiconductor Transmission Lines**. 2nd Ed. ed. New York: Willey, 2008.

PEDROSA, G. A. "**Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e Permissividade de Solos Típicos com a Frequência**". Dissertação de Mestrado, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL), UFSJ/CEFET-MG, 2010.

PINHEIRO, F. H. C. "**ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA-TENSÃO NA PRESENÇA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMA, 2008.

PORTELA, C. **Frequency and transient behavior of grounding systems I – Physical and methodological**. Proc. of IEEE Int. Sym. Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: [s.n.]. 1997. p. 379–384.

PORTELA, C. M. **Regimes Transitórios**. [S.l.]: COPPE/UFRJ, v. 1 - 4, 1983.

PORTELA, C. M. **Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior**. IEEE Int. Sym. Eetromagnetic Compatibility. Seattle: [s.n.]. 1999. p. 1004-1009.

R. ALIPIO, M. H. R. D. A. C. S. L. **Influence of Grounding Representation on the Lightning Performance of Line Surge Arresters - Part I: Impact on the Developed Overvoltages**. Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). Niteroi: [s.n.]. 2018.

RAKOV, V. Transient Response of a Tall Object to Lightning. **IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility**, v. 43, n. 4, p. 654– 661, Nov. 2001.

RAMAMOORTY, M. et al. Transient performance of grounding grids. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 4, n. 4, p. 2053–2059, Oct. 1989.

REN, X. et al. **Research on transmission line system simulation models with line arresters and its application**. Electrical Insulation 2006. [S.l.]: 2006 IEEE International Symposium. 2006. p. 322-325.

SADOVIC, S. et al. Use of line surge arresters for the improvement of the lightning performance of 63 kV and 90 kV shielded and unshielded transmission lines. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 12, n. 3, p. 1232–1240, Jul. 1997.

SALARI, J. C.; PORTELA, C. A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 527-536, Jan. 2007.

SCHROEDER, M. A. O. “**Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2001.

SCOTT, J. H. **Electrical and magnetic properties of rock and soil**. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 1983.

SILVA, B. P. “**Modelagem e Solução de Aterramentos Sujeitos a Surtos de Corrente: Respostas nos Domínios da Frequência e do Tempo**”, Dissertação de mestrado, PPGEE – UFG, 2016.

SILVEIRA, ; DE CONTI, A.; VISACRO, S. **Evaluation of Lightning-Induced Voltages over Lossy Ground with Frequency-dependent Soil Parameters**. Lightning Protection (ICLP) 2014 International Conference. Shanghai: National Natural Science Foundation of China. 2014. p. 950-954.

SILVEIRA, F. H. et al. Backflashovers of Transmission Lines Due to Subsequent Lightning Strokes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 54, n. 2, p. 316 - 322, Jan. 2012.

SILVEIRA, F. H. et al. Backflashovers of Transmission Lines Due to Subsequent Lightning Strokes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 54, n. 2, p. 316-322, April 2012.

SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, p. 1-6, July 2019.

SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility** , p. 1 - 6, July 2019.

SOARES, A.; SCHROEDER, M. A. O.; VISACRO, A. S. Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1447-1452, April 2005.

STRATTON, J. A. **Electromagnetic theory**. New York: McGraw-Hill, 1941.

SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. New York: Dover Publ., 1968.

TAFLOVE, ; HAGNESS, S. C. **Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method**. 3ª. ed. Norwood: Artech House, 2005.

TAKAMI, J.; OKABE, S.; ZAIMA, E. Study of lightning surge overvoltages at substations due to direct lightning strokes to phase conductors. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 25, n. 1, p. 425-433, Jan. 2010.

TARCHINI, J. A.; GIMENEZ, W. **Line surge arrester selection to improve lightning performance of transmission lines**. Proc. of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference. Bologna, IT: [s.n.]. 2003.

THEETHAYI, N. et al. Extenal impedance and admittance of buried horizontal wires for transient studies using transmissional line analysis, v. 14, n. 3, p. 751-761, Jun. 2007.

VERMA, R.; MUKHEDKAR, D. Impulse impedance of buried ground wire. **IEEE Trans. Power App. Syst**, v. PAS-99, n. 5, p. 2003 - 2007, Sept. 1980.

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

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

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

- VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 381–386, Jan. 2007.
- VISACRO, S. et al. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. **JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH**, v. 109, Jan. 2004.
- VISACRO, S. et al. Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D16104, 2010.
- VISACRO, S. et al. **Effectiveness of surge arresters for improving the lightning performance of transmission lines**. Proc. 10th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2017). Krabi-Thailand: [s.n.]. 2017. p. 403–406.
- VISACRO, S.; ALIPIO, R. Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 927-935, Jan. 2012.
- VISACRO, S.; J. SOARES. HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1206 - 1208, 2005.
- VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines. **IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY**, v. 57, n. 3, Jun. 2015.
- WAGNER, K. W. **Erklärung der dielektrischen Nachwirkungs-worgänge auf Grund Maxwellscher**. [S.l.]: Electrotechnik, 1914.
- XIONG, R. et al. FDTD Calculation Model for the Transient Analyses of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 56, n. 5, p. 1155-1162, Apr. 2014.
- XIONG, W.; DAWALIBI, F. Transient performance of substations grounding systems subjected to lightning. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 9, n. 33, p. 1412–1420, Jul. 1994.
- YAMAMOTO, K. et al. Analytical surveys of transient and frequency-dependent grounding characteristics of a wind turbine generator system on the basis of field tests. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 3035-3043, Oct. 2010.