“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

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Representação esquemática de uma descarga atmosférica 18
Figura 2.2 - Gráfico Corrente x Tempo de Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo. 19
Figura 2.3 - Gráfico Corrente x Tempo de Descarga atmosférica real medida na estação do Morro do Cachimbo. 21
Figura 2.4 - Ruptura de isolamento por flashover 24
Figura 2.5 - Ruptura de isolamento por backflashover 25
Figura 2.6 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e da onda resultante no topo da torre (Hipótese: 0< Zater < Ztorre) 26
Figura 2.7 - Característica da suportabilidade elétrica para isolações auto regenerativas. 27
Figura 2.8 - Exemplo de curva tensão-tempo. 29
Figura 2.9 - Componentes de corrente no solo e circuito equivalente do aterramento. . 32
Figura 2.10 Atenuação e distorção de uma onda de corrente ao longo de um eletrodo. 33
Figura 2.11 - Característica tensão-corrente de um dispositivo para-raios. 35
Figura 2.12 - Característica tensão-corrente de resistores não lineares de ZnO..... 36
Figura 3.1- Geometria da torre de transmissão e disposição dos condutores. 41
Figura 3.2 - Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica e da existência de torres adjascentes. 42
Figura 3.3- Representação da onda de corrente de primeiras descargas negativas pela soma de sete funções de Heidler obtidas no software ATP. 44
Figura 3.4 - Desenho ilustrativo do modelagem da torre, com as impedâncias equivalentes de cada trecho. 47
Figura 3.5 - Representação do modelo proposto pelo IEEE. 47
Figura 3.6 - Relação V×I para os resistores não lineares do modelo proposto pelo IEEE. 49
Figura 3.7- Configuração típica do aterramento de torres de transmissão autoportantes. 52
Figura 3.8- Comportamento da impedância harmônica do sistema de aterramento 59
Figura 4.1- Circuito de simulação da incidência de descarga atmosférica em linha de transmissão. 64
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)

ρ0 = 500Ω.m e L = 30m; (c) ρ0 = 1.000Ω.m e L = 40m; (d) ρ0 = 3000Ω.m e L = 60m; (e) ρ0 = 5000Ω.m e L = 80m, (f) ρ0 = 10000Ω.m e L = 130m. 66
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) ρ0 = 300Ω.m e L = 20m; (b) ρ0 = 500Ω.m e L = 30m; (c) ρ0 = 1.000Ω.m e L = 40m; (d) ρ0 = 3000Ω.m e L = 60m; (e) ρ0 = 5000Ω.m e L = 80m, (f) ρ0 = 10000Ω.m e L = 130m. 69
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) ρ0 = 300Ω.m e L = 20m; (b) ρ0 = 500Ω.m e L = 30m; (c) ρ0 = 100Ω.m e L = 40m; (d) ρ0 = 3000Ω.m e L = 60m; (e) ρ0 = 5000Ω.m e L = 80m, (f) ρ0 = 10000Ω.m e L = 130m. 72
Figura 4.5– Probabilidade de Disrupção da Cadeia de Isoladores em função do arranjo do aterramento, para primeiras descargas de retorno. 74
Figura 4.6– Sobretensões nas fases B (esq.) e A (dir.) com para-raios instalados na fase A, para os parâmetros do aterramento: (a) ρ0 = 1.000Ω.m e L = 40m; (b) ρ0 = 3.000Ω.m e L = 60m; (c) ρ0 = 5.000Ω.m e L = 80m, (d) ρ0 = 10.000Ω.m e L = 130m..... 80
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) ρ0 = 1.000Ω.m e L = 40m; (b) ρ0 = 3.000Ω.m e L = 60m; (c) ρ0 = 5.000Ω.m e L = 80m, (d) ρ0 = 10.000Ω.m e L = 130m. 82

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Densidades de descargas para o solo típicas de algumas regiões do mundo. 21
Tabela 2.2- Parâmetros de primeiras descargas..... 23
Tabela 3.1– Parâmetros utilizados para sintetizar as primeiras descargas de retorno medidas na estação de Morro do Cachimbo. 44
Tabela 4.1- Comprimentos típicos de cabos contrapeso em função da resistividade do solo. 63
Tabela 4.2 – Parâmetros das descargas utilizadas nas simulações 63
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. 67
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. 70
Tabela 4.5 – Amplitudes das Correntes de Descarga Críticas para primeiras descargas de retorno, conforme aplicação do método DE. 73
Tabela 4.6 - Probabilidade de disrupção da cadeia de isoladores para primeiras descargas de retorno, conforme aplicação do método DE. 74
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..... 75
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). 76
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.).81
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.). 83

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. 83
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..... 84
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. 84

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	Electromagnectic 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.....**Erro! Indicador não definido.**
Agradecimentos.....**Erro! Indicador não definido.**
Resumo.....**Erro! Indicador não definido.**
Abstract.....**Erro! Indicador não definido.**
Lista de Ilustrações..... 2
Lista de Tabelas..... 4
Lista de Acrônimos..... 6
Sumário..... 7
1 INTRODUÇÃO..... 9
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E MOTIVAÇÕES..... 9
1.2 OBJETIVO GERAL..... 11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 11
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE..... 12
1.5 LISTA DE PUBLICAÇÕES..... 13
1.5.1 Produções Científicas Associadas a Este Trabalho..... 13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 15
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE..... 15
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 18
2.2.1 Descargas atmosféricas..... 18
2.2.2 Interação entre as linhas de transmissão e as descargas atmosféricas.. 23
2.2.3 Suportabilidade elétrica de isoladores submetidos a impulsos atmosféricos 27
2.2.4 Sistemas de aterramento em torres de linhas de transmissão..... 30
2.2.5 Comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas..... 31
2.2.6 Para-raios..... 35
3 METODOLOGIA E MODELAGENS ADOTADAS NO ESTUDO..... 39
3.1 CONDIÇÕES BASE PARA SIMULAÇÃO..... 41
3.2 MODELO DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA..... 42

3.3 MODELO DA TORRE DE TRANSMISSÃO 45
3.4 MODELO DO PARA-RAIOS 47
3.5 MODELO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA 49
3.6 MODELO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 50
3.7 MODELO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO 52
3.8 MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO DISRUPTIVO NA CADEIA DE ISOLADORES 59
3.9 MÉTODO PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE DESLIGAMENTOS POR BACKFLASHOVER EM LINHAS DE TRANSMISSÃO 60

4 RESULTADOS 62
4.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO ATERRAMENTO PROPOSTA 65
4.2 SOBRETENSÕES RESULTANTES NAS CADEIAS DE ISOLADORES 67
4.3 DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 70
4.4 LINHAS DE TRANSMISSÃO PARCIALMENTE PROTEGIDAS POR DISPOSITIVOS PARA-RAIOS 77

4.4.1 Sobretensões Resultantes nas Cadeias de Isoladores 79
4.4.1.1 Para-raios instalado na fase A 79
4.4.1.2 Para-raios instalados nas fase A e B 81
4.4.2 Desempenho da Linha de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas 83

5 CONCLUSÕES 86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... **Erro! Indicador não definido.**

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.