UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO





PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

UM AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Aluna: Clarissa Gomes Cosentino Alvarez Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Co-orientadora: Prof^a. Dra. Úrsula do Carmo Resende

Belo Horizonte, março de 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA







PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL

UM AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

por

Clarissa Gomes Cosentino Alvarez

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos Linha de pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Co-orientadora: Prof^a. Dra. Úrsula do Carmo Resende

Belo Horizonte, março de 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



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



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL

Clarissa Gomes Cosentino Alvarez

Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão frente às Descargas Atmosféricas

Belo Horizonte, março de 2011.



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

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



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Clarissa Gomes Cosentino Alvarez

Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 14 de março de 2011 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

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

Prof^a. Dr^a. Úrsula do Carmo Resende – Co-orientadora Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Fernando Henrique Ailverta

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Luiz Antônio da Fonseca Manso Universidade Federal de São João del-Rei

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de expressar minha imensa gratidão ao orientador desse trabalho Professor Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, não apenas pelos ensinamentos técnicos e empenho dedicado à sua concretização, mas, também, pelo incentivo, confiança, compreensão, amizade e respeito demonstrados ao longo de sua execução.

Faço um agradecimento especial à minha família. Aos meus pais pelo apoio e ao meu irmão pelo companheirismo e, sendo um futuro colega, pela disposição de participar de algumas discussões técnicas.

Não poderia deixar de expressar sinceros agradecimentos ao Augusto, por todo incentivo e força. Agradeço pela sua ajuda, que contribuiu de forma decisiva para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à professora Úrsula do Carmo Resende pela presteza no auxílio às atividades desta dissertação.

Um sincero agradecimento é feito à minha amiga e colega Adriana Pedrosa, pela grande amizade, apoio durante os períodos da graduação e do mestrado e, em especial, na participação de discussões técnicas.

Agradeço à Marina Andrade, à Sheila Lima, à Karla Ramos, à Ana Paula Mota e ao Ponai Rocha, grandes amigos que propiciaram relevantes contribuições na conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do CEFET-MG, que contribuíram com sugestões, críticas e discussões. Os agradecimentos se estendem também aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG, em especial ao Rafael Alípio.

À equipe da Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), representada pelo engenheiro Sandro de Castro Assis agradece pela oportunidade de trabalho em conjunto.

Finalmente, agradeço ao apoio financeiro concedido pelo CEFET-MG, sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	III
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	VIII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Relevância do tema sob investigação	1
1.2 – Contextualização da dissertação	4
 1.3 – Objetivos Gerais e Específicos. 1.3.1 – Objetivos gerais	5
1.4 – Metodologia	7
1.5 – Organização do texto	
CAPÍTULO 2 – CÁLCULO DE DESEMPENHO DE LINHA TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	S DE 10
2.1 – Considerações Preliminares	10
 2.2 – Descargas Atmosféricas 2.2.1 – Aspectos Físicos 2.2.2 – Parâmetros de Incidência Geográfica 2.2.3 – Parâmetros da Onda de Corrente 	
 2.3 – Incidência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão 2.3.1 – Estimativa do número de descargas atmosféricas que atingem uma l transmissão 	inha de 23
 2.4 – Modelo Eletrogeométrico e Falha de Blindagem. 2.4.1 – Considerações Iniciais. 2.4.2 – Largura de falha de blindagem. 2.4.3 – Blindagem efetiva	27 27 32 34 35 41

	2.5 -	Backflashover	41
		2.5.1 – Considerações Iniciais	41
		2.5.2 – Onda de corrente representativa da descarga atmosférica	44
		2.5.3 – Número de descargas atmosféricas que atinge as torres e os cabos para-	4.4
		2.5.4 Modelegence eletromagnéticas des comportamentos impulsivos des terros	44
		2.5.4 – Modelagens electromagneticas dos comportamentos impuisivos das torres,	15
		2.5.5 Transitário eletromagnático o cohrotopeão na cadeia de isoladores	40
		2.5.5 - Transitorio eletromagnetico e sobretensao na cadela de isoladores nos tompos críticos	.49 52
		2.5.0 – Terisões uisiuplivas has cauelas de isoladores hos terripos criticos	55
		2.3.7 – Correntes cificas necessarias para provocar disrupção has cadelas de	53
		2.5.8 – Efeito da tensão em regime permanente	5/
		2.5.9 – Taxa de <i>backflashover</i>	56
	2.6 -	Taxa Total (Flashover + Backflashover)	57
	2.7 -	· Análise Crítica do <i>Flash</i>	57
		2.7.1 – Quanto aos parâmetros de descargas atmosféricas	58
		2.7.2 – Quanto ao canal de descarga atmosférica e sua interação com a linha de	
		transmissão	59
		2.7.3 – Quanto à representação do sistema de aterramento	61
		2.7.4 – Quanto aos cálculos das taxas de flashover e backflashover	61
	2.8 -	· Considerações Finais	64
	_		
CA	PÍTU	LO 3 – APRESENTAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA AMIGÁV	EL
ΡA	RA C) FLASH	65
	24	Canaidaraa ãoo Draliminaraa	~ ~
	3.1-	Considerações Preliminares	65
	3.1 -		. 65
	3.1 -	· Evolução do <i>Flash</i>	66
	3.2 -	Evolução do <i>Flash</i>	66 60
	3.1 - 3.2 - 3.3 -	• Evolução do <i>Flash</i> • Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i>	65 66 69
	3.1 - 3.2 - 3.3 -	• Evolução do <i>Flash</i> • Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i>	65 66 69 70
	3.1 - 3.2 - 3.3 -	 Considerações Preliminares Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET	65 66 69 70 71 73
	3.1 - 3.2 - 3.3 -	 Considerações Preliminares Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET	65 66 70 71 73 75
	3.1 - 3.2 - 3.3 -	 Considerações Preliminares. Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET 3.3.1 – MATLAB. 3.3.2 – Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 – Fluxograma 3.3.4 – Interface Gráfica - GUI. 	65 66 70 71 73 75
	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 -	 Considerações Preliminares Evolução do Flash	66 69 70 71 73 75 81
	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 -	 Considerações Preliminares Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET 3.3.1 - MATLAB 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI Considerações Finais 	65 66 70 71 73 75 81
	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 -	Considerações Preliminares Evolução do <i>Flash</i> Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i> 3.3.1 – <i>MATLAB</i> 3.3.2 – Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 – Fluxograma 3.3.4 – Interface Gráfica - <i>GUI</i> Considerações Finais	65 66 70 71 73 75 81
СА	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU	 Considerações Preliminares. Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET 3.3.1 - MATLAB. 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 - Fluxograma. 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI. Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS 	65 66 70 71 73 75 81 82
СА	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU	Evolução do <i>Flash</i> Evolução do <i>Flash</i> Sono de Uso: Interação Usuário x Sistema	65 66 70 71 73 75 81 82
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 -	Considerações Preliminares Evolução do <i>Flash</i> Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i>	65 66 70 71 73 75 81 82 82
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 -	Evolução do <i>Flash</i> Evolução do <i>Flash</i> Sistema de Transmissão Base	65 66 70 71 73 75 81 82 82 82
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 -	Evolução do <i>Flash</i> Evolução do <i>Flash</i> San - MATLAB San - MATLAB San - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. San - Fluxograma San - Fluxograma San - Interface Gráfica - <i>GUI</i> Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base. An - Resultation de Corain	65 66 70 71 73 75 81 82 82 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 -	Considerações Preliminares Evolução do <i>Flash</i> Serva do <i>Flash</i>	65 66 70 71 73 75 81 82 82 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 -	Considerações Preliminares Evolução do <i>Flash</i> Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i> 3.3.1 – <i>MATLAB</i> 3.3.2 – Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 – Fluxograma 3.3.4 – Interface Gráfica - <i>GUI</i> Considerações Finais LO 4 – RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base 4.2.1 – Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 – Parâmetros da Linha de Transmissão 4.2.3 – Considerações sobre o Desempenho de uma Linha do Transmissão	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 -	 Considerações Preliminares Evolução do <i>Flash</i> Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i> 3.3.1 - <i>MATLAB</i> 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - <i>GUI</i> Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 - Parâmetros da Linha de Transmissão 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão 	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 -	Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET 3.3.1 - MATLAB. 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI. Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Definição do Sistema de Transmissão Base. 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 - Parâmetros da Linha de Transmissão. 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 -	Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET 3.3.1 - MATLAB. 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI. Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Definição do Sistema de Transmissão Base. 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 - Parâmetros da Linha de Transmissão. 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão Validação da Ferramenta Computacional	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 83 83 83 83 86 86
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	Considerações Preliminares Evolução do Flash 3.3.1 - MATLAB. 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI. Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base. 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais. 4.2.2 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais. 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão Validação da Ferramenta Computacional	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	 Considerações Preliminares Evolução do <i>Flash</i> Ferramenta Computacional: <i>FLASHCEFET</i> 3.3.1 - <i>MATLAB</i> 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - <i>GUI</i> Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão Validação da Ferramenta Computacional Análises Paramétricas 4.4.1 - Introdução 	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	 Evolução do Flash Evolução do Flash Ferramenta Computacional: FLASHCEFET 3.3.1 – MATLAB 3.3.2 – Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 – Fluxograma 3.3.4 – Interface Gráfica - GUI Considerações Finais LO 4 – RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base 4.2.1 – Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 – Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.3 – Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão Validação da Ferramenta Computacional Análises Paramétricas 4.4.1 – Introdução 4.4.2 – Sensibilidade ao Índice T_d 	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 86 90 90
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	Evolução do Flash S.3.1 - MATLAB 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Definição do Sistema de Transmissão Base 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão 4.2.4 - Introdução 4.4.1 - Introdução 4.4.3 - Sensibilidade ao Índice T _d	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 86 90 90 91 93
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	Evolução do Flash S.3.1 - MATLAB 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Definição do Sistema de Transmissão Base 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.2 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão 4.2.4 - Introdução 4.4.1 - Introdução 4.4.3 - Sensibilidade ao Índice T _d 4.4.4 - Sensibilidade à Probabilidade Cumulativa I _P	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 86 90 91 93 95
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	Evolução do Flash S.3.1 - MATLAB. 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI. Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base. 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais. 4.2.2 - Parâmetros da Linha de Transmissão. 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão 4.2.4 - Sensibilidade ao Índice T _d 4.4.5 - Sensibilidade à Resistência de Aterramento. 4.4.5 - Sensibilidade à Atura da Torre	65 66 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83 83
CA	3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 - PÍTU 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.4 -	Evolução do Flash S.3.1 - MATLAB. 3.3.2 - Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema. 3.3.3 - Fluxograma 3.3.4 - Interface Gráfica - GUI. Considerações Finais LO 4 - RESULTADOS Considerações Iniciais Definição do Sistema de Transmissão Base. 4.2.1 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais. 4.2.2 - Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais. 4.2.3 - Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão 4.2.4 - Parâmetros das Inha de Transmissão 4.2.5 - Sensibilidade ao Índice T _d 4.4.7 - Sensibilidade à Resistência de Aterramento. 4.4.6 - Sensibilidade à Altura da Torre 4.4.6 - Sensibilidade ao Comprimento da Cadeia de Isoladores	66 69 70 71 73 75 81 82 83 83 83 83 86 90 91 93 95 97 99

4.4.7 – Sensibilidade ao Comprimento do Vão	. 101
4.5 – Análise Comparativa	. 103
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	111
5.1 – Considerações Preliminares	. 111
5.2 – Principais Resultados	. 112
5.3 – Publicações	. 114
5.4 – Propostas de Continuidade	. 114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

RESUMO

Tendo em vista o desenvolvimento da tecnologia e, conseguentemente, a dependência cada vez maior da sociedade pela energia elétrica, estudos para melhorar o desempenho do sistema elétrico vêm se tornando cada vez mais indispensáveis. Neste contexto, em países como o Brasil, onde as principais fontes de energia elétrica são de origem hidráulica, é necessária a construção de extensas linhas de transmissão que interligam tais fontes aos centros consumidores. Desta forma, o percurso das linhas em causa envolve regiões com características orográficas bastante diversificadas, sendo alvo de constantes interações com fenômenos eletromagnéticos indesejáveis. Um dos principais efeitos desses fenômenos corresponde aos transitórios estabelecidos nas linhas pelas descargas atmosféricas que podem gerar níveis de sobretensões nas cadeias de isoladores capazes de provocar flashover ou backflashover, ocasionando interrupções no fornecimento de energia elétrica. Diante do exposto, torna-se imprescindível calcular, estudar e analisar o desempenho de linhas de transmissão que sofrem as interferências de descargas atmosféricas. Para tal, é necessária a elaboração de ferramentas computacionais confiáveis. O pacote computacional mais amplamente utilizado para este propósito é o Flash, originalmente desenvolvido pelo Institute of Electric and Electronic Engineers (IEEE). Apesar de sua grande utilização, o Flash não possui uma interface gráfica amigável. Com o objetivo de aliar praticidade e precisão, neste trabalho é desenvolvido um pacote computacional em linguagem MATLAB, baseando-se na versão 1.9 do Flash. Tal pacote tem como principais características: i) interface gráfica amigável ao usuário e ii) facilidade para realização de análises paramétricas. Utilizando-se dos benefícios trazidos por esta ferramenta, foram realizadas análises de sensibilidade de parâmetros físico-práticos das principais configurações de linhas de transmissão do sistema brasileiro e das características típicas de descargas atmosféricas. Foram avaliados os seguintes parâmetros: i) descargas atmosféricas - funções que relacionam os níveis ceráunicos com as densidades de descargas por km² por ano, e funções distribuições de probabilidades cumulativas do valor de pico da corrente; ii) linhas de transmissão - valores das resistências de aterramento; altura da torre; comprimento da cadeia de isoladores e comprimento do vão. Foi feita, assim, uma verificação de guais parâmetros causam maiores impactos nas taxas de desempenho de linhas de transmissão. Os resultados indicam uma grande sensibilidade do desempenho das linhas de transmissão em relação às características das descargas atmosféricas típicas de uma determinada região. E, quanto aos parâmetros das linhas, o de maior expressividade é o comprimento da cadeia de isoladores, seguido pelos valores das resistências de aterramento, altura da torre e comprimento do vão. Tem-se a expectativa de que tal ferramenta possa ser útil para as empresas de energia elétrica, que dependem de cálculos sistemáticos de desempenho de suas linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas locais.

ABSTRACT

Given the development of technology and hence the increasing reliance of society on electricity, studies to improve the performance of the electrical system are becoming increasingly indispensable. In this context, in countries of continental dimensions like Brazil, where the main sources of electricity are hydroelectric sources, it is necessary to build extensive transmission lines that connect these sources to the main consuming centers. Thus, the route of the lines in question comprises regions with orographic characteristics quite diverse, and the subject of repeated unwanted interactions with electromagnetic phenomena. One of the main effects of these phenomena corresponds to the electromagentic transients by lightning. Such discharges can generate levels of on the string insulators capable causing flashover or backflashover and therefore lead to supply interruptions and disturbances in electricity supply quality power to consumers. Given the above, it is essential to calculate study and analyze the performance of transmission lines that suffer interference from lightning. To do so requires the development of reliable computational tools that allow parametric analysis of the performance in question. The software is widely used for this purpose is the Flash, originally developed by the Institute of Electric and Electronic Engineers (IEEE). Despite its wide use, Flash hasn't a friendly graphical interface. This complicates analysis of parametric performance of transmission lines. Moreover, because of their precarious user interface, Flash requires the use of qualified personnel. Aiming to combine practicality and accuracy, this work developed a software package in MATLAB, based on the most current version of Flash (version 1.9). This package is capable of estimating the number of outages in the line due to the incidence of lightning, its main characteristics: i) graphical interface with the user, which eliminates the need for subject matter experts to generate reliable results, and ii) facility to perform parametric analysis. Is important to say, this package has been validated through comparisons of results with those from the Flash. Using the benefits brought by the computational tool was conducted sensitivity analysis of physical and practical configurations of the main transmission lines of the national system and the typical characteristics of lightning. Among these parameters and characteristics, may be cited as follows: i) lightning - functions that relate the keraunic levels with the ground flash density and cumulative probability distribution functions of the peak value current, ii) lines transmission - values of grounding resistances; height of the tower (which directly affects the surge impedance), length of the string insulators and the span length. Therefore, was made a check which the parameters that cause the most impact on performance rates of transmission lines. The results indicate a great sensitivity of the performance of

transmission lines in relation to the characteristics typical of lightning in a given region. This is proven by the responses when used: i) functions that relate the keraunic levels with the ground flash density and ii) functions of cumulative probability distribution functions of the peak value of current. Was made, therefore, a check which parameters cause the most impact on performance rates of transmission lines. The results indicate a great sensitivity of the performance of transmission lines in relation to the characteristics typical of lightning in a given region. And as to the parameters of the lines, the highest expression is the I string insulators length, followed by the values of grounding resistances, tower height and the span length. There is the expectation that this tool could be useful for electric power companies, which rely on systematic calculations of performance of transmission lines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Onda de corrente registrada no Morro do Cachimbo correspondente à
primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica negativa descendente -
definição dos principais parâmetros associados. Adaptada de [8]18
Figura 2-2 - Rampas triangular (a) e retangular (b)20
Figura 2-3 – Linha de transmissão trifásica aérea genérica com dois cabos para-raios.
Figura 2-4 – Ilustração da "largura lateral de atração equivalente". L = b + 2 R_a 24
Figura 2-5 – Ilustração da "área de atração equivalente" = L x 100 km25
Figura 2-6 – Ilustração do MEG. Adaptada de [53]
Figura 2-7 – Projeção de "PQ" no solo para MEG. Adaptada de [5]
Figura 2-8 – Blindagem Efetiva - X _S reduzido a zero. Adaptada de [5]
Figura 2-9 - Curva tensão x tempo para flashover das cadeias de isoladores.
Adaptada de [5]
Figura 2-10 – Gráfico da relação da máxima distância de atração. Adaptada de [5]38
Figura 2-11 - Forma de onda, tipo rampa, assumida para a corrente de descarga.
Adaptada de [5]44
Figura 2-12 – Torre de transmissão cônica – classe 1. Adaptada de [82]46
Figura 2-13 – Torre de transmissão forma-H – classe 2. Adaptada de [82]46
Figura 2-14 – Torre de transmissão cilíndrica – classe 3. Adaptada de [82]46
Figura 2-15 – Torre de transmissão Waist – classe 4. Adaptada de [82]46
Figura 2-16 – Distribuição estatística de resistência de aterramentos elétricos de torres
de linhas de transmissão de 230 kV da CEMIG . (mínimo: 10 Ω e máximo: 60 Ω)49
Figura 2-17 – Distribuição estatística de resistência de aterramentos elétricos de torres
de linhas de transmissão de 230 kV da CEMIG. (mínimo: \approx 15 Ω e máximo: \approx 225
Ω)
Figura 2-18 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão. Adaptada de [5] 50
Figura 2-19 – Oscilação de l'cn necessária para causar disrupção em uma fase "n".
Adaptada de [5]55
Figura 2-20 – Ilustração de incidência vertical60
Figura 2-21 – Probabilidade acumulada de ocorrência de um ângulo de descarga em
módulo maior que θ_o . Adaptada de [54]60
Figura 3-1 – Fluxograma do Caso de Uso
Figura 3-2 – 1ª Tela GUI – Parâmetros de entrada: geometria da torre
Figura 3-3 – 2ª Tela GUI – Demais parâmetros de entrada

Figura 3-4 – Parâmetros gerais da linha de transmissão
Figura 3-5 – Parâmetros da torre77
Figura 3-6 – Parâmetros das resistências de pé da torre78
Figura 3-7 – Parâmetros dos cabos fase79
Figura 3-8 – Índices dos cabos fase e para-raios79
Figura 3-9 – Parâmetros dos cabos para-raios79
Figura 3-10 – Parâmetros das descargas atmosféricas
Figura 3-11 – 3ª Tela GUI – Resultados Finais80
Figura 4-1 - Silhueta da Torre S4, 230kV – LT base
Figura 4-2 – Caso Base: situação da torre semelhante à classe Waist85
Figura 4-3 – Caso Base: parâmetros gerais da linha, torre e cabos
Figura 4-4 - Influência dos níveis de T_d na taxa total de desligamento da linha92
Figura 4-5 - Influência dos valores de resistência de pé da torre na taxa total de
desligamento da linha96
Figura 4-6 - Influência da altura da torre na taxa total de desligamento da linha 98
Figura 4-7 - Influência do comprimento da cadeia de isoladores na taxa total de
desligamento da linha100
Figura 4-8 - Influência do comprimento do vão na taxa total de desligamento da linha.
Figura 4-9 – Curvas $N_g \times T_d$ para a formulação do CIGRÈ e da CEMIG 104
Figura 4-10 – Comportamento das funções de distribuição de probabilidade cumulativa
do pico de corrente Flash (CIGRÉ - clássica) x CEMIG (MG)105
Figura 4-11 - (a) Taxa de desligamento por backflashover segundo variações nos
parâmetros: T_d , resistência de pé da torre, altura da torre, comprimento do vão e
comprimento da cadeia de isoladores. (b) Figura 4-11-(a) em detalhe, com escala
vertical ampliada106
Figura 4-12 - (a) Taxa de desligamento por flashover segundo variações nos
parâmetros: T_d , resistência de pé da torre, altura da torre, comprimento do vão e
comprimento da cadeia de isoladores. (b) Figura 4-12-(a) em detalhe, com escala
vertical ampliada108
Figura 4-13 – (a) Taxa de desligamento total segundo variações nos parâmetros: T_d ,
resistência de pé da torre, altura da torre, comprimento do vão e comprimento da
cadeia de isoladores. (b) Figura 4-13-(a) em detalhe, com escala vertical ampliada.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Causa dos desligamentos no Sistema Interligado Nacional (SIN).
Adaptada de [24]4
Tabela 2-1 - Níveis ceráunicos típicos de algumas regiões do mundo. Adaptada de
[8,22]
Tabela 2-2 - Densidades de descargas para o solo típicas de algumas regiões do
mundo. Adaptada de [8,22]15
Tabela 2-3 – Relações entre $T_d e N_g$. Adaptada de [8,22]
Tabela 2-4 – Estatísticas de medição do valor de pico e tempo de frente das primeiras
descargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes negativas22
Tabela 2-5 – Parâmetros "A" e "B" decorrentes de análises empíricas de calibração de
desempenhos reais de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas31
Tabela 4-1 - Resultados principais do Caso Base: Flash 1.9 x FLASHCEFET -
taxas de desligamentos por flashover, backflashover e taxa total
Tabela 4-2 – Demais resultados do Caso Base: Flash 1.9 x FLASHCEFET
Tabela 4-3 – Influência de T _d no nível das taxas de desligamento por <i>backflashover</i> ,
flashover e taxa total [desligamentos/100 km/ano]
Tabela 4-4 - Influência da Probabilidade Cumulativa, no nível das taxas de
desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100
km/ano]
Tabela 4-5 - Influência da Probabilidade Cumulativa, no nível das taxas de
desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100
km/ano], para outros valores de resistência de ateramento
Tabela 4-6 - Influência das resistências de pé da torre no nível das taxas de
desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100
km/ano]
Tabela 4-7 - Influência da altura da torre no nível das taxas de desligamento por
backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100 km/ano]
Tabela 4-8 - Influência do comprimento da cadeia de isoladores no nível das taxas de
desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/ 100
km/ano]
Tabela 4-9 – Influência do comprimento do vão no nível das taxas de desligamento
por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/ 100 km/ano]

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica				
AT	Alta Tensão				
ATP	Alternative Transients Program				
СА	Corrente Alternada				
CC	Corrente Contínua				
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais				
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais				
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico				
CPU	Central Processing Unit				
DA	Descarga Atmosférica				
DFD	Diagrama de Fluxo de Dados				
DOS	Disk Operation System				
EAT	Extra Alta Tensão				
EMTP	Eletromagnetic Transients Program				
EPRI	Electric Power Research Institute				
etc.	Etcetera				
GEAP	Grupo de Eletromagnetismo Aplicado				
GUI	Graphic User Interface				
IBM	Internacional Business Machines				
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos				
LT	Linha de Transmissão				
MATLAB	MATrix LABoratory				
MEG	Modelo Eletrogeométrico				
MG	Minas Gerais				
MS	Microsoft				
NBI	Nível Básico de Isolamento				
NBR	Norma Brasileira				
PC	Personal Computer				
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento				
PTI	Power Technology Institute				
p.u.	Por Unidade				
SIN	Sistema Interligado Nacional				
SLT	Sistema de Localização de Tempestades				
TEM	Transverso-Eletromagnético				

UAT	Ultra Alta Tensão		
%	Símbolo de porcentagem		
di/dt	Derivada da corrente em função do tempo		
$\int [i(t)]^2 dt$	Integral do quadrado da corrente em função do tempo		
TANG	Tangente		
In	Logaritmo neperiano		
COS	Cosseno		
sen	Seno		
arcsen	Arco-seno		
arccos	Arco-cosseno		
arctan	Arco-Tangente		
m	Unidade de medida (metro)		
Km	Unidade de medida (quilômetro)		
km ²	Unidade de superfície (quilômetro quadrado)		
Ω	Medida elétrica (ohm) - resistência e impedância		
kA	Medida elétrica (ampère) – corrente		
kV	Medida elétrica (quilovolts) – tensão		
MV	Medida elétrica (megavolts) – tensão		
kV / m	Medida elétrica (quilovolts por metro)		
MV / m	Medida elétrica (megavolts por metro)		
A ² s	Medida elétrica – energia por unidade de impedância (ampère ao quadrado vezes segundo)		
J / Ω	Medida elétrica - energia por unidade de impedância (joule por ohm)		
Hz	Medida de frequência (hertz)		
kHz	Medida de frequência (quilohertz)		
μs	Medida de tempo (micro-segundos)		
m / μs	Medida de velocidade (metro por micro-segundo)		
T _d	Nível ceráunico		
Ng	Densidade de descargas atmosféricas para o solo		
T _h	Número de horas, em um ano, de tempestade com trovoada		
I _P	Pico de corrente da descarga atmosférica		
Т	Intervalo de tempo entre amplitudes de corrente – Figura 2-1		
S	Taxa de crescimento médio da corrente entre amplitudes de corrente na frente da onda – Figura 2-1		
t _f	Tempo de frente do sinal de corrente		
t _c	Tempo de cauda do sinal de corrente		
$P(I \ge I_P)$	Distribuição de probabilidade cumulativa para o pico de corrente		
σ_{ln}^{*}	Desvio padrão logaritmo		
A	Cabo Fase A – Figura 2-3		

В	Cabo Fase B – Figura 2-3				
С	Cabo Fase C – Figura 2-3				
P _{R1}	Cabo para-raios – Figura 2-3				
P _{R2}	Cabo para-raios – Figura 2-3				
h _F	Altura cabos fases – Figura 2-3				
$h_{PR} = H_{PR}$	Altura cabos para-raios _ Figura 2-3				
b	Distância horizontal dos cabos para-raios - Figura 2-3				
L	Largura lateral – Figura 2-4				
$R_a = r_s$	Raio de atração				
N _{LT}	Número de descargas atmosféricas que atinge a linha de transmissão por 100 km de linha por ano				
Н	Altura média do condutor mais exposto em relação ao solo - Figura 2-6				
f	Flecha dos cabos para-raios				
H _{PRMV}	Altura mínima dos cabos para-raios no meio do vão				
r ₁	Raio de atração dos cabos pára-aios				
r ₂	Raio de atração dos cabos fase				
r ₃	Raio de atração do solo				
AB e A'B'	Arco relativo à região de exposição dos cabos fase à incidência de descarga atmosférica – Figura 2-6				
BB'	Arco relativo à região de blindagem pelos cabos para-raios – Figura 2-6				
AD e A'D	Arco relativo à região onde a descarga atingirá o solo – Figura 2-6				
A	Constante calibrada experimentalmente – Tabela 2-5				
В	Constante calibrada experimentalmente – Tabela 2-5				
H _m	Altura média dos cabos fase – Tabela 2-5				
H _t	Altura da torre – Tabela 2-5				
φ	Cabos fase - Figura 2-7				
G	Cabos para-raios - Figura 2-7				
β	Fator de correção da distância de atração para o solo				
$\delta = \alpha_s$	Ângulo de proteção ou de blindagem				
A	Descargas atmosféricas do tipo "A" - Figura 2-7				
DP	Arco - Figura 2-7				
С	Descargas atmosféricas do tipo "C" - Figura 2-7				
QR	Arco Figura 2-7				
В	Descargas atmosféricas do tipo "B" - Figura 2.7				
PQ	Arco Figura 2-7				
X _S	Projeção do arco "PQ" no solo - largura de falha de blindagem				
$Y_{\Phi} = h_{\Phi}$	Altura do cbo fase – Figura 2-7				
$Y_G = h_G$	Altura do cabo para-raios - Figura 2-7				
X _G	Abscissa do cabo para-raios - Figura 2-7				

δ_{BE}	Angulo de blindagem efetivo				
Vc	Tensão crítica que pode provocar flashover na cadeia de isoladores				
I _{min}	Mínimo valor da corrente da descarga atmosférica capaz de causar falha de blindagem				
Zφ	Impedância de surto própria do condutor incluindo o efeito corona				
r	Raio de um cabo condutor				
h	Altura média do condutor ao solo				
R _c	Raio do cabo fase considerando o efeito corona				
r _{eq}	Raio equivalente do feixe reduzido a um único condutor				
r ₁₁	Raio do subcondutor 1				
r _{1n}	Distância do subcondutor 1 a um condutor "n"				
n	Condutor genérico				
N	Número de subcondutores				
Eo	Campo elétrico crítico de início de corona				
V	Tensão aplicada no condutor				
k ₁ e k ₂	Constantes - Figura 2-9				
W	Comprimento da cadeia de isolador				
t _c	Tempo que a cadeia leva para a disrupção				
R _{amin}	Distância de atração mínima que pode causar falha de blindagem				
$R_{amax} = r_{SMAX}$	Distância de atração máxima que pode causar falha de blindagem				
I _{max}	Máximo valor da corrente da descarga atmosférica capaz de causar falha de blindagem				
N _{FB}	Taxa de falha de blindagem por fase				
P _{min}	Probabilidade cumulativa da corrente mínima (I _{min})				
P _{max}	Probabilidade cumulativa da corrente máxima (I _{max})				
N _{FBT}	Taxa total de falha de blindagem				
nce	Número de condutores fase expostos				
j	Contador				
ncf	Número de condutores fase				
$\tau_{p} = \tau_{T}$	Tempo de propagação na torre do sinal de corrente injetado				
V _p	Aproximadamente 80 % da velocidade da luz no vácuo				
τν	Tempo de propagação no vão do sinal de corrente injetado				
N _T	Número de descargas atmosféricas que incidem na torre por 100 km de linha por ano				
Z _T	Impedância de surto da torre				
$h = h_T$	Altura da torre Figuras 2-12 a 2-15				
Z _{nn}	Impedância de surto própria de um cabo para-raios				
h _n	Altura média do cabo para-raios				
D _n	Diâmetro dos cabos para-raios				
Z _{nm}	Impedância de surto mútua entre cabos para-raios				
a _{mn}	Distância do condutor "m" à imagem de "n" no solo				

b _{mn}	Distância horizontal entre o condutor "m" e "n"
Z ₁₁	Impedância própria do cabo para-raios
Z ₁₂	Impedância mútua entre os cabos para-raios
Z _S	Impedância equivalente, combinação entre as impedâncias própria e mútua dos cabos para-raios
$Z_{n1} e Z_{n2}$	Impedancias mutuas entre cada condutor fase (n) e um dos cabos para-raios (1 ou 2)
k _n	Fator de acoplamento entre cabos para-raios e cabos fase
Z _T	Impedância de surto da torre
V _T	Tensão no topo da torre
V _{PN}	Tensão do braço da torre
V _{SN}	Tensão na cadeia de isoladores
V _{QN}	Tensão de fase ou do condutor
R	Resistência de aterramento
$ au_{pn}$	Tempo de tráfego da onda do topo da torre ao braço da mesma
с	Velocidade da luz no vácuo (300 m / µs)
h _{fase}	Altura do condutor fase
ZI	Impedância intrínseca do circuito "vista" pela corrente de descarga no instante que é injetada no mesmo
Z _w	Impedância de onda
Ψ	Constante de amortecimento
Ν	Maior valor que o número de onda, "n", pode atingir – número de reflexões
V _R	Sobretensão na base da torre
Y _n	Distância do topo da torre ao seu braço
(V _I) ₂ e (V _I) ₆	Tensões disruptivas nos tempos 2 e 6 µs, respectivamente
I _{cn}	Correntes críticas necessárias para provocar disrupção nas cadeias de isoladores
l´ _{cn}	Nova corrente crítica capaz de causar a disrupção em alguma fase, com a tensão à frequência industrial superposta
V _{on}	Tensão de pico fase-terra
θη	Ângulo de fase instantâneo
α _n	Ângulo de fase da fase "n" (genérica)
V _{In}	Tensão disruptiva no isolador nos tempos críticos
l _{cn}	Valor médio de l' _{cn} para cada fase durante o tempo em que ela é dominante
$\theta_1 e \theta_2$	Angulos limites de domínio de cada fase "n" durante um ciclo completo (360°)
P _{DF}	Percentual de domínio de uma determinada fase em um ciclo (360º)
P _F	Àngulo total de domínio da fase no ciclo
N _{BF}	Taxa de backflashover
numfase	Número de fases da linha de transmissão
N _{BFT}	Taxa total de backflashover
FQ[R(k)]	Frequencia de ocorrência de cada resistência de aterramento

	2	xi	ii

Taxa de desligamento total da linha de transmissão
Densidade de probabilidade conjunta
Desempenho total da linha sob estudo
Número de vãos
Tipo de geometria de torre de maior ocorrência ao utilizar sua série e sua variação angular de no máximo 2º (230 kV)
abela – 4-2 – Demais resultados do Caso Base: Flash 1.9 x FLASHCEFET
Ground Flash Density
Index
Span Travel Time
Tower Surge Impedance
Tower Travel Time
Tower Top Voltage
Shieldwire Corona Radius
Equivalent Bundle Radius
Surge Impedance Of Shieldwire
Impedance Of Shieldwire
Intrinsic Circuit Impedance
Coupling Factor
Flashover Voltage At 2 Microseconds
Flashover Voltage At 6 Microseconds
Travel Time For Each Crossarm
Critical Stroke Current At 2 Microseconds
Critical Stroke Current At 6 Microseconds
Structure Footing Resistance
Tower Wave Impedance
Backflashover Rate for a footing resistance
Backflashover Rate
Flashover Rate
Total Rate

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Relevância do tema sob investigação

O desenvolvimento da tecnologia e, consequentemente, a dependência cada vez maior da sociedade por energia elétrica, tornam indispensáveis estudos para melhorar a qualidade da energia ofertada pelo sistema elétrico aos consumidores residenciais e industriais.

Neste contexto, em países de dimensões continentais, como o Brasil, onde as principais fontes de energia elétrica são de origem hidrelétrica, é necessária a construção de extensas linhas de transmissão que interligam tais fontes aos principais centros consumidores. Desta forma, o percurso das linhas em causa envolve regiões com características orográficas bastante diversificadas, sendo alvos de constantes interações com fenômenos eletromagnéticos indesejáveis. Um dos principais fenômenos corresponde às descargas atmosféricas. A interação das descargas atmosféricas com as linhas de transmissão pode se processar de duas formas, a saber:

- Incidência direta ⇒ quando a descarga atmosférica incide diretamente nos cabos fase ou para-raios (ao longo do vão), ou no topo da torre (descarga atmosférica direta). Neste caso, em decorrência da injeção direta de corrente associada à descarga atmosférica, ondas eletromagnéticas (traduzidas por ondas de tensão e de corrente) viajam de forma guiada pelos condutores da linha e podem gerar elevadas sobretensões ao longo do vão e na cadeia de isoladores, em decorrência do transitório eletromagnético que é estabelecido no sistema atingido [1-3].
- Incidência indireta ⇒ quando a descarga atmosférica incide nas proximidades das linhas de transmissão, no solo ou objetos próximos (descarga atmosférica indireta). Neste caso, ondas de tensão e de corrente são induzidas na linha ao ser "iluminada" pelo correspondente campo eletromagnético, gerado pela corrente da descarga atmosférica, que se propaga pelo ar (sofrendo efeito do solo). Tais ondas de tensão e de corrente, também, podem gerar sobretensões ao longo do vão e na cadeia de isoladores [4].

Tem sido mostrado na literatura técnica que, normalmente, as descargas atmosféricas indiretas não são capazes de gerar níveis de sobretensões nas cadeias de isoladores dos sistemas de transmissão que superem seus níveis básicos de isolamento (NBI) [2,3]. Desta forma, a incidência indireta não é considerada nos estudos de interação de descargas atmosféricas com linhas de transmissão.

Por outro lado, as descargas atmosféricas diretas podem gerar sobretensões, por exemplo, nas cadeias de isoladores, possíveis de superar o NBI das mesmas. Tal processo pode ser estabelecido, segundo a incidência das descargas, de duas maneiras distintas:

- Incidência direta nos cabos para-raios (ao longo do vão) ou no topo da torre ⇒ se a sobretensão superar o NBI da cadeia de isoladores, haverá um arco elétrico na mesma. Este fenômeno é conhecido como *backflashover* [5-7].
- Incidência direta nos cabos fase ⇒ conhecida como falha de blindagem. Caso a sobretensão supere o NBI da cadeia de isoladores, haverá um arco elétrico na mesma. Este fenômeno é conhecido como *flashover* [5-7].

Os dois fenômenos descritos acima (*flashover* e *backflashover*) correspondem a uma importante fonte de curto-circuito no sistema de transmissão. Por conseguinte, são responsáveis por uma parcela significativa de desligamentos não programados no fornecimento de energia elétrica [7,8]. Tal situação, altamente indesejada, pode promover paradas em processos produtivos essenciais para as regiões alimentadas pelas linhas de transmissão.

O estudo e cálculo relativos às respostas das linhas de transmissão à ação nociva das descargas atmosféricas são denominados de "desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas". Tal desempenho é caracterizado por índices, que traduzem as taxas de *flashover* e *backflashover*, e que fornecem o número de desligamentos por 100 km de linha por ano (por *flashover*, por *backflashover* e total), [5-7].

Para o levantamento das taxas em causa são necessárias as seguintes informações relativas:

Ås descargas atmosféricas ⇒ taxa de incidência (número de descargas atmosféricas por km² por ano); onda de corrente associada à descarga atmosférica e seus principais parâmetros (tais como, valor de pico/máximo, tempos de frente e de cauda, inclinações (di/dt) energia, carga transportada etc.); etc. Devido à natureza aleatória do fenômeno físico associado às descargas atmosféricas, os parâmetros em questão são definidos por meio de distribuições estatísticas. Para tal, são necessárias medições das ondas de

corrente de descargas atmosféricas naturais, durante vários anos. Detalhes sobre as estatísticas de medições internacionais e nacionais, bem como sobre as estações de medições, podem ser encontradas nas referências [8-1311].

- Ao sistema de transmissão ⇒ geometria (altura, comprimento, diâmetros e outros) das torres de transmissão, cabos fase e para-raios para cálculo de suas impedâncias de surto (próprias e mútuas), dos tempos de tráfego das ondas eletromagnéticas e do acoplamento eletromagnético entre cabos fase e para-raios; níveis de tensão; sistema de aterramento e solo para cálculo da resistência e impedância impulsiva de aterramento; curvas tensão x tempo de suportabilidade das cadeias de isoladores; etc. [1,9,14-17].
- Ao modelo de interação entre as descargas atmosféricas e as linhas de transmissão ⇒ normalmente, corresponde ao modelo eletrogeométrico que inclui relações empíricas entre o pico de corrente da descarga atmosférica, a geometria e nível de tensão da linha, fornecendo o raio de atração [1,2,5-7,9,10,14-17]. Em algumas pesquisas, é utilizado o Método de Monte Carlo para modelar tal interação [18-21].

O estado de Minas Gerais possui um solo com resistividade elevada, com um valor médio de 2.400 Ω . m (atingindo em alguns lugares valores superiores a 10.000 Ω . m), aliado a condições ambientais peculiares, traduzidas numa elevada incidência de descargas atmosféricas [7,8]. Tais condições têm revelado ao longo do tempo um elevado grau de adversidade quanto ao desempenho dos sistemas de energia elétrica, bem como de equipamentos, frente aos surtos de tensão/corrente provenientes de descargas atmosféricas. Em função disso, as descargas atmosféricas constituem os principais elementos de solicitação do sistema de energia elétrica no Estado [7,8,22,23]. Situação semelhante ocorre para o país de um modo geral [7,8,22].

Dados da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), do final de década de 90, revelavam que em torno de 70 % dos desligamentos não programados de energia elétrica decorriam da danosa interação das descargas atmosféricas com os sistemas de transmissão [7,8]. Este elevado valor foi determinado após trinta anos de estudos, pesquisas e medições intensivas realizadas pela CEMIG, cujos detalhes podem ser encontrados em [7,8,22]. Estatísticas internacionais, na época, indicavam um índice médio de 65 % [7,8,22].

Mais recentemente, no ano de 2009, um estudo mostrou que as taxas de desligamento devido às descargas atmosféricas continuam elevadas [24]. A Tabela 1-1 resume estes resultados apresentados.

Causas dos desligamentos	Nível de tensão (kV)			
Causas uos desligamentos	500	440	345	230
Descargas atmosféricas, ventanias e temporais	57 %	69 %	58 %	71 %
Queimadas	18 %	28 %	31 %	9 %
Vegetação	12 %	0 %	6 %	6 %
Outros	13%	3%	5%	14%

Tabela 1-1 – Causa dos desligamentos no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Ada	otada	de	[24]
7.000	plaad	u U	

O quadro descrito ilustra a relevância do tema em investigação, qual seja: desenvolver metodologias capazes de estimar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas diretas. Por conseguinte, justifica esforços no sentido de desenvolvimento de pesquisas adicionais nesta temática, com o objetivo primeiro de contribuir para a elaboração de projetos de linhas de transmissão com menores taxas de desligamento devido às descargas atmosféricas.

1.2 – Contextualização da dissertação

O tema em questão tem despertado amplo interesse das companhias energéticas brasileiras. Esse interesse está relacionado à carência e insuficiência de metodologias consistentes de avaliação do comportamento transitório do sistema elétrico quando da incidência de descargas atmosféricas. Tal carência conduz a prejuízos como, por exemplo, desligamentos do sistema e perda de equipamentos.

Julga-se que existem, ainda, muitas questões em aberto na investigação da interação de descargas atmosféricas com os sistemas elétricos. Levando-se em consideração seus efeitos devastadores, busca-se a obtensão de respostas a tão relevantes questões. Recentemente, por meio de um projeto cooperativo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), entre a CEMIG, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) /GEAP (Grupo de Eletromagnetismo Aplicado – cadastrado no CNPq), investigações da interação de descargas atmosféricas com o sistema elétrico têm sido conduzidas com o objetivo de avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente a esses fenômenos.

Alguns pontos ainda merecem investigações adicionais (e, portanto, susceptíveis de pesquisa), tais como:

- A quantificação experimental da variação da permissividade elétrica e resistividade de solos típicos com a frequência (para um espectro característico das descargas atmosféricas).
- O desenvolvimento de uma rotina computacional, acoplada com o EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) / ATP (*Alternative Transients Program*), que caracterize o comportamento de aterramentos elétricos frente aos transitórios eletromagnéticos estabelecidos pelos surtos atmosféricos.
- A resposta de sistemas de transmissão em decorrência da solicitação por descargas atmosféricas.

Nesse sentindo foram eleitos os seguintes tópicos principais e norteadores do projeto P&D em questão:

- i) O levantamento experimental da variação com a frequência dos parâmetros eletromagnéticos de solos típicos.
- ii) O desenvolvimento de um modelo eletromagnético computacional (que utilize os resultados experimentais) para quantificar a resposta de aterramentos elétricos às solicitações associadas às descargas atmosféricas.
- iii) O acoplamento deste modelo com o ATP com o objetivo de proceder a avaliações do desempenho de sistemas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- iv) A elaboração de uma ferramenta computacional que possibilite uma avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e que permita análises paramétricas.

A presente dissertação, resultado de parte das pesquisas que vem sendo desenvolvidas neste projeto, se insere e contempla o quarto tópico descrito acima.

1.3 – Objetivos Gerais e Específicos

1.3.1 – Objetivos gerais

Dada a importância do assunto em pauta, um grupo de estudos do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) desenvolveu um pacote computacional, denominado *Flash*, para cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Esta ferramenta calcula as taxas de desligamentos, por *flashover* e por *backflashover*, de uma determinada linha de transmissão, com base em estudos existentes na literatura que levam em consideração algumas aproximações, mediante resultados empíricos decorrentes de desempenhos observados de linhas de transmissão reais [2,3]. O *Flash* corresponde ao programa mais amplamente utilizado pelas concessionárias de energia para estudos de desempenho de suas linhas de transmissão [2,3]. Apesar de sua grande utilização, o *Flash* não possui uma interface gráfica amigável. Tal situação dificulta análises paramétricas de desempenho de linhas de transmissão.

Diante do exposto, o objetivo principal desta dissertação de mestrado é implementar uma ferramenta computacional, baseada no *Flash*, com interface amigável, que possibilite uma avaliação rápida e prática de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e que permita, também, uma série de análises de sensibilidade de interesse aplicado.

Uma ferramenta desta natureza pode ser de grande utilidade para as concessionárias de energia elétrica, que dependem de cálculos sistemáticos de desempenho de suas linhas de transmissão (tanto na fase de projeto, quando na fase de operação) frente às descargas atmosféricas locais. É merecedor de destaque o fato de que tal ferramenta tem utilidade, também, em atividades de pesquisa e de ensino.

1.3.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem obtidos a fim de que o objetivo principal deste trabalho seja alcançado são:

- Estudo completo de todas as etapas envolvidas no processo de cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- Estudo do Flash em suas diversas versões.
- Migração do Flash versão 1.9 (mais atual), desenvolvido em linguagem C, para o pacote computacional MATLAB, objetivando a facilidade de análises de sensibilidade do desempenho de linhas de transmissão em relação aos parâmetros de entrada (descargas e linhas).
- Desenvolvimento de uma interface gráfica, GUI (*Graphic User Interface*), que facilite o manuseio da ferramenta computacional, tornando-a mais amigável ao usuário.

 Estudo de sensibilidade para os dados reais do sistema de transmissão da CEMIG e dos principais parâmetros práticos que caracterizam as descargas atmosféricas.

Este contexto propicia a ampla divulgação do trabalho por meio da publicação de artigos técnico-científicos em seminários, congressos e revistas.

1.4 – Metodologia

Como já destacado, com a finalidade de aliar praticidade e precisão, neste trabalho é desenvolvido um pacote computacional em linguagem *MATLAB*, baseando-se na versão mais atual do *Flash* (versão 1.9). Tal pacote, capaz de estimar o número de desligamentos da linha devido à incidência de descargas atmosféricas, busca suprir algumas limitações identificadas, tendo como principais características:

 i) Interface gráfica amigável com o usuário, o que dispensa a necessidade de especialistas no assunto para a geração de resultados confiáveis.

ii) Facilidade para realização de análises paramétricas.

Utilizando-se dos benefícios trazidos pela ferramenta computacional, são realizadas análises de sensibilidade de parâmetros físico-práticos das principais configurações de linhas de transmissão do sistema nacional e das características típicas de descargas atmosféricas. Dentre estes parâmetros e características, podem ser citados os seguintes:

- a) Descargas atmosféricas ⇒ funções que relacionam os níveis ceráunicos com as densidades de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, por ano; funções distribuições de probabilidades cumulativas do valor de pico da corrente e funções matemáticas que definem as formas de onda de corrente etc.;
- b) Linhas de transmissão ⇒ impedâncias de surto das torres de transmissão; utilização da tensão de frequência industrial no momento da incidência da descarga atmosférica; impedâncias impulsivas dos aterramentos das torres etc.;

Para tanto devem ser explorados alguns itens específicos que são:

- Estudo do estado da arte no tema associado aos principais passos para o cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.
- Investigação das aproximações consideradas pelo *Flash* e suas respectivas modificações nas diferentes versões (desenvolvimento histórico).
- Implementação do Flash em MATLAB e desenvolvimento de uma interface gráfica amigável.
- Validação do programa em MATLAB por meio das comparações dos resultados obtidos com aqueles oriundos do Flash, versão 1.9.
- Levantamento de dados elétricos reais condizentes com a situação em estudo.
- Análise comparativa entre parâmetros já pré-definidos pelo Flash e os parâmetros característicos das torres e linhas da CEMIG e os parâmetros característicos das descargas de Minas Gerais.
- Análises de sensibilidade e paramétrica visando levantar a influência de diversos parâmetros (impedância de aterramento, comprimento do vão, comprimento das torres, etc.) no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

1.5 – Organização do texto

O presente texto está organizado em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 são apresentados os principais aspectos envolvidos no cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Inicia-se com uma caracterização física objetiva do fenômeno físico associado às descargas atmosféricas, bem como de seus principais parâmetros: incidência geográfica e onda de corrente. Em seguida, é tratada a taxa de *flashover* que pode ocasionar desligamentos no sistema de energia elétrica originados por descargas que incidem diretamente nos cabos fase da linha de transmissão. Para isso é feito um estudo do Modelo Eletrogeométrico, falha de blindagem e blindagem efetiva. Na sequência, têm-se as etapas para o cálculo da taxa de *backflashover*, considerando os principais parâmetros, cálculos e aproximações que influenciam no cálculo da taxa total de desligamentos na respectiva linha de transmissão. Ao longo deste capítulo, sempre

que possível, são apresentadas as principais aproximações realizadas e implementadas no *Flash*. No final do capítulo é realizada uma análise crítica destas aproximações.

No Capítulo 3 é encontra-se um estudo do desenvolvimento histórico do *Flash* em suas diversas versões. Em seguida, descreve-se a ferramenta computacional desenvolvida em *MATLAB*, que é baseada na versão 1.9 do *Flash*, com ênfase na interface amigável com o usuário.

No Capítulo 4 são descritos os principais resultados do trabalho, provenientes das diversas análises de sensibilidade/paramétricas proporcionadas pela ferramenta computacional apresentada no Capítulo 3.

Finalmente, no Capítulo 5, apresentam-se algumas conclusões gerais provenientes desta dissertação e respectivas propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – CÁLCULO DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 – Considerações Preliminares

As análises de avaliação de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas envolvem o entendimento, conhecimento, caracterização física e modelagem dos seguintes aspectos relativos ao fenômeno de descarga atmosférica [1-3,5-7,9,10,14-17]:

- Incidência de descargas atmosféricas na(s) região(ões) onde a(s) linha(s) de transmissão está(ão) inserida(s).
- Onda de corrente associada à descarga atmosférica e seus principais parâmetros característicos.
- Interação entre descarga atmosférica e linhas de transmissão.
- Disrupção elétrica devido às incidências de descargas atmosféricas nos condutores fase (*flashover*) e nos cabos para-raios ou topos das torres (*backflashover*).

Este capítulo tem por finalidade apresentar os principais aspectos relativos a cada item descrito acima, para que desta forma, sejam devidamente entendidas as etapas essenciais envolvidas no cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.

É oportuno comentar que tal apresentação é pautada, essencialmente, em uma caracterização objetiva dos itens em questão. Assim, para entendimento de detalhes adicionais são indicadas referências bibligráficas, ao longo do texto.

Como descrito no Capítulo 1, um dos principais objetivos deste trabalho corresponde ao entendimento e utilização do programa *Flash*. Desta forma, na apresentação destes itens, sempre que possível, é apresentada a forma pela qual os mesmos são considerados no *Flash*.

Diante do exposto, este capítulo está organizado da seguinte forma: primeiramente, são apresentados aspectos essenciais do fenômeno "descargas

atmosféricas", com ênfase para caracterização de seus parâmetros de incidência geográfica e de sua onda de corrente típica (seção 2.2). Em seguida, apresenta-se a metodologia de estimativa do número de descargas atmosféricas que incidem em uma determinada linha de transmissão (seção 2.3). Logo após, são retratados os passos para obter a falha de blindagem, que subsidia o levantamento da taxa de *flashover* (seção 2.4). Posteriormente, a seção 2.5 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo da taxa de *backflashover*. Encerrando-se as etapas para o cálculo de desempenho, tem-se o cálculo da taxa total de desligamentos (seção 2.6). Finalizando o capítulo, a seção 2.7 contém uma análise crítica das principais aproximações adotadas no *Flash* e respectivas conclusões (seção 2.8). A organização deste capítulo tem como princípio essencial aspectos didáticos, tendo em vista a consideração de que o *Flash* possui uma sequência de programação que dificulta o entendimento do cálculo de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Situação semelhante ocorre nos artigos, livros e normas técnicas associados ao assunto.

2.2 – Descargas Atmosféricas

2.2.1 – Aspectos Físicos

As descargas atmosféricas, também conhecidas popularmente por "raios", podem ser definidas, de forma geral, como descargas elétricas transitórias de curta duração, com uma alta corrente associada, e que seu canal, usualmente, pode atingir quilômetros de extensão [22,23]. Este fenômeno pode estar associado a: nuvens de tempestade, grandes tempestades de neve e de areia e vulcões em erupção [22,23]. Evidentemente, o maior interesse em termos de interação com as linhas de transmissão corresponde às descargas atmosféricas que possuem como fonte a distribuição de cargas elétricas no interior das nuvens de tempestade, também conhecida por *cumulus-nimbus*.

Por questões físicas ainda não totalmente conhecidas, as nuvens de tempestade, na maior parte dos casos, apresentam em sua base um excesso de cargas negativas, com pequenos bolsões de cargas positivas, e em seu topo uma concentração de cargas positivas [8,22,23]. Esta distribuição de cargas foi levantada por confiáveis experimentos realizados em diversas partes do mundo [8,22,23]. As

descargas atmosféricas podem ocorrer dentro das nuvens (intranuvens), entre nuvens, da nuvem para a estratosfera e entre nuvem e solo. Logicamente, em termos de interação com linhas de transmissão, as descargas que interessam são aquelas que ocorrem entre nuvem e solo. Sua ocorrência corresponde, aproximadamente, a 20 % do total das descargas atmosféricas [8,22,23]. Após anos de muita discussão e intensa pesquisa, atualmente é consenso na literatura que estas descargas são classificadas quanto à sua polaridade e propagação do canal precursor, da seguinte forma [8,22,23]:

- Descarga atmosférica negativa ⇒ quando a parte negativa da nuvem é efetivamente conectada ao solo.
- Descarga atmosférica positiva ⇒ quando a parte positiva da nuvem é efetivamente conectada ao solo.
- Descarga atmosférica descendente ⇒ quando o canal precursor de descarga se origina na nuvem e se desloca em direção ao solo.
- Descarga atmosférica ascendente ⇒ quando o canal precursor de descarga se origina no solo (ou em uma estrutura no solo) e desloca em direção à nuvem.

A maior parte das descargas atmosféricas nuvem-solo é negativa e descendente, estimando-se que correspondam a 90 % do total de ocorrências desta natureza [8,22,23]. Daí os estudos de desempenho dos sistemas elétricos consideram, praticamente, somente este tipo de descargas atmosféricas. A análise física deste fenômeno está além do escopo deste trabalho. Detalhes podem ser obtidos nas referências [8,22,23]. Contudo, uma breve descrição é fornecida a seguir com o objetivo de subsidiar o entendimento da interação das descargas atmosféricas com as linhas de transmissão.

A formação das nuvens *cumulus-nimbus*, caracterizadas por intensa atividade convectiva, decorre basicamente do encontro de correntes ascendentes de ar quente e úmido e de frentes frias superiores que se deslocam a maiores altitudes e que envolvem intensos fluxos descendentes. Tipicamente, seus diâmetros são da ordem de 10 km, sua base tem altitude de aproximadamente 1 km e seu topo em torno de 20 km. Devido ao ambiente local, com intensos gradientes de pressão e temperatura, a rigidez dielétrica do ar é substancialmente reduzida. Assim, a grande quantidade de cargas negativas de sua base gera intensos níveis de campo elétrico que superam facilmente a rigidez dielétrica do ar. Em decorrência, são formados canais ionizados que se deslocam da base da nuvem em direção ao solo. Estes canais possuem um comprimento médio de aproximadamente 50 m e o intervalo de tempo entre dois canais consecutivos é em torno de 50 µs. A progressão destes canais descendentes

se deve ao poder das pontas e a existência de um campo elétrico médio próximo de 0,6 MV/m. Estes canais progridem, assim, em direção ao solo. O conjunto de tais canais é denominado "canal precursor da descarga atmosférica". Quando atinge uma altitude de 30 m a 300 m, em média, do solo, o excesso de carga negativa depositada ao longo do canal precursor é capaz de induzir grandes quantidades de cargas positivas no solo ou em estruturas aterradas, como por exemplo, as linhas de transmissão. Neste momento, diversos canais ascendentes são formados no solo ou nas estruturas, pois o campo elétrico associado é suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar local. A partir da formação destes canais ascendentes, ocorre uma "disputa" de qual(is) canal(is) irá(ão) se conectar com o canal precursor descendente. Quando ocorre o encontro, o potencial da nuvem é efetivamente conectado ao solo por meio de um canal de plasma ionizado. O resultado é similar a um enorme curto-circuito e, assim, se dá a efetivação do fenômeno físico "descarga atmosférica", pois uma onda de corrente transitória e intensa percorre o canal. Esta corrente é denominada "corrente de descarga de retorno". Esta corrente provoca um efeito luminoso, denominado relâmpago. Ao percorrer o canal gera, também, um intenso deslocamento do ar nas proximidades (conhecida como onda de choque), gerando um efeito sonoro significativo, conhecido por trovão. Percebe-se, claramente, que:

- A região da nuvem carregada negativamente é conectada ao solo pelo canal de descarga;
- ii) O canal de descarga é predominantemente descendente (da nuvem para o solo).

Daí, a denominação "descarga atmosférica descendente negativa". Verifica-se a importância do solo ou estrutura terrestre no processo de conexão entre os canais ascendente e descendente.

O fenômeno descrito acima pode ocorrer uma única vez. Neste caso, detectase apenas uma corrente de retorno. Por outro lado, podem ocorrer várias vezes, sendo denominada descarga atmosférica múltipla, composta por várias correntes de retorno, a primeira e as subsequentes.

Com a base física descrita acima, necessária para se entender a ocorrência de descargas atmosféricas, promove-se, a seguir, a descrição de seus parâmetros de incidência geográfica e de sua onda de corrente.

2.2.2 – Parâmetros de Incidência Geográfica

Os parâmetros (ou índices) de incidência geográfica traduzem a frequência com que as descargas atmosféricas solicitam determinado local (ou região). São influenciados por diversos fatores, dentre os quais se destacam: 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 [8,22,23].

Historicamente, o primeiro parâmetro de incidência idealizado 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. Normalmente, eram utilizadas as estações meteorológicas já existentes para a observação e registro da ocorrência de trovoadas. Evidentemente, trata-se de uma medida rudimentar da atividade de descarga atmosférica de uma determinada região, mas foi utilizado por muito tempo. Muitos erros estão presentes neste índice, como por exemplo, [8,22,23]:

- i) Independentemente do número de trovoadas que são ouvidas em um dia, apenas um registro para aquele dia é computado;
- ii) Limitação do observador;
- iii) Impossibilidade de reconhecimento de descarga dentro da nuvem, entre nuvens e nuvem e solo etc.

A Tabela 2-1 ilustra os níveis ceráunicos típicos de algumas regiões do mundo.

Local	Nível Ceráunico (dias de trovoada por ano)
África do Sul	5 a 100
Alemanha	15 a 35
Austrália	5 a 107
Brasil (Minas Gerais)	50 a 90
Finlândia	8 a 22
França	20 a 30
Itália	11 a 60

Tabela 2-1 – Níveis ceráunicos típicos de algumas regiões do mundo. Adaptada de [8,22].

Posteriormente, com o desenvolvimento da tecnologia, foram desenvolvidas antenas, sintonizadas em 10 kHz, com o objetivo de medir o número de descargas atmosféricas por km² por ano, índice denominado de densidades de descargas atmosféricas para o solo (normalmente, designado por N_q). Tais antenas,

denominadas 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 [8,22,23]. Apesar das informações de N_g terem trazido muito ganho e precisão para a determinação da solicitação de uma região por descargas atmosféricas, em relação às informações de T_d, alguns erros importantes ainda persistiam, tais como [8,22,23]:

 i) Dificuldade de distinção entre descargas atmosféricas dentro de nuvens, entre nuvens ou entre nuvem e solo;

ii) Natureza eletromecânica do contador de descarga etc..

A Tabela 2-2 ilustra as densidades de descargas típicas de algumas regiões do mundo, contabilizadas por este método.

É importante destacar que tanto as informações de T_d quanto as 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.

Local	Densidade de descargas para o solo (descargas/km²/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

Tabela 2-2 – Densidades de descargas para o solo típicas de algumas regiões do mundo.

Com os levantamentos de T_d e N_g foram construídas, em diversas partes do mundo, curvas isoceráunicas e de isodensidades, respectivamente [8,22,23]. Adicionalmente, com os dados de T_d e N_g foram realizados diversos trabalhos de determinação, por meio de análises de regressão linear simples, de relações entre T_d e N_g , tomando T_d como a variável aleatória preditora. A Tabela 2-3 mostra diversas dessas relações. Essa tabela ilustra, também, os valores de N_g para um T_d específico igual a 70 (valor médio de Minas Gerais). Os resultados esboçam as diferenças significativas entre as diversas formulações, denotando, assim, que não é possível aplicar de forma generalizada relações desta natureza. A NBR-5419 [25] recomenda a

Adaptada de [8,22].
utilização da relação $N_g = 0.04T_d^{1.25}$. Estudos realizados em Minas Gerais (CEMIG) direcionaram para a seguinte equação: $N_g = 0.03T_d^{1.12}$. Esta relação gera resultados bastante distintos dos obtidos pela equação proposta pela NBR-5419.

Detalhes sobre o desenvolvimento histórico dos levantamentos de $T_d e N_g$, determinação de suas relações, aspectos práticos de aplicação, erros envolvidos etc. podem ser encontrados nas referências [8,22,23]. Os postos de observação de T_d e as redes de contadores de descargas (N_d) em Minas Gerais foram desativados.

Local		Relação entre N _g e T _d	$N_{g} (T_{d} = 70)$
África do Sul		$N_g = 0.04 T_d^{1.25}$	8,1
Brasil (Minas Gerais)		$N_g = 0.03 T_d^{1.12}$	3,5
Estados Unidos		$N_g = 0.1T_d$	7,0
Itália		$N_g = 0,00625 T_d^{1,55}$	4,5
México	Região Plana Região Costeira Região Montanhosa	$\begin{array}{l} N_g = 0,044 T_d^{1,24} \\ N_g = 0,026 T_d^{1,33} \\ N_g = 0,024 T_d^{1,12} \end{array}$	8,5 7,4 2,8
Nova Guiné		$N_g = 0.01 T_d$	0,7
Outros países		$N_g = 0,15T_d$	10,5

Tabela 2-3 – Relações entre T_d e N_g. Adaptada de [8,22].

No *Flash* são utilizadas relações entre N_g e T_d como as apresentadas na Tabela 2-3. Mais especificamente, a equação (2-1) é a utilizada na versão 1.9 do *Flash* (CIGRÉ) [9,10,14-17]:

 $N_{d} = 0.04 T_{d}^{1,25}$ (2-1)

A equação (2-2) também é utilizada no *Flash*, a qual relaciona N_g com o número de horas, em um ano, de tempestade com trovoada (T_h) [9, 10,14-17]:

 $N_{g}=0.054T_{h}^{1.1}$ (2-2)

Mais recentemente, foram desenvolvidos modernos sistemas que detectam, localizam e rastreiam tempestades que envolvem descargas atmosféricas, denominados Sistemas de Localização e Detecção de Descargas Atmosféricas. Na CEMIG, por exemplo, é utilizado o Sistema de Localização de Tempestades (SLT), cuja precisão na determinação de N_g foi substancialmente aumentada, além de possibilitar distinção entre as diversas correntes de retorno, polaridade, amplitude etc.

A descrição dos SLT's está fora do escopo desta dissertação de mestrado, sendo que, detalhes podem ser encontrados nas referências [22,23,26,27]. Estas referências apresentam, também, descrição detalhada sobre medições por meio de satélites e de radar.

2.2.3 – Parâmetros da Onda de Corrente

As primeiras medições das correntes associadas às descargas atmosféricas se restringiam ao valor de pico de corrente. Estas medições eram realizadas por meio de elos magnéticos, instalados em torres de transmissão, chaminés, edificações altas etc. [8,11,22,23].

Posteriormente, com o desenvolvimento de sistemas de registro, aquisição e armazenamento de dados, a forma completa das ondas de corrente típicas de descargas atmosféricas foram medidas diretamente em diversas partes do mundo (Suíça, Alemanha, Itália, Rússia, Estados Unidos, Canadá, África do Sul e Brasil, mais especificamente em Minas Gerais), [8,22,23]. Tais medições foram realizadas em estações de medição compostas por "torres instrumentadas". Em termos gerais, estas estações são construídas em locais de elevada altitude e são compostas, basicamente, por [8,11,22,23]:

- Torres altas (de 55 m a 540 m) com transdutores de corrente especiais, instalados em sua base ou em seu topo, como por exemplo: *shunt* de corrente, bobinas de *Rogowski* e bobinas de *Pearson*.
- Abrigo blindado com equipamentos de medição e registro (osciloscópios, computadores etc.).
- Transmissão do sinal de corrente (óptico ou elétrico) da torre instrumentada para o abrigo blindado, por meio de cabos coaxiais e, mais recentemente, mediante a utilização de fibras óticas.

Dentre todas as estações de medição direta de descargas atmosféricas, duas merecem destaque (uma pelo aspecto histórico e pela base de dados que gerou e outra pelo fato de ser instalada em território brasileiro) [8,22,23]:

Estação do Monte San Salvatore ⇒ instalada desde 1958, nas proximidades do Lago Lugano, na Suíça, aproximadamente a 912 m acima do nível do mar Esta estação possuía duas torres (separadas de 400 m de distância), posicionadas no topo do Monte San Salvatore, com altura aproximada de 55 m. A medição das ondas de corrente era processada por meio de shunts de

corrente instalados no topo das duas torres. Registrou mais de mil descargas atmosféricas (ondas de corrente de retorno), sendo a maior base de dados disponível internacionalmente sobre correntes de descarga atmosférica [12,13].

Estação de pesquisas de descargas atmosféricas da Serra do Morro do Cachimbo ⇒ instalada pela CEMIG em 1985, 15 km ao sul de Belo Horizonte, Minas Gerais. Posicionada numa altitude de 1.453 m acima do nível do mar, possui uma torre instrumentada de 60 m de altura. A medição é realizada por meio de duas bobinas de *Pearson*, instaladas na base da torre. A base de dados gerada pelas medições da Estação do Morro do Cachimbo é significativa, sendo considerada a mais importante nas regiões tropicais do planeta [8,11,22,28-31].

Maiores detalhes das duas estações descritas, além de outras em operação no mundo, incluindo aspectos históricos, processo de medição, base de dados, resultados estatísticos etc. podem ser encontrados nas referências [8,11,22,23].

A Figura 2-1 esboça a forma de onda típica das correntes associadas às primeiras descargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes negativas [8,11].



Figura 2-1 - Onda de corrente registrada no Morro do Cachimbo correspondente à primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica negativa descendente – definição dos principais parâmetros associados. Adaptada de [8].

Os principais parâmetros característicos, para fins de aplicação na engenharia de proteção contra descargas atmosféricas, são descritos [13]:

- $I_P \Rightarrow$ valor de pico da onda de corrente.
 - De um modo geral, as ondas de corrente relativas às primeiras descargas de retorno apresentam dois diferentes picos de corrente, sendo o primeiro

 (I_{P1}) usualmente menor que o segundo (I_{P2}) . Já as descargas de retorno subsequentes apresentam geralmente um único pico.

- Os parâmetros T₁₀, T₃₀, S₁₀, S₃₀ e TANG são definidos em termos de I_{P1}.
- o O parâmetro T_{50} é definido em função de I_{P2} ;
- T₁₀ ⇒ intervalo de tempo entre as amplitudes de 10 % e 90 % (em relação a I_{P1}) da corrente na frente da onda;
- $T_{d10} \Rightarrow$ tempo de frente equivalente ($T_{d10} = T_{10}/0.8$);
- T₃₀ ⇒ intervalo de tempo entre as amplitudes de 30 % e 90 % (em relação à I_{P1}) da corrente na frente da onda;
- $T_{d30} \Rightarrow$ tempo de frente equivalente ($T_{d30} = T_{30}/0,6$);
- TAN₁₀ ⇒ taxa de crescimento da corrente correspondente à tangente, na frente da onda, na amplitude de 10 %;
- S₁₀ ⇒ taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 10 % e 90 % (em relação à I_{P1}) na frente da onda;
- S₃₀ ⇒ taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 30 % e 90 % (em relação à I_{P1}) na frente da onda;
- TANG (ou Sm) ⇒ máxima taxa de crescimento da corrente na frente da onda;
- T₅₀ ⇒ intervalo de tempo entre o ponto definido pelo valor de corrente 2 kA na frente da onda e o ponto na cauda relativo ao valor de 50 % do pico de corrente (I_{P2});
- Carga ⇒ corresponde à integração da onda de corrente;
- Energia por unidade de impedância ⇒ corresponde à energia que seria dissipada pela onda de corrente fluindo por um resistor de 1 Ω, ou seja: ∫[i(t)]²dt. Assim, corresponde a uma definição de energia por unidade de impedância, A²s ou J / Ω.

A forma de onda típica ilustrada na Figura 2-1 é de difícil reprodução em termos experimentais, no entanto em termos analíticos já se consegue reprodução [32,33]. Por este motivo, as seguintes representações matemáticas são utilizadas como aproximações desta forma de onda [22]:

 Forma de onda dupla exponencial ⇒ de fácil reprodução em laboratório por meio de circuito composto por resistores, capacitores e diodos. Muita utilizada em testes de suportabilidade de equipamentos elétricos e, também, em análises computacionais. Apresenta duas principais desvantagens:

> i) Não consegue reproduzir a frente de onda côncava das ondas de corrente associadas às descargas atmosféricas reais;

 ii) Apresenta derivada máxima próxima do tempo zero, diferentemente das ondas de correntes de descargas atmosféricas, que possuem derivada máxima próxima do primeiro pico de corrente [22].

Detalhes adicionais desta forma de onda podem ser encontrados na referência [22].

• Formas de onda do tipo rampa ⇒ podem ser de dois tipos:

i) rampa com tempo de frente (t_f) e tempo de cauda (t_c) finitos (Figura 2-2 a) – denominada rampa triangular;

ii) rampa com t_f finito e a partir daí um degrau (t_c infinito) - Figura 2-2 b – denominada rampa retangular.

Em função da frente de onda côncava representada na Figura 2-1, T_{d30} é menor que T_{d10} . Assumindo, assim, uma postura conservadora, $t_f = T_{d30}$ e por outro lado, $t_c = T_{50}$.



Figura 2-2 - Rampas triangular (a) e retangular (b).

Estas formas de onda do tipo rampa apresentam a mesma desvantagem da dupla exponencial quanto à incapacidade de reprodução da frente côncava. Por outro lado, possui inclinação constante na frente de onda, que pode ser interpretada como conservadora. Em termos de cálculos de desempenho de linhas de transmissão, a forma de onda de corrente representada na Figura 2-2 b é normalmente utilizada, sendo a implementada na versão 1.9 do *Flash* [1,2,22].

 Forma de onda de Heidler ⇒ recentemente, F. Heidler idealizou uma função matemática para a onda de corrente mais próxima da Figura 2-1, conseguindo inclusive superar as desvantagens apresentadas pelas formas de onda dupla exponencial e rampa. Detalhes desta função matemática podem ser encontrados nas referências [4,22,34].

Pelo exposto, percebe-se que os dois principais parâmetros da forma de onda de corrente típica de descargas atmosféricas para estudos de desempenho de linhas de transmissão correspondem ao valor de pico de corrente (I_P) e ao tempo de frente (t_f) [1-3,5-7,9,10,14-17,22]. Por este motivo, a Tabela 2-4 resume os resultados das principais medições, realizadas em diversas partes do mundo, destes dois parâmetros para as primeiras descargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes negativas. Detalhes sobre as medições em causa, bem como os resultados estatísticos completos, são encontrados nas referências [5,8,9-17,22,23]. É importante mencionar que a distribuição de probabilidade cumulativa de todos os parâmetros associados à forma de onda de corrente típica das descargas atmosféricas descendentes negativas (tanto para as primeiras descargas de retorno, quanto para as subsequentes) é estatisticamente fornecida por uma distribuição do tipo log-normal [3,5,8,9-17,22,23]. Assim, os logaritmos neperianos dos parâmetros seguem uma distribuição do tipo gaussiana (ou normal). Os resultados estatísticos oriundos de medição das descargas de retorno subsequentes de descargas descendentes negativas e primeiras descargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes positivas encontram-se reunidas, por exemplo, nas referências [3,8].

No *Flash* (versão 1.9) são utilizados os seguintes parâmetros para a onda de corrente:

- Forma de onda \Rightarrow rampa retangular (Figura 2-2 b);
- Tempo de frente ⇒ 2 μs as sobretensões nas cadeias de isoladores são avaliadas em dois instantes: 2 e 6 μs, conforme discutido nas próximas seções;
- Distribuição de probabilidade cumulativa para o pico de corrente P(I ≥ I_P) ⇒ conforme equação (2-3), ajustada à log-normal na faixa de 5 a 200 kA [3,8,9,10,14-17,45] (CIGRÉ):

$$P(I \ge I_{P}) = \frac{1}{1 + (I_{P}/_{31})^{2.6}}$$
(2-3)

A equação (2-3) é aquela sugerida pela Norma IEEE/1410 de 1997 [46]. A correspondente expressão ajustada para as medições realizadas no Morro do Cachimbo é representada na equação (2-4) [8,45] (CEMIG):

$$P(I \ge I_P) = \frac{1}{1 + (I_P/_{45})^{4,7}}$$
(2-4)

Tabela 2-4 – Estatísticas de medição do valor de pico e tempo de frente das primeirasdescargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes negativas.

		Parâmetro			
Referências	Base de dados	Valor de Pico		Tempo de Frente	
		I _P (kA)	σ _{ln} *	t _f (μs)	σ_{ln}^{*}
[AIEE.1950 - 35]	2.721 medições: elos magnéticos	15 25 13 46 30 36 31,1			
[em torres de linhas de transmissão		0,99	-	-
[POPOLANSKY.1972 - 36]	624 medições na Europa	25	0,89	-	-
[SARGENT.1972 - 37]	Medições no Monte San Salvatore	13	0,74	-	-
[ANDERSON.1975 - 38]	Reavaliação de [35]	46	0,55	-	-
[BERGER 1975 - 12]	101 medições no Monte San	30			
	Salvatore ^{**}		0,53	5,5	0,7
[FRIKSON 1987 - 39]	22 medições na base de um mastro				
	de 60 m de altura na África do Sul	36	0,71	-	-
[ANDERSON.1980 - 13,	Reavaliação de [12]***	31,1	0,48	2,3	0.57
ANDERSON. 1980 - 40]	3 6 3	,	,	,	
[CORTINA. 1980 - 41]	42 medições em torres de TV na	36 0,71 31,1 0,48 33 0,58			
	Itália		0,58	9	0,92
	56 medições no topo de torres de				
[DINIZ.1996 - 42]	linhas de transmissão no Brasil				
	(Minas Gerais)	44,6	0,52	-	-
[CHAI.1997 - 43]	Medições de milhares de				
descargas po	descargas por um SLT	30,9	0,54	-	-
[NARITA.2000 - 44]	36 medições no topo de torres de				
	linhas de transmissão	39,2	0,76	3,6	0,37
	31 medições de descargas				
[SCHROEDER.2001 - 8]	atmosféricas no Morro do				
	Cachimbo, Brasil (Minas Gerais)	45,3	0,39	2,9	0,44

* Desvio padrão logaritmo.

** Os dados de K. Berger são os mais utilizados e investigados pelos pesquisadores ao longo dos anos.

*** A despeito de tal reavaliação, os parâmetros calculados por K. Berger [12] sempre foram bastante utilizados, provavelmente pelo reconhecido cuidado de Berger com as suas medições. Observação: informações detalhadas sobre os resultados de medição resumidos nesta tabela, inclusive com estatísticas de outros parâmetros, podem ser obtidos, por exemplo, nas referências [3,8,11].

2.3 – Incidência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

2.3.1 – Estimativa do número de descargas atmosféricas que atingem uma linha de transmissão

Com o conhecimento da densidade de descargas atmosféricas para o solo de uma determinada região (número de descargas por km² por ano - N_g), bem como dos parâmetros associados à forma de onda da corrente característica da descarga, os pesquisadores se depararam com a seguinte questão: "Como estimar o número de descargas atmosféricas que incidem diretamente¹ em uma linha de transmissão situada na região em causa?". Esta subseção visa mostrar como esta importante questão foi solucionada.

Por meio de estudos empíricos e analíticos verificou-se que o número de descargas atmosféricas que incidem diretamente em uma linha de transmissão depende dos seguintes fatores [2,5-7,9,10,14-17,45]:

- Densidade de descargas atmosféricas para o solo (N_g).
- Características geométricas das linhas de transmissão (altura em relação ao solo e espaçamentos horizontais entre condutores).
- Existência de objetos próximos à linha que constituem blindagens naturais² (tais como árvores, estruturas metálicas, edificações próximas e existência de outras linhas de transmissão).

Assim, considere a linha de transmissão representada na Figura 2-3, onde "A", "B" e "C" correspondem às fases e " P_{R1} " e " P_{R2} " aos cabos para-raios. As três fases possuem a mesma altura (h_F) bem como os dois cabos para-raios (h_{PR}). A distância horizontal entre os dois cabos para-raios é definida por "b". Assume-se que os cabos para-raios, normalmente os condutores mais elevados dos sistemas de transmissão,

¹ É importante mencionar que as descargas atmosféricas indiretas, apesar de sua maior frequência de ocorrência, induzem sobretensões capazes de superar o nível básico de isolamento (NBI) das cadeias de isoladores de redes de distribuição de tensões nominais não superiores a 44 kV. Desta forma, normalmente, seus efeitos são desconsiderados nas análises de desempenho de linhas de transmissão com tensões nominais acima de 69 kV [2,4-6,9,10,14-17,22,45]. Assim, em termos práticos, somente descargas atmosféricas diretas são consideradas.

² Assumindo uma postura conservadora, os cálculos de desempenho de linhas de transmissão, normalmente, desconsideram a existência de blindagens naturais.

exercem uma influência atrativa sobre as descargas atmosféricas que incidem na região onde a linha de transmissão está instalada, formando uma largura denominada "largura lateral de atração equivalente"³ [2,5-7,9,10,14-17,45]. Desta forma, quaisquer descargas atmosféricas que incidam nesta "largura lateral", são atraídas pela linha de transmissão. A Figura 2-4 ilustra esta "largura lateral", designada por "L". De acordo com esta figura, percebe-se que L = b + 2 R_a, onde R_a é denominado "raio de atração equivalente médio" [5,6,9-17,45], cuja definição é descrita a seguir (2-6).







Figura 2-4 – Ilustração da "largura lateral de atração equivalente". L = b + 2 R_a.

Em seguida, determina-se a "área de atração equivalente". Esta área corresponde a um retângulo, cujos lados correspondem a "L" e a 100 km ao longo da

³ Com o desenvolvimento da tecnologia associada às observações da interação de descargas atmosféricas em estruturas terrestres, atualmente, é sabido que o canal precursor de descarga descendente define a macroregião de incidência da descarga, enquanto os canais ascendentes (da estrutura aterrada) definem a microregião de incidência. Este fato caracteriza a influência ativa da estrutura terrestre na definição da região de incidência da descarga atmosférica [8,22,23].

linha [5,6,9,10,14-17,45], conforme esboçado na Figura 2-5 (vista de cima da linha de transmissão considerada na Figura 2-3 e na Figura 2-4).



Figura 2-5 – Ilustração da "área de atração equivalente" = L x 100 km.

Finalmente, a estimativa do número de descargas que atinge a linha de transmissão é calculada pela equação (2-5), que fornece o número de descargas atmosféricas que atinge a linha de transmissão por 100 km de linha por ano:

$$N_{LT} = 0.1N_g \times L = 0.1N_g \times (b + 2R_a)$$
 (2-5)

Na equação (2-5) tem-se que:

- N_{LT} ⇒ número de descargas atmosféricas que atinge a linha de transmissão por 100 km de linha por ano [descargas/ (100 km x ano)];
- o Fator 0,1 ⇒ corresponde a um fator de conversão de unidades, pois Ng é fornecido em [descargas/ (km² x ano)] e L, b e R_a em metros.
- R_a⇒ raio de atração equivalente médio em função da altura média do condutor mais exposto da linha de transmissão e do pico de corrente médio da descarga atmosférica. Diversos trabalhos abordam diferentes procedimentos empíricos e/ou analíticos para sua determinação [5,6,9-17,45] (sua caracterização física é mais detalhada na próxima seção (2.4)). Uma expressão muita utilizada em estudos de desempenho de linhas de transmissão foi proposta por A. J.

Eriksson⁴ [46], que corresponde à adotada na versão 1.9 do *Flash,* representada na equação (2-6).

$$R_a = 14H^{0.6}$$
 (2-6)

Assim, N_{LT} é fornecida pela expressão (2-7).

$$N_{LT} = 0.1N_g \times (b + 28H^{0.6})$$
(2-7)

Nas equações (2-6) e (2-7) tem-se que:

- O H ⇒ corresponde à altura média do condutor mais exposto em relação ao solo e é determinado da seguinte forma [45]:
 - i) Para um terreno com perfil plano equação (2-8):

$$H = H_{PR} - \left(\frac{2}{3}\right)f = H_{PR} - \left(\frac{2}{3}\right)(H_{PR} - H_{PRMV})$$
(2-8)

ii) Para um terreno com perfil ondulado – equação (2-9):

$$H = H_{PR}$$
(2-9)

iii) Para um terreno com perfil montanhoso - equação (2-10):

Para as equações (2-8), (2-9) e (2-10) tem-se que:

- $\circ \quad H_{PR} \,{\Rightarrow}\, corresponde \, a \, altura \, dos \, cabos \, para-raios.$
- $\circ \quad f \Rightarrow \text{corresponde à flecha dos cabos para-raios}$
- \circ H_{PRMV} \Rightarrow indica a altura mínima do cabo para-raios no meio do vão.

É importante mencionar que, caso a linha de transmissão não possua cabos para-raios, H_{PR} nas equações acima deve ser substituído pela altura do condutor mais exposto.

⁴ A. J. Eriksson deduziu esta expressão para o raio de atração equivalente médio, sobre cada lado da linha de transmissão, com base no Modelo de Progressão do Canal Precursor de Descarga Descendente [46-49] e em análises de incidências de descargas atmosféricas observadas em diversas linhas de transmissão em operação [46].

Esta metodologia de cálculo do número de descargas que incidem em linhas de transmissão (N_{LT}) é utilizada, com algumas modificações, na determinação da taxa de *flashover* em linhas com cabos para-raios (seção 2.4). Por outro lado, é também utilizada na íntegra para o levantamento da taxa de *backflashover* (seção 2.5) e para o cálculo da taxa de *flashover* em linhas sem cabos para-raios (seção 2.4).

2.4 – Modelo Eletrogeométrico e Falha de Blindagem

2.4.1 – Considerações Iniciais

Com a estimativa do número total de descargas atmosféricas que incidem diretamente em uma linha de transmissão, por 100 km de linha por ano, N_{LT} , a próxima questão a ser respondida é a seguinte: "do total (N_{LT}), quantas descargas, por 100 km de linha por ano, incidem nos cabos fase, ou seja, quantas conseguem se desviar dos cabos para-raios⁵ e atingir os cabos fase?" Este fenômeno é conhecido por "falha de blindagem", devido ao fato dos cabos para-raios não conseguirem, nestes casos, desempenhar sua principal função, qual seja: blindar (proteger) os cabos fase das linhas de transmissão da incidência das descargas atmosféricas diretas.

Este fenômeno é quantificado, na literatura técnica conhecida, pelo Modelo Eletrogeométrico (MEG) [2,3,5,6,9,10,14-17,22,45], descrito a seguir. Outras modelagens são, também, utilizadas, como por exemplo, mediante o Método de Monte Carlo [18,21] e o Modelo de Propagação do Canal Precursor de Descarga Descendente [47-49]. Todavia, estas modelagens estão fora do escopo desta dissertação de mestrado.

As bases físicas (experimentais, empíricas e analíticas) do MEG foram desenvolvidas por C. F. Wagner, G. D. McCann e G. L. MacLane, cujos resultados foram apresentados em 1941, 1961 e 1963 [50,51,52]. Nestes, os autores determinaram diversas expressões matemáticas sobre incidência de descargas atmosféricas em estruturas, provenientes de medições em modelos de escala reduzida, em função dos seguintes parâmetros: localização dos condutores; polaridade das ondas aplicadas (positiva e negativa); corrente, carga, potencial e

 $^{^5}$ No caso de linhas de transmissão sem cabos para-raios, considera-se que o total de descargas (N_{LT}) provoca falha de blindagem [2,3,5,6,9,10,14-17,22,45].

velocidade dos canais ascendente e descendente; salto final de conexão entre estes canais; velocidade da corrente de retorno etc. No trabalho de 1963 [52], o autor determinou uma expressão para a distância de salto final em função da velocidade de propagação da corrente de retorno. Este trabalho é considerado como uma das primeiras tentativas de se equacionar o fenômeno em questão de forma mais aplicada.

Posteriormente, F. S. Young, E. R. Whitehead e A. J. Eriksson contribuíram de forma decisiva para o aprimoramento dos citados trabalhos [50,51,52] no sentido de obter expressões de aplicação mais imediata no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas [39,46,53-56].

Na referência [53], F. S. Young e outros, com base nos trabalhos de C. F. Wagner e outros [50,51,52], utilizaram o conceito de raio de atração de forma mais objetiva. O modelo desenvolvido é aplicado para descargas descendentes negativas. As seguintes premissas são então assumidas:

- O canal descendente progride em sua trajetória em direção ao solo sem sofrer influência de estruturas terrestres.
- A trajetória do canal descendente é modificada quando sua extremidade atinge uma determinada distância do topo da estrutura, denominada raio de atração.
- A aproximação do canal descendente em relação à estrutura por uma distância igual ou inferior ao raio de atração indica que a estrutura sofrerá a incidência da descarga.
- O canal de conexão ascendente não é considerado de forma explícita.

As expressões do raio de atração, obtidas em [53], são mais complexas, sendo em função do valor de pico da corrente e da velocidade de propagação da corrente de retorno, obtidas dos resultados empíricos de C. F. Wagner. Assim, têm pouca aplicação prática. De qualquer forma, é considerado o primeiro trabalho em que o MEG é explicitamente desenvolvido. A Figura 2-6 ilustra a aplicação do MEG conforme elaborado na referência [53], cuja essência é utilizada em suas diversas versões posteriores. Os seguintes passos devem ser seguidos:

- 1º passo ⇒ determina-se o valor do raio de atração relativo às estruturas passíveis de incidência r₁ é o raio de atração do cabo para-raios; r₂ dos condutores fase e r₃ do solo.
- 2º passo ⇒ arcos são traçados, com centros nos para-raios e condutores fase, adotando-se os raios r₁ e r₂ respectivamente. Traça-se, também, uma reta paralela ao solo e r₃ acima do mesmo (raio de atração do solo).
- 3º passo ⇒ verificação das áreas expostas à incidência de descargas atmosféricas; caso a descarga atmosférica incida no arco "AB" (ou "A´B´") os

condutores fase serão atingidos, correspondendo à falha de blindagem; caso incida em "BB'" os cabos para-raios desempenharão sua função de blindagem e no caso de incidir em "AD" (ou "A'D"), a descarga atingirá o solo.



Figura 2-6 – Ilustração do MEG. Adaptada de [53].

Em 1968 e 1969, E. R. Whitehead e outros proporcionaram importantes contribuições para o desenvolvimento posterior do MEG, principalmente em termos de sua aplicação prática [54,55]. Estas contribuições são decorrentes de calibrações empíricas de dados reais de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas [54,55]. A maior contribuição destes trabalhos refere-se à determinação de uma expressão inovadora e simplificada para o raio de atração (R_a), em função do pico de corrente da descarga atmosférica (I_P) e de parâmetros (A e B) calibrados experimentalmente, conforme equação a (2-11). B é adimensional e A tem unidade de m / kA, quando I_P é em kA; assim R_a tem unidade em metros.

$$R_a = A \times I_P^B$$
(2-11)

É importante destacar as seguintes premissas e características relativas ao calculo de R_a [54,55]:

 As complexas considerações físicas realizadas em [53] foram resumidas em uma expressão simples e de fácil aplicação;

- Os valores de A e B são calibrados com resultados reais de desempenho de linhas, o que evita excessivas considerações sobre a física da descarga atmosférica, como feito na referência [53];
- O MEG é empregado de forma bidimensional⁶, pois do ponto de vista prático (comparação com desempenho de linhas reais) tal aproximação gera bons resultados;
- Possibilidade de consideração da incidência de descargas atmosféricas na linha de transmissão por diferentes ângulos de incidência do canal de descarga, e não apenas incidência vertical, como considerado nos modelos anteriores;
- Com a evolução das linhas de transmissão, com estruturas mais altas e com tensões operativas mais elevadas, tornou-se necessário desenvolver modelos analíticos capazes de relacionar o mecanismo de incidência das descargas atmosféricas com os parâmetros geométricas das linhas, dentro de uma perspectiva de aplicação prática e imediata.

Nos anos de 1978 e 1987, A. J. Eriksson publicou três importantes trabalhos que contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento do MEG [39,46,56]. Nestes trabalhos, ele utilizou dados reais de parâmetros de descargas atmosféricas e aplicação de modelos e algoritmos ao processo de incidência em estruturas. Estes dados foram coletados em uma estação de pesquisas de descargas atmosféricas na África do Sul [39,46,56]. Em decorrência, obteve uma expressão para o raio de atração em função da altura da estrutura (além do pico de corrente), representada na equação (2-12). Esta expressão é considerada no *Flash* (versão 1.9) para a determinação de L e, posteriormente, de N_{LT}, pelo fato de depender diretamente da altura da estrutura.

$$R_a = 0.84 H^{0.6} \times I_P^{0.74}$$

(2-12)

Diversos pesquisadores publicaram vários trabalhos sobre os resultados de calibração dos parâmetros "A" e "B" da equação (2-11). Como comentado, esta calibração decorre de análises empíricas de desempenho real de linhas frente a descargas atmosféricas; desta forma, variam com o nível de tensão da linha de

⁶ No entanto, quando se considera toda a extensão de uma linha, que pode estar sujeita a variações de orografia e proximidade de obstáculos, tais como, árvores, torres, radares, antenas etc., um estudo mais preciso da incidência de descargas atmosféricas iria requerer uma análise tridimensional do modelo eletrogeométrico [57-59].

transmissão. Na Tabela 2-5 estão reunidos os resultados dos principais trabalhos a respeito destas calibrações.

Referência	A (m/kA) e B				
Reference	Cabos fase e para-raios		Solo*		
[ARMSTRONG 1968 - 5/]	6,7 e 0,8		6,7 β e 0,8		
			$(\beta = 0,9)$		
	7,1 e 0,75		7,1 β e 0,75		
[BROWN, 1909 - 55]			$(\beta = 0,9 \text{ ou } 1,0)$		
[GILMAN.1973 - 60,	6,7 e 0,8		67008		
WHITEHEAD.1974 - 61]			0,7 0 0,0		
[DARVENIZA.1975 - 62]**	9,4 e	9,4 e 0,67			
	10 e 0,65		10 β e 0,67		
[EPRI.1982 - 5,			(β = 0,64; 0,8 e 1,0 para		
ANDERSON.1975 - 38]			linhas de UAT, EAT e		
			AT, respectivamente)***		
			8βe0,65		
IGRANT 1985 - 161	8 0	(β = 0,64; 0,8 e 1,0 para			
		linhas de UAT, EAT e			
		AT, respectivamente)			
	Cabos fase****	0,67 H _m ^{0,6} e 0,74			
[ERIKSSON.1987 - 46]	Cabos para-	0.67 H ^{0,6} e 0.74	B = 0		
	raios****				
	1,57 H _m ^{0,45} e 0,69		não há menção sobre		
[RIZK.1990 - 49]			os dados de A e B para		
			o solo		
[ANDERSON.1993 - 17]	10 e 0,65		10 β***** e 0,65		

Tabela 2-5 – Parâmetros "A" e "B" decorrentes de análises empíricas de calibração de desempenhos reais de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

* β representa O fator de correção da distância de atração para o solo

** Largamente utilizada no setor elétrico, pois apresenta boa adequação com resultados reais[25]. *** UAT (Ultra Alta Tensão); EAT (Extra Alta Tensão) e AT (Alta Tensão).

**** H_m : altura média dos cabos fase e H_t : altura da torre. ***** β = 0,36 + 0,168 ln(43 - H_m).

São merecedores de destaque os seguintes aspectos físicos adicionais em relação ao raio crítico de atração equivalente (R_a), grandeza essencial na aplicação do MEG [2,3]:

- Pelo fato de R_a ter comportamento estatístico se, por exemplo, o precursor estiver a distâncias não muito diferentes de dois cabos, o salto final não se dá sempre para o cabo mais próximo, tendo caráter estatístico a probabilidade do salto final se dar para um ou outro dos cabos próximos.
- Se o precursor se encontrar a uma distância da ordem de R_a de um cabo fase que nesse instante tenha carga (devido à tensão normal aplicada à linha) de sinal oposto à carga do precursor, haverá maior probabilidade de salto do precursor para esse cabo, o que, portanto, será mais significativo para linhas de alta tensão, e menos significativo para linhas de média tensão.
- Quando o precursor alcança pontos distantes da ordem de R_a de dois ou mais cabos, podem ocorrer descargas praticamente simultâneas para dois ou mais cabos, ou ainda para um cabo e o solo.
- Correntes de alta intensidade apresentam maior probabilidade de atingir os cabos para-raios e torres, enquanto que as de baixa intensidade, os cabos condutores. De uma maneira geral, descargas de valores de correntes muito elevadas são, na maioria das vezes, desviadas para os cabos para-raios ou para o solo. À medida que a corrente é reduzida, a área de exposição aumenta, surgindo assim região na qual pode ocorrer a falha de blindagem (vide Figura 2-6).

Com o entendimento do MEG, a próxima etapa é aplicá-lo para o levantamento da taxa de falha de blindagem, ou seja, o cálculo do número de descargas que se desviam dos cabos para-raios e atingem os cabos fase. O cálculo em questão é apresentado a seguir com base, principalmente, nas referências [5,9,10,14-17], que correspondem aos trabalhos utilizados na implementação do *Flash*. Sua apresentação é organizada seguindo os passos adotados pelo *Flash* (versão 1.9) e estão contemplados nas subseções a seguir.

2.4.2 – Largura de falha de blindagem

Para o cálculo da largura de falha de blindagem considere a Figura 2-7, adaptada de [5]. Nesta figura r_s corresponde a R_a e é considerado o mesmo, tanto para o cabo fase (ϕ) quanto para o cabo para-raios (G). Por outro lado, é diferente para o solo (β r_s). Na figura é representado, também, o ângulo $\delta = \alpha_s$ definido como "ângulo de proteção (ou de blindagem)". β , fator de correção da distância de atração para o solo, assume, normalmente, a seguinte equação ou valor numérico: $\beta = 0.36 + 0.168 \ln(43 - H_m)$ ou $\beta = 0.55$ para altura média (H_m) maior que 40 m.

A expressão utilizada para $R_a = r_S é a$ fornecida pela equação (2-13):

$$R_a = 10 I_P^{0.65}$$
 (2-13)

Para descargas atmosféricas do tipo "A" (com seu correspondente valor de pico de corrente), que incidem no arco "DP", o cabo para-raios protege o condutor fase. Para descargas do tipo "C", que incidem na linha "QR", a incidência ocorrerá no solo. Por outro lado, para descargas do tipo "B", que incidem no arco "PQ", ocorrerá o fenômeno de falha de blindagem. Desta forma, é calculado o parâmetro X_S , que corresponde à projeção do arco "PQ" no solo. Para $\beta r_s > Y_{\Phi}$ ($Y_{\Phi} = h_{\Phi}$: altura do condutor fase), X_S é dado pela equação (2-14):

$$X_{\rm S} = r_{\rm s} \left(\cos \theta + \, \operatorname{sen}(\alpha_{\rm s} - \, \omega) \right) \tag{2-14}$$





Na equação (2-14), as seguintes grandezas devem ser definidas conforme equações (2-15) a (2-18). Y_G ou h_G corresponde à altura do cabo para-raios e ($X_{\Phi} - X_G$) à distância horizontal entre o cabo fase e o para-raios.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\beta r_{s} - Y_{\phi}}{r_{s}}\right)$$
(2-15)

$$\omega = \arccos\left(\frac{\mathsf{F}}{2\mathsf{r}_{\mathsf{s}}}\right) \tag{2-16}$$

$$F = \sqrt{(X_{\phi} - X_{G})^{2} + (Y_{G} - Y_{\phi})^{2}}$$
(2-17)

$$\delta = \arctan\left(\frac{X_{\phi} - X_{G}}{Y_{G} - Y_{\phi}}\right)$$
(2-18)

Por outro lado, para $\beta r_s < Y_{\Phi}$, X_S é dado pela equação (2-19):

$$X_{\rm S} = r_{\rm s} \left(1 + \, \text{sen}(\alpha_{\rm s} - \, \omega)\right) \tag{2-19}$$

2.4.3 - Blindagem efetiva

Para que não ocorra falha de blindagem é necessário que X_S seja igual a zero. A Figura 2-8 ilustra tal situação. Desta forma, deve-se determinar um novo posicionamento para o cabo para-raios (G). A equação (2-20) corresponde ao novo posicionamento horizontal de G (X_G) para $X_S = 0$, tomando $X_{\Phi} = 0$.

$$X_{\rm G} = \sqrt{r_{\rm s}^2 - (\beta r_{\rm s} - Y_{\emptyset})^2} - \sqrt{r_{\rm s}^2 - (\beta r_{\rm s} - Y_{\rm G})^2}$$
(2-20)



Figura 2-8 – Blindagem Efetiva - X_S reduzido a zero. Adaptada de [5].

Com este novo valor para a posição X_G de "G", um novo ângulo de blindagem deve ser encontrado, denominado ângulo de blindagem efetivo (δ_{BE}). A equação (2-21) fornece a expressão de δ_{BE} .

$$\delta_{\rm BE} = \arctan\left(\frac{X_{\rm G}}{Y_{\rm G}-Y_{\rm \emptyset}}\right) \tag{2-21}$$

2.4.4 – Taxa de falha de blindagem

Quando a linha de transmissão não está projetada com o ângulo de blindagem efetiva, evidentemente, ocorre falha de blindagem. Daí tem que ser calculada a taxa de falha de blindagem. Na ocorrência de falha de blindagem, duas situações podem ocorrer: o isolamento da cadeia de isoladores suporta ou não a sobretensão resultante em seus terminais. Caso suporte, a linha de transmissão continua em operação. Caso contrário, ocorre um arco elétrico nos terminais da cadeia de isoladores e, assim, o condutor fase é conectado diretamente ao solo, via torre de transmissão. Tal situação acarretará o fenômeno conhecido como *flashover* e, assim, um curto-circuito fase-terra (monofásico) será estabelecido e a linha de transmissão será desligada pelos equipamentos de proteção. As cadeias de isoladores da linha de transmissão decorrente da incidência de uma corrente de descarga atmosférica, denominada de "corrente crítica mínima". Acima desta corrente mínima, a sobretensão resultante acarretará o fenômeno de *flashover*. Esta corrente é calculada a partir da tensão crítica que pode provocar *flashover* na cadeia de isoladores, conforme equação (2-22):

$$I_{\min} = \frac{2V_c}{Z_{\phi}}$$
(2-22)

Na equação (2-22) tem-se:

- Z_Φ ⇒ corresponde à impedância de surto do condutor incluindo o efeito corona (Ω);
- I_{min} ⇒ é o mínimo valor da corrente da descarga atmosférica capaz de causar flashover (kA);
- \circ V_C \Rightarrow é a tensão crítica de *flashover* na cadeia de isoladores (kV).
- Fator "2" ⇒ decorre do fato de que quando a descarga atmosférica incide em um condutor, a onda de corrente associada é, naturalmente, dividida por 2,

uma vez que "enxerga" duas impedâncias (do condutor atingido) em paralelo [63-65].

A impedância de surto própria de um cabo condutor, de raio "r" situado a uma altura média "h" do solo, considerando o efeito corona é calculada por meio da equação (2-23):

$$Z_{\phi} = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \ln\left(\frac{2h}{R_{c}}\right)}$$
(2-23)

Em relação à equação (2-23) é importante fazer os seguintes comentários:

Para feixes de condutores, r deve ser substituído por "r_{eq}", que corresponde ao raio equivalente do feixe reduzido a um único condutor e é calculado pela equação (2-24), onde r₁₁ é o raio do subcondutor 1, r_{1n} é a distância do subcondutor 1 a um condutor "n" genérico e "N" é o número de subcondutores.

$$\mathbf{r}_{eq} = \sqrt[N]{\mathbf{r}_{11} \, \mathbf{r}_{12} \, \mathbf{r}_{13...} \, \mathbf{r}_{1n}} \tag{2-24}$$

R_c é o raio equivalente determinado em função do efeito corona, que corresponde a um fenômeno que ocorre nos condutores quando são submetidos a níveis de tensão de elevada intensidade, tendo como principais efeitos: atenuação da propagação das ondas e elevação do efeito capacitivo na linha, que acarreta uma intensificação do acoplamento capacitivo entre condutores [62-65]. Em termos práticos, não afeta o efeito indutivo da linha de transmissão. Quando a intensidade do campo elétrico na superfície do condutor excede o valor da rigidez dielétrica do ar, podem surgir descargas parciais ao redor do condutor. Em condições atmosféricas padronizadas, o campo elétrico crítico de início de corona (E_o), em kV/m, para r_{eq} em centímetros, é dado pela equação (2-25):

$$E_{o} = 2300 \left(1 + \frac{1,22}{r_{eq}^{0,37}} \right)$$
(2-25)

Em estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, sugere-se o valor de 1.500 kV/m para E_0 [9,10,14-17]. Esse valor é utilizado para o cálculo do raio do envelope de corona (R_c), obtido por um processo iterativo com base na equação (2-26):

$$R_{\rm C} \ln \frac{2h}{R_{\rm C}} = \frac{V}{E_{\rm o}}$$
(2-26)

Na equação (2-26), tem-se:

- $h \Rightarrow$ altura média do condutor acima do solo (m);
- o $V \Rightarrow$ tensão aplicada no condutor (kV).

Retornando à equação (2-22), a tensão crítica de flashover (V_c em MV) pode ser determinada de duas formas, a saber:

Por curvas "tensão x tempo" como a representada na Figura 2-9: •



Figura 2-9 – Curva tensão x tempo para flashover das cadeias de isoladores. Adaptada de [5].

Pela equação (2-27):

$$V_{\rm C} = k_1 + \frac{k_2}{t^{0.75}}$$
(2-27)

Tem-se então que:

- $k_1 = 0.4 W;$ 0
- $k_2 = 0,71 W;$ 0
- $W \Rightarrow$ comprimento da cadeia de isoladores (m); Ο
- o $t \Rightarrow$ tempo que a cadeia leva para a disrupção (µs).

Com V_C e Z_{ϕ}, pode-se calcular I_{min} – equação (2-22). De posse do valor da corrente crítica mínima, calcula-se a distância de atração mínima, dada pela equação (2-28):

6)

(2-28)

 R_{amin} = 10 $I_{min}^{0,65}$

Com R_{amin} procede-se ao cálculo do ângulo de blindagem efetiva. Se este ângulo for maior que o ângulo de blindagem da linha a taxa de falha de blindagem é nula. Por outro lado, caso seja menor haverá falha de blindagem e, assim, é necessário calcular a distância de atração máxima (R_{amax} = r_{SMAX}) que pode causar falha de blindagem. R_{amax} pode ser determinada por meio de duas maneiras:

• Pela Figura 2.10.



Figura 2-10 - Gráfico da relação da máxima distância de atração. Adaptada de [5].

Na Figura 2-10, m (inclinação da linha OP) é calculada pela equação (2-29) e β assume, normalmente, a seguinte equação ou valor numérico: $\beta = 0.36 + 0.168 \ln(43 - H_m)$ ou $\beta = 0.55$ para altura média (H_m) maior que 40 m.

$$m = \frac{X_{\phi} - X_G}{Y_G - Y_{\phi}}$$
(2-29)

Pela equação (2-30).

$$R_{amax} = r_{smax} = Y_0 \left(\frac{-B_S - \sqrt{B_S^2 + A_S C_S}}{A_S} \right)$$
(2-30)

Na equação (2-30), tem-se que (vide Figura 2-10):

$$Y_0 = \frac{Y_G + Y_{\phi}}{2}$$
 (2-31)

$$A_{\rm S} = m^2 - m^2 \beta - \beta^2 \tag{2-32}$$

$$B_{\rm S} = \beta({\rm m}^2 + 1) \tag{2-33}$$

$$C_{\rm S} = (m^2 + 1)$$
 (2-34)

De posse da distância de atração máxima, calcula-se a correspondente corrente máxima – equação (2-35):

$$R_{amax} = 10I_{max}^{0.65}$$
 (2-35)

Finalmente, pode-se determinar a taxa de falha de blindagem (N_{FB}) pela equação (2-36) para cada fase:

$$N_{FB} = 0.1 N_g \frac{X_S}{2} (P_{min} - P_{max})$$
 (2-36)

Na equação (2-36), tem-se que:

- o $N_g = 0.04T_d^{1,25}$, equação (2-1)⇒ densidade de descargas atmosféricas [descargas / (km² x ano)] e T_d é o nível ceráunico (dias de trovoadas ouvidas por ano);
- $\circ~~X_S \Rightarrow$ largura de falha de blindagem Figura 2-7 e equações (2-14) e
- o (2-19);
- P_{min} e P_{max} ⇒ probabilidades cumulativas das correntes mínima (I_{min}) e máxima (I_{max}), respectivamente. Ou seja, as probabilidades de serem excedidas equação (2-3).

o N_{FB} ⇒ taxa de falha de blindagem por fase (ou número de falhas de blindagem) por 100 km de linha por ano.

Somando-se a taxa de falha de blindagem para cada fase, tem-se a taxa de falha de blindagem total, dada pela equação (2-37):

$$N_{FBT} = 0.1 \frac{N_g}{2} \sum_{j=1}^{nce} X_s(j) \left[P_{min}(j) - P_{max}(j) \right]$$
(2-37)

Tem-se que:

- $\circ \quad \text{nce} \Rightarrow \text{número de condutores fase expostos.}$
- \circ j \Rightarrow contador.

Para finalizar, é importante mencionar que, caso a linha de transmissão não possua cabos para-raios⁷, N_{FB} é calculado pela equação (2-38):

$$N_{FB} = N_{LT} \times P_{min} \tag{2-38}$$

Na equação (2-38), tem-se que:

N_{LT} = 0,1 x N_g x (b + 28 x H^{0,6}), equação (2-7), onde, neste caso, b é a distância horizontal entre os condutores mais expostos e H é a altura média do condutor mais exposto, equações (2-8) a (2-10). Os outros parâmetros são os mesmos da equação (2-36).

A taxa de falha de blindagem total para uma linha sem cabos para-raios é dada pela equação (2-39):

$$N_{FBT} = 0.1 N_g (b+28 H^{0.6}) \sum_{j=1}^{ncf} P_{min}(j)$$

(2-39)

onde:

 \circ ncf \Rightarrow número de condutores fase.

⁷ Em termos práticos, principalmente em linhas sem cabos para-raios, todas as descargas que incidem nos condutores fase provocam *flashover* na cadeia de isoladores [45].

2.4.5 – Taxa de Flashover

De acordo com a subseção 2.4.4 verifica-se que a taxa de falha de blindagem, N_{FBT} , é determinada com base nas probabilidades cumulativas de ocorrências de I_{min} e I_{max} . Como I_{min} é a mínima intensidade de corrente de descarga atmosférica capaz de causar *flashover*, N_{FBT} na equação (2-36) corresponde, também, à taxa de disrupções ou taxa de *flashover* por 100 km de linha por ano.

2.5 – Backflashover

2.5.1 – Considerações Iniciais

Quando a descarga atmosférica incide no topo da torre ou nos cabos para-raios ao longo dos vãos⁸, o transitório eletromagnético estabelecido no sistema atingido pode provocar um arco elétrico na cadeia de isoladores (ou no ar no ponto atingido) e, assim, desligar a linha em questão. Este fenômeno é conhecido como *backflashover* (pois o arco é formado da torre para a fase). Para a determinação das sobretensões estabelecidas nas cadeias de isoladores, fruto do transitório eletromagnético em questão, é necessário conhecer os seguintes elementos:

- Interação entre canal de descarga e linha de transmissão;
- Fonte de corrente representativa da descarga atmosférica;
- Resposta eletromagnética transitória dos cabos para-raios, torres de transmissão, aterramentos elétricos, cadeias de isoladores etc. face ao surto de corrente injetado;
- Acoplamento eletromagnético entre os elementos envolvidos no processo.

Com a adequada caracterização física dos elementos descrita acima, é possível calcular o transitório eletromagnético em causa e, assim, determinar os níveis de sobretensão nos pontos de interesse. Este cálculo pode ser realizado com base em

⁸ Em termos práticos, a grande maioria das descargas que interage com linhas de transmissão protegidas por cabos para-raios, adequadamente posicionados, incidirá sobre estes cabos ou sobre a torre (estrutura). A linha é considerada adequadamente protegida pelos cabos para-raios quando o ângulo de blindagem (δ na Figura 2-7) for inferior a 30º [5,6,45].

programas computacionais da série EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) /ATP (*Alternative Transients Program*) [66-68] ou outros que apresentam modelos eletromagnéticos mais refinados, como por exemplo, [1,69-73,74]. Em linhas gerais, o transitório eletromagnético pode ser descrito, de maneira bastante objetiva, da seguinte forma [75]:

Para descargas atmosféricas que incidem no topo da torre \Rightarrow a • correspondente onda de corrente se divide em três parcelas: duas viajam pelos cabos para-raios e outra propaga pela torre em direção ao aterramento. Em função das impedâncias de surto dos cabos para-raios e da torre, correspondentes ondas de tensão também propagam pelo sistema. A tensão transitória estabelecida na cadeia de isoladores é relativamente proporcional à estabelecida no topo da torre. Desta forma, esta análise considera a tensão no topo da torre. No instante da incidência (tomado como referência de tempo - t = 0 segundo), a tensão no topo da torre acompanha a evolução temporal da respectiva onda de corrente. A onda de tensão que desce pela torre em direção ao aterramento, ao chegar à interface torre-aterramento, após um tempo τ_p (tempo de propagação na torre), sofre os fenômenos de reflexão e transmissão. A parcela refletida é negativa, pois a impedância impulsiva [76-80] do aterramento é, normalmente, menor que a impedância de surto da torre. Após 2t_o, esta onda refletida atinge o topo da torre e, assim, ao se sobrepor à onda incidente contribui para diminuir a tensão total no topo da torre. Neste ponto, é importante destacar a importância do projeto do sistema de aterramento, pois quanto menor a impedância impulsiva do aterramento, maior será a diminuição da tensão no topo da torre e, assim, maior a diminuição da tensão na cadeia de isoladores. Outro aspecto a se levar em consideração é a relação entre o tempo de frente (t_f) do sinal de corrente injetado no topo da torre e o tempo de propagação na torre ($\tau_{\rm p}$). Para $t_f > 2\tau_p$, a diminuição em questão é sensível; por outro lado, para $t_f < 2\tau_p$ quando a onda de tensão refletida atingir o topo da torre, a tensão neste ponto já atingiu sua amplitude máxima (valor de pico) e, assim, a diminuição não é efetiva. É importante ressaltar a relação de τ_p com a altura da torre (h_T), pois h_T = v_p x τ_p , onde v_p é aproximadamente 80 % da velocidade da luz no vácuo [5,6,9,10,14-17]. As ondas de tensão que se propagaram pelo vão da linha de transmissão (ao longo dos cabos para-raios) sofrem reflexões nas torres adjacentes (interfaces cabo

para-raios/torre adjacente/cabo para-raios) e após $2\tau_v$ (onde τ_v é o tempo de propagação no vão) atingem o topo da torre em estudo. Também contribuem para diminuição da tensão total, pois o coeficiente de reflexão é negativo na interface cabo para-raios/torre adjacente/cabo para-raios. Da mesma forma, é importante analisar a relação entre t_f e $2\tau_v$. Normalmente t_f < $2\tau_v$, exceto para vãos muitos curtos.

Para descargas atmosféricas que incidem no vão \Rightarrow a correspondente onda • de corrente se divide em duas parcelas iguais que se propagam em sentidos opostos em direção às torres mais próximas. Ao atingirem as interfaces cabo para-raios - torre/cabos para-raios sofrem os fenômenos de reflexão e transmissão. A parcela transmitida é dividida em duas: uma propaga pelo cabo para-raios e outra desce pela torre em direção ao aterramento. A partir daí, a análise é bastante similar à anterior, quando da incidência da descarga diretamente no topo da torre. Um aspecto adicional importante refere-se à elevada sobretensão estabelecida no ponto de injeção de corrente no vão, que pode inclusive provocar disrupção (flashover) do ar e, assim, um curto-circuito do cabo para-raios para a fase mais próxima [81]. Esta importante questão é, via de regra, desconsiderada nos cálculos de desempenho de linhas de transmissão. Trabalhos recentes mostram que tais eventos não devem ser desprezados [81], muito embora esta questão esteja fora do escopo desta dissertação.

Adicionalmente, nas avaliações dos níveis de sobretensão, dois pontos importantes devem ser considerados:

- Acoplamento eletromagnético entre os elementos condutores existentes (cabos fase, para-raios, torres e aterramentos elétricos);
- A tensão de regime permanente (60 Hz) no instante de incidência da descarga atmosférica.

Com o entendimento do transitório eletromagnético e de sua influência nas sobretensões no topo da torre e na cadeia de isoladores, a próxima etapa é aplicá-lo para o levantamento da taxa de falha de *backflashover*, ou seja, o cálculo do número de descargas que provocam disrupção nas cadeias de isoladores ao incidirem nos topos das torres ou nos cabos para-raios (ao longo do vão). O cálculo em questão é apresentado a seguir com base, principalmente, nas referências [5,9,10,14-17], que correspondem aos trabalhos utilizados na implementação do *Flash*, sendo que a

apresentação é organizada segundo os passos definidos pelo *Flash* (versão 1.9), que são descritos nas próximas subseções.

2.5.2 – Onda de corrente representativa da descarga atmosférica

Como comentado na subseção 2.2.3, a forma de onda de corrente é modelada como aquela representada na Figura 2-2 b, com t_f = 2 μ s. Para o cálculo da taxa de *backflashover* dois instantes de tempo são considerados (também como comentado na subseção 2.2.3), que correspondem a: 2 e 6 μ s. Assim, a forma de onda de corrente assumida para a descarga atmosférica e principais tempos representativos é ilustrada na Figura 2-11, podendo-se observar que o valor de pico considerado é de 1 p.u. (1 kA).



Figura 2-11 – Forma de onda, tipo rampa, assumida para a corrente de descarga. Adaptada de [5].

Os instantes 2 e 6 µs são considerados críticos porque o primeiro representa resultados estatísticos de medição realizados em diversas regiões (principalmente, aquelas realizadas por K. Berger [12,13] e o segundo representa o tempo máximo das reflexões das torres adjacentes [5].

2.5.3 – Número de descargas atmosféricas que atinge as torres e os cabos para-raios

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. Desta forma, o número de descargas que atingem a torre de uma linha (N_T) é fornecido pela equação (2-40):

$$N_{\rm T} = 0.6 \, (N_{\rm LT})$$
 (2-40)

Na equação (2-40), N_T corresponde ao número de descargas atmosféricas que incidem na torre por 100 km de linha por ano; N_{LT} (número de descargas que atingem a linha de trasmissão) é determinada pela equação (2-5).

2.5.4 – Modelagens eletromagnéticas dos comportamentos impulsivos das torres, cabos para-raios, cabos fase e aterramento elétrico

As torres e cabos (fase e para-raios) são modelados por meio de linhas de transmissão sem perdas. Assim, basicamente, são representados por dois parâmetros: tempo de trânsito (relação entre comprimento ou altura e velocidade de propagação) e impedância de surto. A seguir são apresentados os detalhes de cada um dos elementos:

a) Torre ⇒ O tempo de propagação da onda (τ_p) é calculado pela divisão da altura da torre (h_T) por 70 % a 90 % da velocidade de propagação da luz no vácuo (300 m/µs). Este retardo no tempo é considerado em função do sistema de treliça utilizado na construção das estruturas que compõem a torre. A impedância de surto da torre (Z_T) varia com a altura (h_T), pois o modo de propagação do campo eletromagnético não é do tipo Transverso-Eletromagnético (TEM). Evidentemente, depende de cada geometria e são obtidos mediante aplicação direta das Equações de Maxwell. São consideradas quatro diferentes classes de torre, conforme ilustrado da Figura 2-12 à Figura 2-15, onde são apresentadas também as expressões matemáticas de suas respectivas impedâncias de surto. As grandezas geométricas de tais expressões são definidas nas próprias figuras. Em termos práticos, os valores da impedância de surto das torres situam-se na faixa de 100 Ω a 300 Ω [82].



Figura 2-12 - Torre de transmissão cônica - classe 1. Adaptada de [82].



Figura 2-13 - Torre de transmissão forma-H - classe 2. Adaptada de [82].



Figura 2-14 - Torre de transmissão cilíndrica - classe 3. Adaptada de [82].



Figura 2-15 - Torre de transmissão Waist - classe 4. Adaptada de [82].

b) Cabos para-raios ⇒ O tempo de propagação (τ_v) é calculado pela divisão do comprimento do cabo por 90 % a 100% da velocidade de propagação da luz no vácuo (300 m/μs). Normalmente, considera-se 90 % de seu valor, com a intenção de computar o atraso na propagação devido ao efeito corona. A impedância de surto dos cabos não varia com o comprimento, pois neste caso pode ser considerado o modo de propagação do campo eletromagnético do tipo transverso-eletromagnético (TEM). São consideradas as impedâncias próprias e mútuas.

• Impedância de surto própria \Rightarrow a impedância de surto própria de um cabo para-raios (Z_{nn} dada em Ω) é calculada pela equação (2-41)

$$Z_{nn} = 60 \ln \left(\frac{4 h_n}{D_n}\right) \tag{2-41}$$

- o $h_n \Rightarrow$ a altura média do cabo para-raios (em m);
- D_n ⇒ seu diâmetro (em m). No cálculo do diâmetro o efeito corona deve ser computado, conforme equação (2-26).
- Impedância de surto mútua ⇒ a impedância de surto mútua entre cabos para-raios (Z_{nm} dada em Ω) é calculada pela equação (2-42):

$$Z_{\rm mn} = 60 \ln \left(\frac{a_{\rm mn}}{b_{\rm mn}}\right) \tag{2-42}$$

- \circ a_{mn} \Rightarrow distância do condutor "m" à imagem de "n" no solo;
- $\circ \quad b_{mn} \Rightarrow distancia \ horizontal \ entre \ o \ condutor \ "m" \ e \ "n".$
- Impedância de surto equivalente ⇒ a impedância equivalente corresponde a uma combinação entre as impedâncias própria e mútua; é determinada pela equação (2-43), no caso da existência de dois cabos para-raios; Z₁₁ é a impedância própria do cabo para-raios e Z₁₂ é impedância mútua entre os cabos para-raios. No caso da existência de somente um cabo para-raios, a impedância equivalente corresponde à impedância própria.

$$Z_{\rm S} = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{2} \tag{2-43}$$

c) Acoplamento entre cabos para-raios e cabos fase ⇒ a parcela de corrente da descarga atmosférica que circula nos cabos para-raios provoca uma indução de tensão em cada condutor fase, denominada tensão de acoplamento. Este acoplamento é predominantemente capacitivo. A razão entre essa tensão induzida e a tensão no topo da torre, determina o fator de acoplamento. Esse fator é de extrema importância, já que a tensão induzida nos condutores reduz a solicitação de surto de tensão na cadeia de isoladores. Tal fator é determinado em geral pela equação (2-44):

$$k_n = \frac{Z_{n1} + Z_{n2}}{Z_{11} + Z_{12}}$$
(2-44)

Z_{n1} e Z_{n2} ⇒ impedâncias mútuas entre cada condutor fase "n" e um dos cabos para-raios (1 ou 2).

No caso da existência de somente um cabo para-raios o fator de acoplamento é fornecido pela equação (2-45):

$$k_n = \frac{Z_{1n}}{Z_{11}}$$
 (2-45)

d) Aterramento ⇒ o aterramento é modelado por meio de suas resistências, que podem ser calculados por diversas fórmulas aproximadas [5,78,82,83,84] ou, principalmente, por meio de medições [78,83,84]. Quando calculadas, é necessária a informação da resistividade do solo local (obtida por medição [83,84]), além da geometria do aterramento elétrico. Normalmente, em termos práticos, são informadas pelas concessionárias de energia as distribuições estatísticas das resistências de aterramento típicas das torres das diversas linhas de transmissão sob análise [85]. A Figura 2-16 e a Figura 2-17 ilustram duas distribuições típicas de resistências de aterramento de torres de linhas de transmissão de 230 kV da CEMIG.



Figura 2-16 – Distribuição estatística de resistência de aterramentos elétricos de torres de linhas de transmissão de 230 kV da CEMIG . (mínimo: 10 Ω e máximo: 60 Ω)



Figura 2-17 – Distribuição estatística de resistência de aterramentos elétricos de torres de linhas de transmissão de 230 kV da CEMIG. (mínimo: \approx 15 Ω e máximo: \approx 225 Ω)

2.5.5 – Transitório eletromagnético e sobretensão na cadeia de isoladores

Como comentado na introdução da subseção 2.5.1, o transitório eletromagnético em linhas de transmissão pode ser calculado com o auxílio, por exemplo, do ATP *(Alternative Transients Program).* Contudo, o *Flash* possui uma rotina própria para determinar, de forma aproximada, o transitório e a sobretensão no ponto de interesse (cadeia de isolador). Desta forma, os principais passos desta rotina são comentados a seguir:

 a) Circuito equivalente ⇒ a Figura 2-18 ilustra o circuito equivalente para cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores e verificação da ocorrência (ou não) de backflashover.





Os parâmetros da Figura 2-18 representam:

- $Z_T \Rightarrow$ impedância de surto da torre (vide Figura 2-12 a Figura 2-15).
- V_T ⇒ tensão no topo da torre;
- V_{PN} ⇒ tensão do braço (ou míssula) da torre;
- V_{SN} ⇒ tensão na cadeia de isoladores;
- $V_{QN} \Rightarrow$ tensão de fase ou do condutor;
- $R \Rightarrow$ Resistência de aterramento⁹ (conforme Figura 2-16 e Figura 2-17);
- $Z_{\rm S} \Rightarrow$ impedância dos cabos para-raios conforme equação (2-43);
- τ_T (=τ_p) e τ_{pn} ⇒ tempos de tráfego da onda do topo da torre ao solo e do topo da torre ao braço da mesma, respectivamente representados pelas equações (2-46) e (2-47) onde c é a velocidade da luz no vácuo (300 m / μs), h_T é a altura da torre e h_{fase} é a altura do condutor fase. O tempo de tráfego do surto que viaja nos vãos é dado pela equação (2-48).

⁹ Em muitas situações, denominada "resistência de pé de torre" [5,9,10,14-17].

$$\tau_{\rm T} = \frac{{\rm h}_{\rm T}}{0.85 \,\rm c} \tag{2-46}$$

$$\tau_{pn} = \frac{(h_{T} - h_{fase})}{0.85 c}$$
(2-47)

$$\tau_{\rm v} = \frac{\text{comprimento do vão médio}}{0.9 \text{ c}}$$
(2-48)

Na Figura 2-18 estão representadas duas torres para demonstrar o efeito da torre adjacente no transitório estabelecido na torre que sofre a incidência da descarga e as impedâncias capacitivas representadas na Figura 2.18 caracterizam o fator de acoplamento entre os condutores e os cabos para-raios, como representado nas equações (2-44) e (2-45).

b) Cálculo das sobretensões nos pontos de interesse ⇒ com o auxílio do circuito equivalente representado na Figura 2-18 e mediante a utilização do Diagrama de Lattice [63-66] é possível calcular as sobretensões transitórias em locais de interesse prático. A equação (2-49) fornece a sobretensão no topo da torre [5]:

$$V_{T}(t) = Z_{I}I(t) - Z_{w} \sum_{n=1}^{N} \left[I(t - 2n\tau_{T})\Psi^{n-1} \right]$$
(2-49)

Tem-se então:

- \circ V_T(t) \Rightarrow tensão no topo da torre num tempo t (µs) qualquer em (kV);
- I(t) ⇒ corrente de descarga (kA) entrando no circuito equivalente (Figura 2-18) no mesmo tempo t;
- O Z_I (Ω) ⇒ impedância intrínseca do circuito "vista" pela corrente de descarga no instante que é injetada no mesmo, fornecida pela equação (2-50);
- o $Z_w \Rightarrow$ impedância de onda, conforme equação (2-51);
- I(t 2nτ_T) ⇒ corrente que entra no circuito equivalente num tempo anterior a t, t - 2nτ_T, onde "n" é um número inteiro, chamado de número de onda;
- · Ψ ⇒ constante de amortecimento que reduz sucessivamente a contribuição das reflexões, representa na equação (2-52);
- N ⇒ maior valor que o número de onda, "n", pode atingir número de reflexões [5].
$$Z_{I} = \frac{Z_{S}Z_{T}}{Z_{S} + 2Z_{T}}$$
(2-50)

$$Z_{W} = \left[\frac{2Z_{S}^{2} - Z_{S}}{(Z_{S} + 2Z_{T})^{2}}\right] \left[\frac{Z_{T} - R}{Z_{T} + R}\right]$$
(2-51)

$$\Psi = \left(\frac{2Z_{T} - Z_{S}}{2Z_{T} + Z_{S}}\right) \left(\frac{Z_{T} - R}{Z_{T} + R}\right)$$
(2-52)

A sobretensão na base da torre (V_R) em um determinado tempo t + τ_T é dada pela equação (2-53) [5].

$$V_{R}(t + \tau_{T}) = \frac{2R}{Z_{T} + R} Z_{I} \sum_{n=0}^{N} [I(t - 2n\tau_{T})\Psi^{n}]$$
(2-53)

A sobretensão no braço da torre (onde se localizam as cadeias de isoladores), V_{PN}, em um determinado tempo t + τ_{pn} é dada pela equação (2-54) [5]. Observe que esta equação é decorrente de uma interpolação entre as sobretensões no topo da torre e na base da mesma [5].

$$V_{PN}(t + \tau_{pn}) = V_{R}(t + \tau_{T}) + \frac{h_{T} - Y_{n}}{h_{T}} [V_{T}(t) - V_{R}(t + \tau_{T})]$$
(2-54)

Tem-se que:

o $Y_n \Rightarrow$ distância do topo da torre ao seu braço (em m).

Finalmente, a sobretensão na cadeia de isoladores, V_{SN} , em um determinado tempo t + τ_{pn} é calculada pela equação (2-55) [5].

$$V_{SN}(t + \tau_{pn}) = V_{PN}(t + \tau_{pn}) - k_n V_T(t + \tau_{pn})$$
(2-55)

Com as expressões (2-49), (2-53), (2-54) e (2-55) pode-se calcular as respectivas sobretensões nos tempos críticos (2 e 6 μ s). Em seguida, devem ser incorporadas as contribuições nas sobretensões decorrentes das reflexões nas torres adjacentes. Este cálculo é similar ao determinado acima e somente deve ser considerado quando t_f > 2 τ_v [5]. O efeito das reflexões das torres adjacentes promove uma diminuição da tensão no topo da torre, dependendo do comprimento do vão e do tempo de frente, t_f [1].

2.5.6 – Tensões disruptivas nas cadeias de isoladores nos tempos críticos

As equações (2-56) e (2-57) fornecem as tensões disruptivas das cadeias de isoladores nos tempos críticos (2 e 6 μ s) [5], sendo oriundas da equação (2-27):

$$(V_1)_2 = 820W$$
 (2-56)

$$(V_1)_6 = 585W$$
 (2-57)

Tem-se, então, que:

- o $(V_I)_2 e (V_I)_6 \Rightarrow$ tensões disruptivas nos tempos 2 e 6 µs, respectivamente;
- \circ W \Rightarrow comprimento das cadeias de isoladores.

2.5.7 – Correntes críticas necessárias para provocar disrupção nas cadeias de isoladores

Com o cálculo das tensões disruptivas críticas da cadeia de isoladores, equações (2-56) e (2-57), e da tensão na cadeia de isoladores, conforme equação (2-54) é possível calcular as correntes críticas, I_{cn} , nos tempos críticos (2 e 6 µs), denominadas (I_{cn})₂ e (I_{cn})₆ respectivamente, representados pelas equações (2-58) e (2-59):

$$(I_{cn})_2 = \frac{820W}{(V_{SN})_2}$$
 (2-58)

$$(I_{cn})_6 = \frac{585W}{(V_{SN})_6}$$
(2-59)

Assim, tem-se que:

 \circ (V_{SN})₂ e (V_{SN})₆ ⇒ tensões no braço da torre nos tempos 2 e 6 μs, respectivamente, calculados a partir da equação (2-55).

É importante esclarecer que em 2 μ s uma corrente de 1 p.u. (1 kA), vide Figura 2-11, produz uma tensão de (V_{SN})₂ p.u. (kV). Então, a corrente necessária para produzir (V₁)₂, equação (2-56), deve ser aquela representada na equação (2-58). Raciocínio similar é válido para o entendimento da equação (2-59). Em seguida, determina-se a menor corrente crítica para cada isolador, $(I_{cn})_2$ ou $(I_{cn})_6$, e a respectiva tensão disruptiva.

2.5.8 – Efeito da tensão em regime permanente

Até este momento não houve consideração da tensão de regime permanente senoidal (60 Hz) na determinação da corrente crítica que causa disrupção nas cadeias de isoladores de cada fase da linha de trasnmissão. Esta tensão deve ser contabilizada nos cálculos, pois ao oscilar na frequência industrial, pode somar ou subtrair à sobretensão estabelecida na cadeia de isoladores, alterando, deste modo, a magnitude da corrente requerida para causar disrupção na cadeia de isoladores [5]. Desta forma, a nova corrente crítica capaz de causar *a* disrupção em alguma fase, com a tensão à frequência industrial superposta (I[´]_{cn}) é calculada pela equação (2-60) [5].

$$\dot{I}_{cn} = \left[\frac{V_{ln} - V_{on} \operatorname{sen}(\theta_n - \alpha_n)}{V_{ln}}\right] I_{cn}$$
(2-60)

Os parâmetros da equação (2-60) são:

- \circ V_{on} \Rightarrow tensão de pico fase-terra;
- \circ $\theta_n \Rightarrow$ ângulo de tensão instantâneo;
- $\circ \quad \alpha_n \Rightarrow \text{ angulo de fase da fase "n" (0°, +120° ou -120°);}$
- $\circ~I_{cn} \Rightarrow$ corrente crítica sem a consideração da tensão de regime permanente senoidal;
- \circ V_{In} \Rightarrow tensão disruptiva no isolador no tempo de I_{cn};
- l´_{cn} corresponde à corrente crítica necessária para causar uma disrupção sobre a fase "n" com a consideração da tensão de regime permanente.

Assim, para os tempos de 2 μ s e 6 μ s a equação (2-60) assume as formas, respectivamente, das equações (2-61) e (2-62):

$$(\dot{I}_{cn})_{2} = \left[\frac{(V_{ln})_{2} - V_{on} \operatorname{sen}(\theta_{n} - \alpha_{n})}{(V_{ln})_{2}}\right] (I_{cn})_{2}$$

$$(\dot{I}_{cn})_{6} = \left[\frac{(V_{ln})_{6} - V_{on} \operatorname{sen}(\theta_{n} - \alpha_{n})}{(V_{ln})_{6}}\right] (I_{cn})_{6}$$
(2-61)
(2-62)

Em seguida, determina-se a fase "n" da linha de transmissão que precisa de uma menor intensidade de corrente para romper o isolamento de sua cadeia de isoladores, ou seja, determina-se a cadeia de isoladores que tem a maior chance de sofrer a disrupção e sua respectiva fase.

O valor médio de l'_{cn} para cada fase durante o tempo em que ela é dominante é computado pela equação (2-63) [5].

$$\overline{I}_{cn} = I_{cn} \left\{ 1 + \frac{V_{on}}{V_{ln}} \left[\frac{\cos(\theta_2 - \alpha_n) - \cos(\theta_1 - \alpha_n)}{\theta_2 - \theta_1} \right] \right\}$$
(2-63)

Sendo:

 \circ θ₁ e θ₂ ⇒ ângulos limites de domínio de cada fase "n" durante um ciclo completo (360°) [5].

A Figura 2-19 auxilia no entendimento do tempo de domínio de cada fase, ou seja, a oscilação de l'_{cn} necessária para causar disrupção em uma fase "n".



Figura 2-19 – Oscilação de l'_{cn} necessária para causar disrupção em uma fase "n". Adaptada de [5].

Posteriormente, é necessário considerar o percentual em que determinada fase é dominante em cada ciclo (360°). Isto é levantado por meio da função que define a tensão instantânea à frequência industrial para cada fase até o limite de 360°, a fim de estabelecer a taxa *de backflashover* para cada fase (pois a probabilidade de ocorrer a disrupção em uma fase é proporcional ao tempo em que ela dominou). Este percentual é determinado para cada fase e é expresso pela equação (2-64), dado por:

$$P_{\rm DF} = \frac{P_{\rm F}}{360^{\circ}} \times 100$$
(2-64)

Sendo:

- $P_{DF} \Rightarrow$ percentual de domínio de uma determinada fase em um ciclo (360°);
- $P_F \Rightarrow$ ângulo total de domínio da fase em questão no ciclo (°).

Finalmente, com o valor da corrente média de cada fase "n" durante o intervalo total que a fase em causa domina em um ciclo (360º), conforme a equação (2-63), calcula-se sua probabilidade cumulativa com base na equação (2-3). A equação (2-65) mostra o cálculo em questão.

$$P\left(I \ge \overline{I_{cn}}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\overline{I_{cn}}}{31}\right)^{2,6}}$$
(2-65)

2.5.9 – Taxa de backflashover

A partir das equações (2-40), (2-64) e (2-65) pode-se, enfim, calcular a taxa de *backflashover* (N_{BF}), que corresponde à soma das taxas para cada fase "n". A equação (2-66) mostra o cálculo de N_{BF} (número de desligamentos por *backflashover* por 100 km de linha por ano), representada a seguir:

$$N_{BF} = \frac{N_{T}}{100} \sum_{n=1}^{numfase} P_{DF}(n) P \left[I \ge \overline{I_{cn}}(n) \right]$$
(2-66)

tem-se que:

- o "numfase" \Rightarrow número de fases da linha de transmissão.
- \circ N_T \Rightarrow número de descargas que atingem a torre.

A divisão por "100" na equação (2-66) é para transformar $P_{DF}(n)$ de porcentagem para p.u.

A equação (2-66) é aplicada para cada valor de resistência de aterramento. No entanto, como representado na Figura 2-16 e na Figura 2-17, as resistências de aterramento são caracterizadas por seus histogramas. Desta forma, para calcular a taxa de *backflashover* total (N_{BFT}) deve-se multiplicar N_{BF} pela resistência de aterramento e somar todos os resultados, conforme equação (2-67):

$$N_{BFT} = \sum_{k=1}^{numresist} N_{BF}(k) FO[R(k)]$$
(2-67)

sendo:

- o "numresist" ⇒ número total de resistências de aterramento (normalmente igual a 10).
- FO[R(k)] ⇒ frequência de ocorrência de cada resistência de aterramento obtida por meio de normalização dos histogramas de resistência de pé de torre.

2.6 – Taxa Total (Flashover + Backflashover)

A taxa de desligamento total da linha de transmissão (N_{DT}), por 100 km de linha por ano, que traduz o desempenho da linha em questão frente às descargas atmosféricas, é simplesmente a soma das taxas de *flashover* (N_{FBT} ,) equação (2-36), e de *backflashove*r total (N_{BFT}), equação (2-67), representada na equação (2-68).

 $N_{DT} = N_{FBT} + N_{BFT}$

(2-68)

2.7 – Análise Crítica do Flash

Após um estudo dos principais aspectos físicos envolvidos nos cálculos de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e,

primordialmente, nas aproximações realizadas no *Flash* para tais cálculos, julga-se importante apresentar uma série de observações de tais aproximações¹⁰.

2.7.1 – Quanto aos parâmetros de descargas atmosféricas

- a) Utilização de N_g, T_d, T_h e suas relações ⇒ dada a natureza de valor médio de tais grandezas, deve ser preservado o entendimento de que, para áreas interiores à região em que tais parâmetros são definidos, os mesmos podem variar de forma significativa. Por exemplo, no caso brasileiro N_g é próximo de 3 descargas/km²/ano; contudo, assume valores de 4, 1 e 5, respectivamente, nos estados de Minas Gerais, Bahia e Pará [22]. O processo se intensifica quando escalas menores e condições de relevo acidentado são consideradas [22]. Estudos recentes têm mostrado que o uso de dados dos SLT´s podem auxiliar no aumento da precisão das taxas de desempenho de linhas de transmissão [26,27,86,87].
- b) Onda de corrente representativa da descarga atmosférica ⇒ estudos recentes, baseados em modelagens eletromagnéticas fisicamente mais consistentes, têm indicado que o formato côncavo da frente de onda da corrente (Figura 2-1), bem como seus principais parâmetros (valor de pico, tempo de frente e inclinação na frente de onda) apresenta influência significativa nas sobretensões estabelecidas no topo da torre e, consequentemente, na cadeia de isoladores [1,2,11,69-73,88,89].
- c) Distribuição de probabilidade cumulativa ⇒ a equação (2-3) corresponde a uma aproximação da função log-normal que caracteriza tal distribuição de forma matematicamente mais consistente. Uma avaliação quantitativa de tal aproximação, nos cálculos de desempenho, é interessante. Não foi encontrada referência na literatura que aborde especificamente esta questão. A própria representação pela função log-normal é questionada por alguns pesquisadores, que consideram a distribuição de Weibull mais adequada.

¹⁰ Está fora do escopo desta dissertação apresentar um estudo quantitativo sobre a influência de cada item presente nesta análise crítica no desempenho de linhas de transmissão. Tais observações objetivam, fundamentalmente, subsidiar pesquisas futuras no tema, bem como deixar claro as principais limitações presentes no *Flash*.

2.7.2 – Quanto ao canal de descarga atmosférica e sua interação com a linha de transmissão

- a) Canal de descarga ⇒ modelado como uma fonte de corrente ideal injetada no ponto de conexão com a linha. Desta forma, desconsidera-se que os pontos de conexão ocorrem acima da linha de transmissão após o encontro dos canais ascendentes e descendentes. Algumas pesquisas ilustram que a desconsideração do canal ascendente pode gerar subestimativas dos níveis de corrente injetados nos sistemas atingidos pelas descargas atmosféricas [8,23,90].
- b) Ângulo de incidência ⇒ considera-se que somente descargas atmosféricas verticais incidem na linha de transmissão. Tal situação é bastante questionável em termos físicos, pois no caso de dois condutores (1 e 2) situados a diferentes alturas (h₁ e h₂), mas com espaçamento horizontal nulo entre ambos, as descargas somente atingiriam o condutor de altura maior (1), conforme ilustrado na Figura 2-20. Assim, o condutor inferior (2) jamais seria atingido pela descarga, o que se constitui em uma inverdade prática.

Em 1968, H. R. Armstrong e E. R. Whitehead propuseram uma correlação trigonométrica para a densidade de probabilidade de ocorrência $p_{\theta}(\theta)$ de um ângulo de inclinação θ antes do salto final (conexão dos canais ascendente e descendente) e um plano perpendicular em relação à superfície do solo [54]. A Figura 2-21 mostra a formulação para a distribuição de probabilidade cumulativa $P_{\theta}(\theta \ge \theta_{o})$ e seu resultado gráfico. Apesar do resultado gráfico apresentado na Figura 2-21 ilustrar uma grande tendência de descargas próximas da direção vertical ($\theta = 0^{\circ}$), pode-se demonstrar que a suposição de descargas verticais impõe uma redução na área de exposição dos cabos e, portanto, reduz a possibilidade de um cabo ser atingido [3]. Na literatura técnica consultada, verifica-se que desde a proposição de [54] em 1968 poucos trabalhos incluem os resultados ilustrados na Figura 2-21 nas análises de desempenho de linhas. A maioria dos trabalhos que desconsidera esta questão justifica a complexidade do emprego de, somente, descargas verticais tanto por questões associadas ao mecanismo da progressão da descarga, quanto pelas incertezas associadas ao cálculo da área de exposição da linha em função da variação da orografia do terreno, do efeito das flechas dos cabos ao longo dos vãos e da proximidade da linha a objetos ou árvores [3].



Figura 2-20 – Ilustração de incidência vertical.



Figura 2-21 – Probabilidade acumulada de ocorrência de um ângulo de descarga em módulo maior que θ_o. Adaptada de [54].

c) Acoplamento eletromagnético ⇒ os acoplamentos eletromagnéticos entre elementos aéreos (canal de descarga, cabos fase, para-raios e torres), enterrados (sistema de aterramento) e aéreo-enterrados são desprezados. Considera-se somente o acoplamento capacitivo entre cabos para-raios e fase nos cálculos das taxas de *backflashover*. Alguns pesquisadores têm demonstrado que tais acoplamentos podem ser, em alguns casos, importantes [1-3,8,69-73,88,91].

2.7.3 – Quanto à representação do sistema de aterramento

- a) Resistência de aterramento ⇒ o aterramento é modelado por uma resistência de aterramento. O espectro de frequência típico de correntes de descargas atmosféricas compreende frequências de 100 Hz até 1 ou 2 MHz [8,11,22,23]. Desta forma, a representação da resposta impulsiva do aterramento elétrico por meio de uma resistência é fisicamente inconsistente [76-80]. Neste caso, seria mais adequado representar este comportamento transitório pela impedância impulsiva do sistema de aterramento [76-80]. A representação por uma resistência seria adequada no caso do comprimento real do aterramento ser de, no máximo, igual ao seu comprimento efetivo [76,77].
- b) Efeito de ionização do solo ⇒ este efeito é desconsiderado. É mais pronunciado para aterramentos concentrados e solos com altos valores de resistividade [92,93]. Sua principal consequência prática é promover uma diminuição na impedância impulsiva do aterramento [92,93]. Desta forma, constitui-se em uma prática conservadora a sua desconsideração.
- c) Variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência ⇒ esta variação também não é considerada. Trabalhos recentes têm demonstrado que a inclusão da variação da condutividade e permissividade elétricas do solo com a frequência promove um melhor desempenho transitório do sistema de aterramento [79,80,94-100]. Da mesma forma que no caso da ionização do solo, a sua desconsideração reflete uma postura conservadora [101-106].

2.7.4 – Quanto aos cálculos das taxas de flashover e backflashover

 a) Abordagem probabilística ⇒ diversos parâmetros, tanto do sistema de transmissão quanto das descargas atmosféricas, estão envolvidos nos cálculos de desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas.

i) Sistema de transmissão \Rightarrow resistividade do solo onde a linha está instalada (ρ) e valores instantâneos de tensão (à frequência industrial) nos condutores de energia, no momento de ocorrência da descarga (V_{INST}) [2];

ii) Descarga Atmosférica \Rightarrow amplitude da onda de corrente (I), tempo de frente (t_i), ângulo de incidência (θ) e ponto de incidência ao longo do vão (X) [2]. Tais parâmetros são de natureza estocástica. Desta forma, devem ser tratados dentro de uma abordagem probabilística. Segundo a referência [2], para cada conjunto de valores desses parâmetros pode-se avaliar o desempenho (ϕ) de uma determinada configuração de linha. Desta forma, ainda segundo referência [2], considerando a variação de cada parâmetro entre seus limites inferior e superior e a respectiva densidade de probabilidade conjunta f(ρ ,V_{INST},I,t_f, θ ,X), pode-se obter, por integração, o desempenho total (D) da linha sob estudo, representada na equação (2-69) [2]:

$$D = N_V \int_{\rho_{min}}^{\rho_{max}} \int_{0}^{Vpico} \int_{l_{min}}^{l_{max}} \int_{t_{fmin}}^{t_{fmax}} \int_{-90}^{+90} \int_{0}^{vão} \phi(\rho, V_{INST}, I, t_f, \theta, X) f(\rho, V_{INST}, I, t_f, \theta, X)$$
(2-69)
$$dx \ d\theta \ dt_f \ dI \ dV_{INST} \ d\rho$$

Sendo:

o $N_v \Rightarrow$ número de vãos;

 φ ⇒ número de desligamentos de um vão da linha para um conjunto de parâmetros.

A avaliação de φ engloba o cálculo do transitório eletromagnético na linha de transmissão e a posterior determinação de ocorrência de disrupção no isolamento da linha. O cálculo de D requer simplificações, pois [2]:

- Existem muitas incertezas em φ e nos limites reais dos parâmetros;
- Exigência de um grande esforço computacional.

Assim, os algoritmos de cálculo de desempenho de linhas de transmissão não realizam a solução completa da equação integral (2-69). Os algoritmos com abordagem probabilística consideram o caráter aleatório dos parâmetros por meio de suas funções de densidade. Alguns utilizam o Método de Monte Carlo e outras uma abordagem analítica [2,9,18-21,107,108].

 b) Abordagem determinística ⇒ esta abordagem se caracteriza por uma postura mais simplificada de cálculo e modelos adotados. Os parâmetros citados no item "a" são tratados de forma determinística, mediante a consideração de seus valores médios ou medianos. Como descrito ao longo deste capítulo, o *Flash*, desenvolvido pelo IEEE, adota esse tipo de abordagem [10,14-17]. Outras três aproximações requerem verificação mais cuidadosa:

 i) A consideração de somente dois instantes de tempo para avaliação das sobretensões (2 e 6 μs);

ii) A adoção do fator de 60 % no cálculo de N_T , equação (2-40);

 iii) Em linhas sem cabos para-raios, considera-se somente a falha de blindagem para o cálculo de desempenho; desta forma, o efeito da torre em uma possível blindagem não é levado em consideração.

Em 2001, W. A. Chisholm, um dos idealizadores do *Flash*, publicou um artigo em que apresenta algumas justificativas relativas às aproximações realizadas neste programa. De um modo geral, todas as justificativas envolvem aspectos relacionados às incertezas envolvidas, devido às complexidades de cálculos mais elaborados, e principalmente no fato das previsões dos cálculos do *Flash* traduzir, em alguns casos, aproximadamente, os índices de desempenho observados em linhas reais [109].

Pesquisas recentes objetivam contribuir para a melhoria das previsões nos índices de desempenho de linhas de transmissão, envolvendo, basicamente, as seguintes abordagens:

- Avaliação de desempenho de linhas de transmissão e de distribuição que podem auxiliar, por exemplo, na calibração das modelagens [44,110-118];
- Desenvolvimento de modelagens físicas mais consistentes (principalmente baseadas em medições laboratoriais e no modelo de propagação do canal de descarga) para avaliação da interação direta de descargas atmosféricas e estruturas terrestres [119-131];
- Modelagem eletromagnética cálculo para do transitório eletromagnético, considerando o acoplamento eletromagnético entre elementos aéreos e enterrados, visando determinação mais confiável das sobretensões nos pontos de interesse [1,4,8,26,75,91,132-135].

2.8 – Considerações Finais

Neste capítulo estão apresentadas as principais etapas envolvidas no cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Para tal, é necessário o entendimento físico do fenômeno "descarga atmosférica", seus principais parâmetros característicos, sua interação com linhas de transmissão e a resposta da linha à sua incidência. Comcomitantemente, a determinação das aproximações realizadas no âmbito do Flash estão enumeradas, tendo em vista que o objetivo principal desta dissertação é realizar uma análise paramétrica do desempenho de linhas com base neste programa. As principais pesquisas associadas a estas respectivas etapas e modelagens eletromagnéticas são descritas, sempre que possível, em uma ordem histórica. Finalmente, no final do capítulo estão contempladas algumas análises críticas em relação às aproximações em questão e como as pesquisas atuais estão sendo desenvolvidas no sentido de contribuir para cálculos mais precisos de desempenho de linhas. Após todo este estudo, pode-se caminhar para a utilização do Flash para as citadas avaliações paramétricas (etapa contemplada no Capítulo 4). Antes, porém, é apresentada no Capítulo 3 a ferramenta computacional desenvolvida no MATLAB, com base na versão 1.9 do Flash, que possibilita, mediante uma interface mais amigável ao usuário, as avaliações, em pauta, das taxas de flashover e backflashover.

CAPÍTULO 3 – APRESENTAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA AMIGÁVEL PARA O *FLASH*

3.1 – Considerações Preliminares

O Capítulo 2 descreve as principais etapas do cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Pode-se perceber que tais cálculos são bastante complexos e trabalhosos, sendo, porém, essenciais nos projetos de linhas de transmissão.

Visando, então, facilitar tal processo para as empresas da área de energia, programas computacionais que calculam os desempenhos de linhas por meio de aproximações de formulações (aproximações estas obtidas empiricamente) são desenvolvidos e constantemente aperfeiçoados.

Existem alguns métodos e programas propostos para tais cálculos, tendo-se, além do *Flash* desenvolvido pelo IEEE, os programs *TFlash* e *PCFlash*. O primeiro foi desenvolvido pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*) e o segundo foi estruturado por PTI (*Power Technology Institute*) e modificado por *Powerlink Queensaland* e seus antecessores [136].

Dentre estes, o programa mais difundido e utilizado, tanto no meio acadêmico como pelas empresas do setor elétrico, é *o Flash* [136].

Este programa calcula o desempenho de linhas quando submetidas a surtos atmosféricos a partir da entrada de parâmetros relativos à:

- i) Geometria das torres de transmissão (tipo da estrutura a ser considerada);
- ii) Níveis de atividade atmosférica da região onde a linha será implantada;
- iii) Magnitude da tensão;
- iv) Tipo de energia a ser transmitida (alternada ou contínua);
- v) Capacidade de isolação;
- vi) Distribuição de resistência de aterramento;
- vii) Outras características de projeto de linhas de transmissão.

Como detalhado no Capítulo 2, o *Flash* calcula as taxas de desligamento por falha de blindagem e por *backflashover*.

Com base nestas duas taxas, o projeto da linha é avaliado quanto à quantidade de desligamentos em relação a 100 km de seu comprimento por ano. Pode-se, desta forma, determinar se há necessidade de alteração no projeto inicial da linha de transmissão quanto à série de estrutura utilizada, à cadeia de isoladores proposta, ao sistema de aterramento determinado e quanto à necessidade de implantar alguns métodos especiais para melhorar o desempenho da linha, como por exemplo, a instalação de dispositivos para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores, adição de cabos para-raios, tratamento do solo para diminuir a resistividade, entre outras técnicas usualmente indicadas [137].

Sabendo da importância do uso do *Flash* para o cálculo do desempenho de linhas, é abordado neste capítulo um breve histórico de sua evolução. E com o objetivo de possibilitar aos pesquisadores e aos usuários uma linguagem que provê um ambiente mais favorável para a montagem de problemas e obtenção de suas soluções, expressado numa notação matemática mais familiar, facilitando análises sistematizadas dos cálculos das taxas de desligamentos, é proposta uma ferramenta computacional, em linguagem *MATLAB*, baseada no *Flash* versão 1.9, que possui uma interface gráfica amigável ao usuário.

Neste contexto, este capítulo é dividido em duas partes: na primeira, (seção 3.2) são relatadas algumas das principais características do *Flash* e sua evolução através de suas diversas versões e na segunda, descreve-se sobre a ferramenta computacional implementada, discutindo sobre a linguagem utilizada, apresentando um caso de uso do programa, que é ilustrado por um fluxograma, e descrevendo a interface gráfica para facilitar seu manuseio (seção 3.3). Finalizando o capítulo (seção 3.4) é descrita uma breve conclusão do tema tratado.

3.2 – Evolução do Flash

Para calcular o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, foi desenvolvido, pelo grupo de estudos de desempenho de linhas de transmissão do IEEE, o programa *Flash*. Os métodos utilizados em tal programa baseiam-se na abordagem de J. G. Anderson, que se encontra na referência [5].

De uma maneira geral, este pacote computacional utiliza em torno de 30 passos para calcular a taxa por *flashover* e, aproximadamente, outros 40 passos adicionais para completar o cálculo da taxa por *backflashover* [138].

O *Flash* foi originalmente desenvolvido para uso interno do grupo com a finalidade de aperfeiçoar os cálculos até então realizados manualmente por J. G. Anderson. A partir daí, o programa foi utilizado para testar a sensibilidade dos vários modelos e avaliar importantes simplificações. As capacidades das versões do *Flash* para definir as taxas de interrupção das linhas foram aperfeiçoadas por meio de repetidas comparações com observações de uma série de linhas de transmissão, que serviam de calibração [5,138].

O *Flash,* assim, acabou por se tornar uma ferramenta útil não apenas para o grupo IEEE, mas também para a área acadêmica e para as empresas do ramo de energia que estudam o desempenho de linhas frente a surtos atmosféricos e que elaboram projetos de linhas. Isto, por ter uma estrutura linear que permite aos estudantes, pesquisadores e engenheiros focarem na qualidade dos dados e aproximações, ao invés de se concentrarem apenas no processo de cálculo [138].

O histórico do desenvolvimento do programa Flash tem a seguinte cronologia:

- Versão original ⇒ desenvolvida por Natasha Roukos na linguagem Fortran;
- Setembro de 1985 ⇒ montada a 1^a (primeira) versão na linguagem *Basic* por Jim Whitehead;
- Janeiro de 1986 ⇒ modificado a 1ª (primeira) versão para computadores da IBM por Bill Chisholm;
- Setembro de 1987 ⇒ produzida a versão 1.4 do *Flash*, também em *Basic*, por Jim Whitehead;
- Janeiro de 1989 ⇒ Bill Chisholm e Roger Clayton produzem a atualização do Flash, caracterizando na versão 1.5;
- 1990 ⇒ criada e lançada a versão 1.6, um aperfeiçoamento da versão 1.5; por Ding Yuen e Bill Chisholm;
- Janeiro de 1997 ⇒ nova revisão feita pelo IEEE, caracterizando na versão 1.7, que marca o final do ciclo das versões escritas em linguagem *Basic* e com utilização da plataforma DOS nos computadores para interface com os usuários;
- Fevereiro de 2001 ⇒ nova versão 1.8 em linguagem C, feita, também, pelos estudiosos do IEEE; que foi objeto de novas mudanças, principalmente as relacionadas com as geometrias das torres, dando origem a versão 1.81.

- Maio de 2007 ⇒ desenvolvida pelo grupo IEEE a versão 1.9 do software Flash escrita na linguagem de programação C, o qual contém uma interface gráfica em Excel [5,138,139].
- 2010 ⇒ versão mais recente divulgada no mês de agosto. Corresponde a uma mudança da versão 1.9 em linguagem C para MATLAB, dando origem à versão 2.0 [140]. Esta versão foi divulgada recentemente e encontra-se na referência [140].

Nas migrações das versões citadas, em muitos momentos, não houve apenas a modificação ligada à parte computacional como a alteração da linguagem utilizada, ocorrendo, também, algumas mudanças nas formulações de forma a tornar os resultados mais confiáveis. A seguir são mencionadas algumas características das últimas versões do *Flash* e suas variações mais significativas.

Versão 1.6 ⇒ surgida em 1990 e em linguagem Basic compatível a um computador IBM PC DOS e não é executável em plataforma Windows. Quanto aos parâmetros de entrada algumas mudanças relevantes em relação às versões anteriores se destacam:

i) Número de fases a serem analisadas pode chegar a 12;

ii) Pode-se utilizar não apenas o índice T_d (nível ceráunico) como parâmetro de entrada relativo às descargas atmosféricas, como também, o índice N_q (densidade de descarga) [138].

 Versão 1.7 ⇒ destacam-se as seguintes alterações que implicam em melhores resultados das taxas de desligamentos:

 i) Nova formulação de β é utilizada para distância de atração para o solo no modelo eletrogeométrico;

 ii) Os dados de entrada, a exemplo do espaço do feixe de condutores, ficam convertidos do sitema inglês para o sistema métrico [138].

- Versão 1.8 ⇒ a mudança mais significativa dessa versão em relação a anterior é simplesmente computacional. Assim, pode-se dizer que é a versão do *Flash* 1.7 em *MS Basic* transformada para a linguagem *C*. O programa já não é conduzido pelo *menu* (em DOS), e sim lê a entrada de um arquivo texto [138].
- Versão 1.81 ⇒ as mudanças a serem destacadas são:

i) Com nova interface gráfica o programa funciona em Windows 95/98;

ii) Mensagem de alerta caso a blindagem da torre não possa ser resolvida [138].

 Versão 1.9: sobre as mudanças ocorridas na versão que foi base para a ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho destacam-se:

i) A taxa de *backflashover* por 100 km para cada condutor é apresentada nos resultados detalhados:

 ii) A densidade de descargas no solo pode ser inserida diretamente adicionando os valores negativos no lugar do nível ceráunico e a entrada do índice de quantidade de horas de trovoadas não está mais disponível;

 iii) Na consideração da frequência industrial no cálculo das tensões a incrementação para tal função varia no passo de 2° (em versões anteriores a variação é no passo de 15°) [138].

3.3 – Ferramenta Computacional: FLASHCEFET

Como mostrado nas seções 3.1 e 3.2, o programa *Flash* e outras ferramentas computacionais são usualmente utilizadas para o cálculo do desempenho de linhas de transmissão, porém, é necessário que essas ferramentas possibilitem aos pesquisadores e até mesmos aos usuários uma linguagem que provê um ambiente mais fácil para a montagem e soluções de problemas.

Visando criar este ambiente mais familiar e facilitador, onde pesquisadores e usuários possam estudar, aperfeiçoar e atualizar toda a aplicabilidade já existente no *Flash* versão 1.9 (em linguagem *C*), foi desenvolvida uma ferramenta computacional em *MATLAB*, nomeada de *FLASHCEFET*.

A migração do programa *Flash* 1.9 da linguagem computacional *C* para o *MATLAB* foi estruturada em 5 (cinco) etapas, a saber:

- Primeiramente, foi feita uma análise sistemática e um planejamento de migração do código fonte em linguagem *C* para *MATLAB*.
- Em um segundo momento, foi desenhada a tela da interface gráfica GUI - para melhor interação com o usuário. Os widgets (janelas, botões, ícones etc.) foram arranjados de uma forma didática para facilitar o manuseio da interface, sendo criado também o DFD – diagrama de fluxo de dados.
- Em seguida, teve-se a tradução das sub-rotinas em linguagem C para MATLAB, incluindo também as lógicas computacionais dos cálculos das taxas de flashover e de backflashover.

- O passo seguinte foi a realização de testes com parâmetros de linhas reais para a validação da ferramenta computacional *FLASHCEFET*. Os resultados gerados pela ferramenta foram comparados (validados) com os gerados pelo *Flash* 1.9.
- E, finalmente, foi feita a implementação de uma interface gráfica GUI para melhor interação com o usuário.

3.3.1 – *MATLAB*

O MATLAB (MATrix LABoratory) é um programa interativo voltado para o cálculo numérico, e sua difusão e aceitação por parte dos estudantes e pesquisadores é bem satisfatória [141], visto que codificar aplicativos em outras linguagens, como em linguagem *C*, é mais demorado e requer conhecer e trabalhar com os recursos da linguagem como ponteiros e bibliotecas. Esses recursos fazem a estrutura do código fonte um código complexo, dificultando o acesso aos pesquisadores em futuras implementações.

Assim, a ferramenta *FLASHCEFET* possui as vantagens de apresentar uma interface mais amigável ao usuário, quando comparada ao *Flash* 1.9, e é mais flexível em termos de análise de sensibilidade do desempenho de uma linha de transmissão envolvendo os diversos parâmetros de interesse.

Em relação ao *MATLAB*, este é um programa criado no fim dos anos 70 por Cleve Moler, então presidente do Departamento de Ciências da Computação da Universidade do Novo México. Este pacote computacional se espalhou para outras universidades e encontrou um forte uso no âmbito da comunidade acadêmica voltada para a matemática aplicada. O engenheiro Jack Little juntamente com C. Moler e Steve Bangert reescreveram o *MATLAB*, fundaram a *MathWorks* e prosseguiram no desenvolvimento deste. O *MATLAB*, então, é uma marca registrada da *MathWorks* [141,142].

O MATLAB é um sistema interativo e de linguagem de programação para computação numérica e visualização para as áreas técnicas e científicas. Ele permite a solução de muitos problemas numéricos em uma fração de tempo que seria necessário para escrever um programa em uma linguagem como *Fortran, Pascal* ou linguagem *C*. Além disso, as soluções dos problemas são expressas de um modo bem próximo daquele em que são escritas matematicamente, tornando seu uso mais simples [141,142].

Atualmente, o *MATLAB* é definido como um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica em geral, integrando a capacidade de fazer cálculos, de visualização gráfica e de programação [141,142].

A escolha pelo MATLAB pode ser explicada por três principais motivos:

- É um programa de linguagem que é usado principalmente para cálculos numéricos e como o projeto em questão não envolve cálculos matemáticos complexos e não possui muitos *loops* (estruturas de repetição), o requisito tempo computacional não é significativo;
- Possui um conjunto de funções matemáticas built-in (funções internas da linguagem) que torna mais rápido o desenvolvimento de problemas numéricos;
- Possui conjuntos de *widgets* (janelas, botões, ícones etc.) que facilitam a criação de interfaces gráficas.

3.3.2 – Caso de Uso: Interação Usuário x Sistema

Com o objetivo de apresentar a funcionalidade proposta para o sistema implementado em *MATLAB*, é descrita a sequência de eventos que a ferramenta *FLASHCEFET* utiliza para o processamento do cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas:

Evento 1 \Rightarrow O usuário seleciona a classe de torre que melhor se assemelha com a torre estudada. Esta é a primeira tela da ferramenta computacional (Figura 3-2) e essas figuras são baseadas nas geometrias de torre apresentadas da Figura 2-12 à Figura 2-15.

Evento 2 \Rightarrow O usuário insere os dados relativos aos parâmetros gerais da linha de transmissão, da torre, da resistência de aterramento, dos cabos fase e dos cabos para-raios. Posteriormente, insere os dados relativos à incidência das descargas atmosféricas na região da linha de transmissão analisada, conforme a Figura 3-3, segunda tela da ferramenta estruturada.

Evento 3 \Rightarrow O sistema, então, começa a processar os cálculos:

3.1 \Rightarrow Inicialmente têm-se os cálculos da blindagem da linha, através do modelo eletrogeométrico, conforme relatado no Capítulo 2, seções 2.2, 2.3 e 2.4, na seguinte sequência:

3.1.1 \Rightarrow Calcula a densidade de descargas atmosféricas por meio da relação do nível ceráunico da região, representada pela equação (2-1).

3.1.2 \Rightarrow Calcula o número total de incidências de descargas atmosféricas na respectiva linha de transmissão, conforme equação (2-7).

3.1.3 \Rightarrow Calcula a corrente mínima capaz de causar *flashover* na cadeia de isoladores, de acordo com equação (2-22) e a distância de atração mínima para a linha, por meio da equação (2-28).

3.1.4 \Rightarrow Determina o posicionamento dos cabos para-raios em relação aos condutores que proporciona uma blindagem efetiva. Esta etapa utiliza os principais conceitos do MEG, calculando, em um primeiro momento, o ângulo de blindagem da torre (equação (2-18)) e o posicionamento dos cabos fase em relação aos cabos para-raios (equação (2-14) ou (2-19)). E, em um segundo momento, calcula o novo posicionamento horizontal dos cabos para-raios, por meio da equação (2-20), obtendo, assim o ângulo de blindagem efetivo, equação (2-21).

 $3.1.5 \Rightarrow$ Caso ocorra a blindagem efetiva, a taxa de falha de blindagem é zero (N_{FBT}=0). Caso contrário, é feito o cálculo da distância de atração máxima (representado pela equação (2-30)) e o cálculo da correspondente corrente, por meio da equação (2-35).

3.1.6 \Rightarrow Finalizando o cálculo da blindagem da torre, é executado o cálculo da taxa de *flashover* – desligamentos/100 km/ano, pela equação (2-36).

3.2 \Rightarrow Calcula, em sequência, as impedâncias de surto própria e mútua dos cabos para-raios, representadas pelas equações (2-41), (2-42) e (2-43), levando, sempre em consideração o acoplamento entre cabos para-raios e cabos fase, equação (2-44) ou (2-45).

3.3 \Rightarrow Calcula a impedância da classe da torre escolhida, cujos modelos são representadas pelas Figura 2-12 à Figura 2-15.

3.4 \Rightarrow Calcula a resposta das torres à propagação do surto, levando em consideração a contribuição de cada resistência de pé de torre que é proposta pelo usuário.

3.5 ⇒ Calcula as tensões no topo da torre, no pé da torre e no braço da torre, nos tempos de 2 e 6 µs, baseando-se nas equações (2-49), (2-53) e (2-54), respectivamente.

3.6 \Rightarrow Determina as tensões nas cadeias de isoladores nos tempos de 2 e 6 µs (por meio da equação (2-55)) e das correntes críticas para provocar disrupção em 2 e 6 µs, conforme equações (2-58) e (2-59).

3.7 \Rightarrow Inclui em seus cálculos a influência da frequência industrial, calculando a nova corrente crítica capaz de causar a disrupção na fase "n" nos tempos de 2 e 6 µs pela equação (2-60).

3.8 \Rightarrow Calcula a taxa de *backflashover* – desligamentos/100 km/ano, por meio da equação (2-67).

3.9 \Rightarrow Finalmente, faz o cômputo da taxa total (soma entre a taxa de falha de blindagem e a de *backflashover*) – em desligamentos/100 km/ano – representado pela equação (2-68).

Evento 4 \Rightarrow O sistema além de gerar a terceira e última tela com os principais resultados, gera também um arquivo texto, como mostrado na tela dos resultados finais, que pode ser localizado no mesmo diretório do programa *FLASHCEFET*. Nele se encontram os resultados detalhados da análise de desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas, conforme ilustrado na Figura 3-1.

3.3.3 – Fluxograma

Com o objetivo de ilustrar as principais etapas relativas ao processamento do *FLASHCEFET*, descritas na seção anterior (3.3.2) de uma maneira resumida, estruturou-se um fluxograma que exibe a sequência do cálculo do desempenho de linhas frente às descargas, conforme ilustrado na Figura 3-1:



Figura 3-1 - Fluxograma do Caso de Uso.

3.3.4 – Interface Gráfica - GUI

Com o intuito de facilitar ao usuário o manuseio da ferramenta computacional *FLASHCEFET* foi desenvolvida uma interface gráfica.

Desenvolver um ambiente amigável, explicativo e limpo, tornando o manuseio do programa *Flash* mais fácil e objetivo é de grande interesse por parte dos usuários e pesquisadores, como pode ser visto nas referências [136,140]. Assim, a interface gráfica – *GUI* - implementada é organizada de maneira bastante didática, objetivando uma boa praticidade de uso.

Esta interface é estruturada em três telas, a saber: nas duas primeiras, os usuários fornecem os parâmetros de entrada e, na terceira, são gerados os resultados, envolvendo: as taxas de desligamento por flashover, por *backflashover* e a total [desligamentos/100 km/ano]. Os demais resultados são gerados em arquivo texto.

Antes de iniciar a apresentação da *GUI*, uma importante observação relativa ao sistema de unidades utilizado deve ser considerada. No programa original *Flash*, temse duas opções de unidades para os resultados, no padrão internacional (métrico) ou no padrão inglês. Porém, como esta ferramenta foi criada objetivando, primeiramente, cálculos para parâmetros brasileiros, tais parâmetros e resultados são tratados apenas utilizando o sistema de unidade internacional (métrico).

Inicialmente, a Figura 3-2 representa a primeira tela dos parâmetros de entrada. Nela estão representadas as quatro geometrias de torres que esta ferramenta computacional tem condição de operar.

Ao avançar para a segunda tela (Figura 3-3), encontram-se os outros parâmetros de entrada necessários para o cálculo do desempenho de linhas de transmissão. Estes parâmetros estão divididos em dois principais:

i) Relativos às linhas de transmissão;

ii) Relativos às descargas atmosféricas.

Vale salientar que valores de entrada que indicam medida tem que ser colocados em metros, com exceção dos que estão especificados na própria tela.



Figura 3-2 – 1ª Tela GUI – Parâmetros de entrada: geometria da torre.

FlashCEFET Arquivo Sobre		-101									
Parâmeti de Tra	os da nsmiss	Linha são	i i	Pa	râmetr	os dos	s Cabo	s Fase	Э	Índice dos Condutores Expostos:	
Corrente				Número	de Condi	tores:			0	Índice dos Cabos Pára-Raios:	
(€ CA	00	c		Número	de Subci	ondutores	s por Fase	// 6	0		
				Diâmetre	o dos Cor	ndutores)					
Tensão da Linha (kV):			0	e Subco	ndutores	re Subco	odi toree	(mm);		Parâmetros dos Cabos Pára-Raic	
Comprimento Vão (m):			0	Copaça		re Subco		(nun).		Número de Cabos Pára-Raios:	
Parâmet	ros da T	orre		riecha (ios Cona	utores (m	00. S		10	Diâmetros dos Cabos Pára Raios (mm)	
Altura (m):			0	Altura d	os Condu	tores (m)):			Dianier os dos calos e a articalos (min).	
Raio da Base (m)				0	0	0	0	0	0	Fiecha dos cabos Para-Raios (m).	
Lannua da Casão Média	(m)-			0	0	0	0	0	0	Altura dos Cabos Pára-Raios (m):	
Largura da Seçao Media	(m):		1 0	Distância Horizontal dos Condutores (m):						0 0	
Distância da Seção Médi	a ao Topo ((m):	0				0	0	Distância Horizontal dos Cabos Pára-Raios (m):		
Raio do Topo (m):			0	0	0	0	0	0		0 0	
Parâmetros o de Pé	las Resi da Torr	istênci e	as	Comprin	nento da (Cadeia de	Isoladore	rs (m):		Parâmetros da	
				0	0	0	0	0	0	Descarga Atmosférica	
Número de Resistências:			0	0	0	0	0	0	0		
Valores das Resistência	s (ohm):			Ângulo	da Fase o	io Condui	tor (araus	r		Nível Ceráunico	
0 0 0	0	0			0	0		0		C Densidade DA's	
0 0 0	0	0							-		
Probalidades dos Valore	s das Resis	tências ((%)r	10	10	1.0	10	1.0	10		
	0	0		Número	de Condi	tores Ex	postos:		0	Tipo de Torre Calcular Fla	
	- [0	0									

Figura 3-3 – 2ª Tela GUI – Demais parâmetros de entrada.

A seguir é feita uma breve explicação do manuseio da ferramenta, na qual cada subdivisão da Figura 3-3, relativa aos parâmetros de entrada, é apresentada.

Primeiramente, na Figura 3-4, têm-se os parâmetros relativos à linha de uma maneira geral, indicando qual o tipo de energia que é transmitida (contínua ou alternada), qual o valor da tensão [kV] a ser transmitida e qual o comprimento do vão [m] da respectiva linha.

Parâmetros da Linha de Transmissão								
Corrente								
€ CA	C CC							
Tensão da Linha (kV):		0						
Comprimento Vão (m):		0						

Figura 3-4 – Parâmetros gerais da linha de transmissão.

Em um segundo passo, é necessário entrar com os parâmetros correspondentes à estrutura da torre escolhida (Figura 3-5). O parâmetro altura [m] é necessário ser preenchido para qualquer classe de torre escolhida. Os outros parâmetros variam de acordo com cada classe de torre, sendo:

i) Torre Cônica (Figura 2-12) \Rightarrow preencher apenas o item raio da base da torre [m]

ii) Torre Forma-H (Figura 2-13) \Rightarrow preencher os itens raio da base da torre e largura da seção média da torre [m] (essa seção média é conhecida como cintura da torre);

iii) Torre Cilíndrica (Figura 2-14) \Rightarrow preencher apenas o item largura da seção média da torre [m];

iv) Torre *Waist* (Figura 2-15) \Rightarrow preencher todos os campos.

Parâmetros da Torre	
Altura (m):	0
Raio da Base (m):	0
Largura da Seção Média(m):	0
Distância da Seção Média ao Topo (m):	0
Raio do Topo (m):	0

Figura 3-5 – Parâmetros da torre.

O terceiro passo é o preenchimento dos campos que se destinam aos parâmetros da resistência de pé de torre (resistência de aterramento) [Ω], Figura 3-6.

O número máximo de valores de resistência de pé de torre a ser considerado pela interface é 10 (dez), porém o código fonte permite que se forneça até 50 valores de resistências de aterramento. O item probabilidade dos valores das resistências correspondem a histogramas similares aos representados na Figura 2-16 e na Figura 2-17.

Ρ	Parâmetros das Resistências de Pé da Torre											
Número	de Resist	ências:			0							
Valores	das Resi	stências i	(ohm):									
0	0	0	0	0								
0	0	0	0	0								
Probalid	Probalidades dos Valores das Resistências (%):											
0	0	0	0	0								
0	0	0	0	0								

Figura 3-6 – Parâmetros das resistências de pé da torre.

A próxima subdivisão, Figura 3-7, é referente aos parâmetros dos cabos fase. O número máximo de cabos condutores a ser utilizado é 12 (doze), o número máximo de subcondutores é 4 (quatro). Chama-se atenção para as unidades dos parâmetros diâmetro dos condutores e subcondutores e do espaçamento entre os subcondutores: é preciso que sejam fornecidos em milímetros.

Na Figura 3-8 o parâmetro a se destacar é o "índice dos para-raios". Para que esses campos possam ser preenchidos corretamente é importante preencher devidamente os campos dos "índices de condutores expostos". Como visto nesta figura, o número máximo de "condutores expostos" com que a ferramenta trabalha é 4 (quatro), logo o número máximo de "índice dos para-raios" é 4 (quatro) também. Então, se verifica qual(ais) é(são) o(s) condutor(es) exposto(s) e seu(s) respectivo(s) índice(s), depois identifica-se qual(ais) o(s) para-raios que "protege(m)" cada cabo condutor e preenche-se o(s) campo(s) com o respectivo índice. No Capítulo 4, com a utilização da ferramenta computacional este item se torna mais claro.

A última subdivisão dos parâmetros de entrata relativos às linhas de transmissão, Figura 3-9, é referente aos parâmetros dos cabos para-raios. O máximo de cabos para-raios que se pode utilizar nesta ferramenta é 2 (dois) e o mínimo 0 (zero).

Parâmetros dos Cabos Fase

Número	0								
Número	de Subco	ondutores	por Fase	E C	0				
Diâmetri e Subco	Diâmetro dos Condutores) e Subcondutores (mm):								
Espaça	mento ent	re Subco	ndutores	(mm):	0				
Flecha o	los Condu	tores (m)	r.		0				
Altura d	los Condu	tores (m)	¢.						
0	0	0	0	0	0				
0	0	0	0	0	0				

Distância Horizontal dos Condutores (m):

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Comprimento da Cadeia de Isoladores (m):

0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
Ângulo	da Fase c	lo Condut	or (graus):	
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Figura 3-7 – Parâmetros dos cabos fase.

0

Número de Condutores Expostos:

Índice dos Condutores Expostos:								
0	0	0	0					
Índice dos	: Cabos I	Pára-Raio	s:					
0	0	0	0					

Figura 3-8 – Índices dos cabos fase e para-raios.

Parâmetros dos Cabos Pára-R	aios
Número de Cabos Pára-Raios:	0
Diâmetro dos Cabos Pára-Raios (mm):	0
Flecha dos Cabos Pára-Raios:	0
Altura dos Cabos Pára-Raios:	
0 0	
Distância Horizontal dos Cabos Pára-Raios:	
0 0	

Figura 3-9 – Parâmetros dos cabos para-raios.

Por fim, têm-se os parâmetros relacionados com a taxa de incidência das descargas atmosféricas, Figura 3-10. Conforme já foi visto, esta ferramenta por ser baseada no programa *Flash* 1.9 não leva em consideração o parâmetro T_H , horas de

tempestade, porém pode ser fornecido ou o nível ceráunico (T_d) ou a densidade de descargas (N_g) para a região em estudo.



Figura 3-10 – Parâmetros das descargas atmosféricas.

Ao completar o preenchimento dos últimos parâmetros pode-se voltar à tela com as classes das torres ou passar para o próximo passo que gera a terceira tela: de resultados. Esta tela representada pela Figura 3-11 ilustra os resultados finais indicando as falhas de desligamentos por *flashover*, por *backflashover* e a total [desligamentos/100 km/ano]. Para os demais resultados, tanto os relacionados com cada resistência de aterramento de pé da torre, quanto os relacionados ao ângulo de blindagem da torre e ao ângulo de blindagem efetivo, é gerado um arquivo texto, conforme apresentado no Capítulo 4, seção 4.3.



Figura 3-11 – 3ª Tela GUI – Resultados Finais.

3.4 – Considerações Finais

O programa *Flash* é um programa computacional amplamente difundido e utilizado para avaliação de desempenho de linhas de transmissão submetidas a surtos atmosféricos. Esse programa foi desenvolvido com base na metodologia proposta por J. G. Anderson e sua primeira versão escrita pelo IEEE, sofrendo várias modificações ao longo dos anos. Seu objetivo é calcular a taxa de desligamentos por *flashover* e por *backflashover*. Para tal, devem-se conhecer as características geométricas da linha de transmissão em análise, as características geográficas do ambiente, o tipo de energia a ser transmitida, a distribuição de resistência de aterramento na região, entre outros que são dados de entrada fornecidos pelo usuário do programa.

Os resultados fornecidos pelo *Flash* estão sujeitos a algumas limitações, já que ao longo dos cálculos são feitas algumas considerações e aproximações, como, por exemplo, a disponibilidade de somente quatro configurações de torres de linhas de transmissão (outras limitações estão citadas no Capítulo 2). A partir dos resultados obtidos, pode-se definir o que deve ser melhorado no projeto das linhas para diminuir os desligamentos provocados por essas falhas.

No intuito de possibilitar um ambiente facilitador não apenas pela sua aplicabilidade diária, mas também para estudos de análises de sensibilidade, foi implementada uma ferramenta computacional em *MATLAB – FLASHCEFET -* baseada no *Flash* versão 1.9 em liguagem *C* e foi desenvolvida uma interface gráfica – *GUI*.

A escolha pelo *MATLAB* ocorreu porque desenvolver aplicativos em linguagens, como a linguagem *C*, demanda mais tempo, pois sua curva de aprendizado é maior quando comparado a linguagens de programação como o *MATLAB*. É válido mencionar também que o *MATLAB* oferece um conjunto de funções de cálculos numéricos e funções *built-in* que agilizam o desenvolvimento de projetos, tais como: o cálculo das taxas de desligamentos de linhas.

Vale ressaltar que a ferramenta descrita neste capítulo possibilita diversas análises de sensibilidade/paramétricas, que são de extrema importância para um estudo mais detalhado de projetos de linhas de transmissão, visando contribuir para o entendimento, e posterior diminuição, do número de interrupções no fornecimento de energia elétrica devido a surtos atmosféricos, tornando os sistemas elétricos de potência mais confiáveis e eficazes. A apresentação das análises em causa, que permitem, entre outros aspectos, a avaliação e detecção dos principais elementos que causam os maiores impactos no desempenho de linhas, é objeto de estudo no Capítulo 4 em sequência.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1 – Considerações Iniciais

As descargas atmosféricas constituem um dos principais elementos de solicitação do sistema de transmissão de energia elétrica no Estado de Minas Gerais. Diante do exposto, torna-se imprescindível, não apenas calcular o desempenho das linhas que sofrem as interferências dessas descargas, mas também estudar e analisar os parâmetros que são utilizados para os cálculos do desempenho destas linhas e os seus respectivos resultados.

Assim, este capítulo tem como objetivo examinar alguns cálculos e parâmetros de entrada, bem como fazer uma análise crítica dos resultados obtidos pela utilização da ferramenta computacional *FLASHCEFET*, estruturada neste trabalho.

Então, o primeiro passo é definir o caso base (configuração da linha de transmissão, tensão, corrente e características típicas das descargas atmosféricas do estado de Minas Gerais) – conforme seção 4.2. Este caso é utilizado em dois momentos neste capítulo:

- i) Na validação da Ferramenta Computacional (seção 4.3).
- ii) Nas análises de sensibilidade de parâmetros físico-práticos (seção 4.4).

Essas análises de sensibilidade são realizadas utilizando os benefícios trazidos pela ferramenta computacional e, atendendo a um objetivo didático, essas análises são apresentadas em blocos divididios da seguinte maneira:

- Análises relacionadas com as descargas atmosféricas:
 - \circ Funções que relacionam os níveis ceráunicos (T_d) com as densidades de raios por quilômetro quadrado, por ano (N_a).
 - Funções das distribuições de probabilidades cumulativas do valor de pico da corrente (I_P).
- Análises relacionadas com as linhas de transmissão:
 - o Resistências dos aterramentos das torres.
 - o Alturas da torre.
 - o Comprimentos das cadeias de isoladores.
 - o Comprimentos dos vãos médios.

Finalizando o capítulo, a seção 4.5 contém uma análise crítica dos principais resultados e algumas considerações finais sobre os procedimentos realizados.

4.2 – Definição do Sistema de Transmissão Base

4.2.1 – Parâmetros das Descargas Atmosféricas de Minas Gerais

Como já foi visto, para se obter a taxa de desempenho de uma linha de transmissão, é necessário que se tenha conhecimentos das descargas atmosféricas que atingem a região em que a linha se encontra.

Baseando-se na ferramenta computacional desenvolvida, o parâmetro de incidência geográfica da descarga que se deve levar em consideração é o nível ceráunico (T_d) ou o nível de densidade de descargas (N_a).

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o comportamento de linhas da concessionária CEMIG, localizadas no estado de Minas Gerais frente às descargas atmosféricas. É necessário, então, especificar tais parâmetros das linhas de transmissão e das descargas atmosféricas dessa região.

O estado de Minas Gerais está situado numa região subtropical, logo, com incidência de surtos atmosféricos intensa. Além disso, seu território tem aproximadamente 600 km² [143]. Assim, o nível ceráunico e o nível de densidade de descargas atmosféricas no estado se diferem bastante, de uma região para outra, como se pode observar na referência [22].

No intuito de definir o caso base em estudo, é adotado o valor do nível ceráunico, T_d . Optou-se pela utilização de T_d porque objetiva-se analisar as formulações de N_g , tanto a clássica, utilizada no *Flash*, como a proposta para a região de Minas Gerais, além do que, existe disponível uma grande base de dados de T_d . Assim, de acordo com a referência [22] o valor de T_d a ser considerado é o valor médio da região de Minas Gerais que é: T_d =70.

4.2.2 – Parâmetros da Linha de Transmissão

Caracterizado o parâmetro relativo às descargas atmosféricas na região em estudo, é preciso selecionar a geometria do sistema a ser trabalhado.

As tensões utilizadas pela CEMIG para a transmissão de energia elétrica em Minas Gerais são variadas, porém algumas são mais expressivas: 138 kV, 230 kV, 345 kV e 500 kV. Para diferentes níveis de tensão, relevos distintos e para variadas resistividades de solos existem diferentes tipos de geometrias de torres e de aterramento.

A linha de transmissão considerada como base dos estudos realizados possui uma torre do tipo suspensão (torre com variação angular pequena) de uma série de 230 kV. Seu modelo é conhecido como S4 (torre de maior ocorrência ao utilizar sua série e sua variação angular de no máximo 2º – dois graus), tendo sua silhueta representada pela Figura 4-1. Vale salientar que o tipo de energia para a transmissão é alternada (CA), uma vez que a CEMIG só trabalha com a transmissão deste tipo de energia.



Figura 4-1 - Silhueta da Torre S4, 230kV – LT base.

Logo, os parâmetros de entrada necessários para o cálculo do desempenho da linha assim caracterizada, utilizando a ferramenta computacional, estão representados na Figura 4-2 e na Figura 4-3.

A distribuição da resistência de pé de torre é aquela representada na Figura 2-16.



Figura 4-2 – Caso Base: situação da torre semelhante à classe Waist.

quivo	Sobre																
	Para	âmetr	os da	Linh	a	Pé	arâmet	ros dos	s Cab	os Eas	e.	Índice d	os Condu	tores Exp	oostos:		
de Transmissão								5 0 0 0			1	3	0	0			
Corr	ente					Número	de Cond	utores:			3	Índice d	os Cabos	Pára-Ra	ios:		
ġ	€ CA		C	сс		Número	de Subc	ondutores	s por Fa	se:	1	1	2	0	0		
						Diâmeti	o dos Co	ndutores)			25.15						
Tensão da Linha (kV): 230					230	Espaça	mento en	tre Subco	indutore	s (mm):	0	Para	metro	s dos i	Labos F	ara-R	alos
Compri	mento ∀á	ão (m):			300	Flecha	Flecha dos Condutores (m): 6.89				Número	de Cabo:	s Pára-Ri	aios:		2	
	Pa	irâmeti	ros da	Torre		Altura	tos Condi	tores (m	r		1	Diâmetro	os dos Ca	ibos Pári	a-Raios (mn	1):	9.52
Altura	(m):				24	19.5	19.5	19.5	a	0	0	Flecha d	los Cabo:	s Pára-Ra	aios (m):		6.2
taio da	a Base (n	n):			3	13.3	0	13.5	0			Altura dos Cabos Pára-Raios (m):					
argur	a da Seç	ão Média((m):		2.3	10	10	10	10	10	10	24 24					
istând	ia da Se	ção Média	a ao Topo	(m):	10.5	Distância Horizontal dos Condutores (m):						Distânci	a Horizon	tal dos C	abos Pára-	Raios (m)	r
Raio de	o Topo (m	1):			7.2	-7.2	0	7.2	0	0	0	-4.5	4.5	1			
_						0	0	0	0	0	0	1.000	1.000				
F	'arām	etros o da Dá	las Re: da Toi	sistènc	las	Compri	mento da	Cadeia de	e isolado	res (m):			D	ərâm	otros c	la	
		uere	uaro	i e		3.5	3.5	3.5	0	0	0	Parametros da Descarga Atmosférica					
Vúmer	o de Resi	stências:			10	0	0	0	0	0	0		0030	uigu	Aunos	ieneu	
/alore	s das Re	sistência	s (ohm):			Ângulo	da Fase	do Condu	tor (grai	ว์ลเ		Nív	el Ceráu	nico			70
60	45	30	28	25		0	120	240	0	0	0	C De	nsidade ()A's			
23	20	18	15	10		0	0	0	0	- 10	- 0						
robali	dades do	s Valore:	s das Res	istências	(%):	1.	1.5		1.0	10	1°						
10	20	30	40	50		Número	de Cond	utores Ex	postos:		2			Tipo de	Torre	Calcular	r Flash
60	70	80	90	100													

Figura 4-3 – Caso Base: parâmetros gerais da linha, torre e cabos.

4.2.3 – Considerações sobre o Desempenho de uma Linha de Transmissão

Como já é sabido, o desempenho do sistema de transmissão de energia é medido por meio de índices que representam a qualidade desta energia ofertada aos consumidores. Estes índices consideram o número e a duração das interrupções que ocorrem no sistema. Deste modo, são definidos limites aceitáveis do número de desligamentos por trecho de linha, níveis estes que variam de acordo com cada concessionária.

De uma maneira geral, a taxa de desligamento por 100 km de linha por ano aceitável, de acordo com seu nível de tensão, pode ser estabelecida da seguinte maneira, baseado em [22] e em valores trabalhados em Minas Gerias seguindo informações fornecidas pela CEMIG:

- i) Linhas de 69 kV \Rightarrow aproximadamente 15 desligamentos;
- ii) Linhas de 138 kV \Rightarrow aproximadamente 10 desligamentos;
- iii) Linhas de 230 kV \Rightarrow aproximadamente 3 a 5 desligamentos;
- iv) Linhas de 345 kV \Rightarrow aproximadamente 2 desligamentos;
- v) Linhas de 500 kV \Rightarrow aproximadamente 1 desligamento.

4.3 – Validação da Ferramenta Computacional

Com o objetivo de validar a ferramenta computacional implementada em *MATLAB*, foi utilizado o caso base (caracterizado na seção 4.2), cujos parâmetros de entrada estão descritos na Figura 4-2 e na Figura 4-3.

Em seguida, foram computados os resultados para tais parâmetros tanto pelo *Flash,* em linguagem *C,* como pela ferramenta computacional – *FLASHCEFET.*

Na Tabela 4-1 são expressos os principais resultados (txa de *flashover*, taxa de *backflashover* e taxa total) tanto em linguagem *C* como em *MATLAB*, no intuito de enfatizar a validação da ferramenta em *MATLAB* [144-146]. No final desta seção são apresentados os resultados que permitem uma comparação do uso das duas ferramentas consideradas.

Resultados Finais [desligamentos/100 km/ano]	Flash 1.9	FLASHCEFET
Taxa de <i>flashover</i>	0,01	0,0061
Taxa de <i>backflashover</i>	1,55	1,5544
Taxa total	1,56	1,5605

Tabela 4-1 - Resultados principais do Caso Base: *Flash 1.9* x *FLASHCEFET* - taxas de desligamentos por *flashover, backflashover* e taxa total.

É interessante salientar que os resultados principais gerados pelo *Flash* 1.9 são expressos com no máximo 2 (duas) casas decimais, sendo os resultados da ferramenta computacional, com a finalidade de se ter melhores precisões, calculados com no máximo 4 (quatro) casas decimais. Portanto, as diferenças dos resultados na ocorreram apenas por arredondamento no resultado do programa *Flash* 1.9.

A Tabela 4-2 apresenta os resultados parciais detalhados da análise de desempenho, tanto para o *Flash* 1.9 quanto para a ferramenta *FLASHCEFET*. Os significados das siglas das variáveis físicas encontram-se descritos na lista de abreviatura, siglas e símbolos.

Com base na Tabela 4-1 e na Tabela 4-2 pode-se concluir que, conforme o esperado, a ferramenta *FLASHCEFET* gerou resultados iguais ao do *Flash* 1.9. Juntamente com outras análises realizadas, pode-se assegurar que esta ferramenta é um meio confiável para que as análises paramétricas sejam realizadas.

Flash C			FLASHCEFET – MATLAB						
Shielding Analysis				Shielding Analysis					
GFD		8,10		GFD		8,10			
Flashes	to Line	159,95		Flashes	to Line	159,9	95		
Idx	Beta	Icrit		Idx	Beta	Icrit			
1	0,93	7,79		1	0,93	7,79			
3	0,93	7,79		3	0,93	7,79			
Backflas	sh Analysis			Backflasl	h Analysis				
TS		1,111		TS		1,111			
ZT		120,06		ZT		120,06			
TU		0,0941		TU		0,0941			
ΤV	TV 3555,42			TV		3555,42			
RC		0,5248		RC		0,5248			
EC		0,0126		EC		0,0126			
GZ 387,13			GZ		387,13				
GC		244,3		GC		244,3			

Tabela 4-2 - Demais resultados do Caso Base: Flash 1.9 x FLASHCEFET
ZI		60,55		
Idx	CF	F2	F6	ТА
1	0,4170	1975,2	1462,5	0,0176
2	0,4734	1975,2	1462,5	0,0176
3	0,4170	1975,2	1462,5	0,0176

Section 1 (1.82% of line)

FR		60				
zw		20,37				
SS		8,24				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	24,21	14,64	81,57	43,9	76,36	3,69
2	21,83	14,23	90,44	12,2	82,06	0,86
3	24,21	14,64	81,57	43,9	76,36	3,69

ΖI 60,55 F2 Idx CF F6 TA 0,4170 1 1975,2 1462,5 0,0176 2 0,4734 1975,2 1462,5 0,0176 3 0,<u>41</u>70 1975,2 1462,5 0,0176

Section 1 (1.82% of line)

Section 2 (3,64% of line)

FR		60,00				
ZW		20,37				
SS		8,24				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	24,21	14,65	81,58	43,9	76,36	3,69
2	21,84	14,23	90,44	12,2	82,06	0,86
3	24,21	14,65	81,58	43,9	76,36	3,69

Section 2 (3,64% of line)

FR		45				
zw		27,77				
SS		5,31				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	20,19	12,75	97,78	43,9	91,53	2,38
2	18,20	11,52	108,52	12,2	98,46	0,55
3	20,19	12,75	97,78	43,9	91,53	2,38

Section 3 (5,45% of line)

FR		30				
ZW		36,65				
SS		2,69				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	15,39	10,26	128,31	43,9	120,1	1,21
2	13,84	9,27	142,67	12,2	129,45	0,28
3	15,39	10,26	128,31	43,9	120,1	1,21

Section 4 (7,27% of line)

FR		28				
ZW		37,97				
SS		2,39				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	14,67	9,85	134,55	43,9	125,94	1,07
2	13,19	8,90	149,67	12,2	135,79	0,25
3	14,67	9,85	134,55	43,9	125,94	1,07

FR		45,00				
zw		27,77				
SS		5,31				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	20,20	12,76	97,79	43,9	91,53	2,38
2	18,20	11,53	108,53	12,2	98,46	0,55
3	20,20	12,76	97,79	43,9	91,53	2,38

Section 3 (5,45% of line)

FR		30,00				
ZW		36,65				
SS		2,69				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	15,39	10,26	128,32	43,9	120,1	1,21
2	13,84	9,27	142,67	12,2	129,45	0,28
3	15,39	10,26	128,32	43,9	120,1	1,21

Section 4 (7,27% of line)

FR		28,00				
ZW		37,97				
SS		2,39				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	14,68	9,85	134,55	43,9	125,94	1,07
2	13,20	8,90	149,67	12,2	135,79	0,25
3	14,68	9,85	134,55	43,9	125,94	1,07

Section	Section 5 (9,09% of line)								
FR		25							
zw		40,02							
SS		1,95							
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate			
1	13,57	9,19	145,52	43,9	136,21	0,88			
2	12,19	8,30	161,98	12,2	146,96	0,20			
3	13,57	9,19	145,52	43,9	136,21	0,88			

Section 6 (10,91% of line)

FR		23				
zw		41,43				
SS		1,69				
Idx	12	16	lcrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	12,81	8,72	154,19	43,9	144,32	0,76
2	11,50	7,88	171,72	12,2	155,80	0,17
3	12,81	8,72	154,19	43,9	144,32	0,76

Section 7 (12,73% of line)

FR		20				
zw		43,63				
SS		1,31				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	11,62	7,95	169,91	44,4	159,20	0,60
2	10,42	7,19	189,41	11,1	171,77	0,12
3	11,62	7,95	169,91	44,4	159,20	0,60

Section 8 (14,55% of line)

FR		18				
ZW		45,15				
SS		1,09				
Idx	12	12 16		Prob	IcrAvg	Bfrate
1	10,80	7,40	182,77	44,4	171,26	0,50
2	9,68	6,68	203,91	11,1	184,92	0,10
3	10,80	7,40	182,77	44,4	171,26	0,50

Section 9 (16,36% of line)

FR		15							
ZW		47,51	51						
SS		0,79)						
ldx	12	16	lcrit	Prob	IcrAvg	Bfrate			
1	9,53	6,49	207,16	44,4	194,11	0,36			
2	8,53	5,87	231,47	11,1	209,91	0,07			
3	9,53	6,49	207,16	44,4	194,11	0,36			

Section 5 (9,09% of line)											
FR		25,00									
ZW		40,02									
SS		1,95									
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate					
1	13,57	9,20	145,52	43,9	136,21	0,88					
2	12,19	8,31	161,98	12,2	146,96	0,20					
3	13.57	9,20	145,52	43,9	136,21	0,88					

Section 6 (10,91% of line)

FR		23,00				
ZW		41,43				
SS		1,69				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	12,81	8,73	154,19	43,9	144,32	0,76
2	11,50	7,88	171,72	12,2	155,80	0,17
3	12,81	8,73	154,19	43,9	144.32	0.76

Section 7 (12,73% of line)

			-				
FR		20,00					
ZW		43,63					
SS		1,31					
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate	
1	11,63	7,96	169,91	44,4	159,20	0,60	
2	10,43	7,19	189,41	11,1	171,77	0,12	
3	11,63	7,96	169,91	44,4	159,20	0,60	

Section 8 (14,55% of line)

FR		18,00				
ZW		45,15				
SS		1,09				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	10,81	7,41	182,77	44,4	171,26	0,50
2	9,68	6,69	203,91	11,1	184,92	0,10
3	10,81	7,41	182,77	44,4	171,26	0,50

Section 9 (16,36% of line)

FR		15,00				
ZW		47,51				
SS		0,79				
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
1	9,53	6,50	207,16	44,4	194,11	0,36
2	8,53	5,87	231,48	11,1	209,91	0,07

Secti	on 10 (18	3,18% of	f line)				3	9,53	6,50	207,16	44,4	194,11	0,36
FR	10					Secti	on 10 (18	3,18% oʻ	f line)				
ZW		51,68					FR		10,00)			
SS		0,39			zw		51,68						
Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate	SS		0,39				
1	7,28	4,74	271,11	45,0	254,30	0,18	Idx	12	16	Icrit	Prob	IcrAvg	Bfrate
2	6,49	4,28	304,13	10,0	275,69	0,03	1	7,29	4,75	271,11	45,0	254,30	0,18
3	7,28	4,74	271,11	45,0	254,30	0,18	2	6,49	4,29	304,13	10,0	275,69	0,03
							3	7,29	4,75	271,11	45,0	254,30	0,18
Sumi	mary of I	Results											

Flas	Flashovers per 100 km per year								
	BFR								
	0,01								
	1,56								
	Shielding	Angles							
Phaseldx	ShieldIdx	Required	Actual						
1	1	28,07	28,56						
3	3 2 28,07 28,56								

Summary of Results									
Flashovers per 100 km per year									
BFR 1,5544									
	0,0061								
	1,5605								
	Shielding	g Angles							
PhaseIdx	ShieldIdx	Required	Actual						
1 1 28,0708 28,5619									
3	2	28,0708	28,5619						

4.4 – Análises Paramétricas

4.4.1 – Introdução

Com o objetivo de verificar os principais parâmetros responsáveis por maiores impactos no desempenho das linhas de transmissão, algumas análises paramétricas são realizadas.

Para o cálculo da densidade de descargas por km^2 por ano em uma determinada região, o *Flash* 1.9 utiliza a formulação representada pela equação (2-1), porém, como já foi visto, uma melhor relação entre T_d e N_g é proposta para a região de Minas Gerais, como mostrado na Tabela 2-3.

Assim, as análises de sensibilidade são processadas em duas situações:

i) Primeiramente, utiliza-se a formulação de N_g clássica, empregada nos cálculos do programa *Flash* (N_g =0,04 $T_d^{1,25}$);

ii) Em um segundo momento utiliza-se, para os mesmos parâmetros de entrada, a formulação de N_g compatível com a região de Minas Gerais (N_g =0,03 $T_d^{1,12}$).

Em ambas as situações, quando possível, o valor do parâmetro do caso base é acrescido e decrescido com os mesmos percentuais, sendo alguns desses valores hipotéticos e não usuais em termos práticos. No entanto, decidiu-se utilizar as mesmas alterações para comparar quais os parâmetros têm maior e menor influência no desempenho de uma linha de transmissão.

Na sequência, são analisados os parâmetros relacionados com as descargas atmosféricas e, posteriormente os parâmetros relacionados com as linhas de transmissão.

4.4.2 – Sensibilidade ao Índice T_d

O índice T_d, nível ceráunico (dias de trovoadas por ano), em casos de cálculo de desempenho de linhas, ainda é, em termos práticos, o parâmetro mais utilizado para a indicação da frequência de incidência de descargas atmosféricas em uma determinada região. Este é obtido por meio da estatística acumulada por longos períodos de observação para cada região.

Conforme apresentado no Capítulo 2, para o cálculo do desempenho de linhas, diversos estudos foram realizados para estabelecer relações entre o nível ceráunico (T_d) e a densidade de descargas na região (N_g) . Muitas são as formulações propostas, conforme se pode observar na Tabela 2-3. Então, considerando o valor médio da região de Minas Gerais $(T_d=70)$ e adotando valores acrescidos de 100, 75, 50 e 25% do caso base e valores diminuídos de 25, 50 e 75% do caso base, são analisadas duas situações dos resultados do desempenho da linha; são elas:

i) Utilizando a formulação clássica de N_q - Flash 1.9;

ii) Utilizando a formulação de N_g para a região de Minas Gerias.

Os resultados são apresentados na Tabela 4-3 e na - Influência dos níveis de T_d na taxa total de desligamento da linha.Figura 4-4. De acordo com os resultados, pode-se observar que:

- Conforme esperado, para ambas as formulações de N_g adotadas, o aumento do nível ceráunico provoca maior número de desligamento da linha, acarretando um pior desempenho da mesma.
- O aumento do número das taxas de desligamento (*backflashover*, *flashover* e total) não segue a mesma proporção de crescimento de T_d, para ambas as formulações.

91

т.	N _g =	0,04 x T _d ^{1,25}		N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}				
٩	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total		
140	3,6969	0,0146	3,7115	1,4585	0,0058	1,4643		
122,5	3,1286	0,0124	3,1410	1,2559	0,0050	1,2609		
105	2,5803	0,0102	2,5905	1,0568	0,0042	1,0609		
87,5	2,0544	0,0081	2,0625	0,8616	0,0034	0,8650		
70	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737		
52,5	1,0849	0,0043	1,0892	0,4862	0,0019	0,4881		
35	0,6535	0,0026	0,6561	0,3087	0,0012	0,3100		
17,5	0,2748	0,0011	0,2759	0,1421	0,0006	0,1426		

Tabela 4-3 – Influência de T_d no nível das taxas de desligamento por *backflashover*, *flashover* e taxa total [desligamentos/100 km/ano].



Figura 4-4 - Influência dos níveis de T_d na taxa total de desligamento da linha.

- Com as formulações utilizadas para o cálculo de N_g, à medida que o valor de T_d aumenta, verifica-se que as três taxas de desligamento são maiores para a formulação clássica (N_g=0,04T_d^{1,25} adotada pelo *Flash*).
- Utilizando-se a formulação clássica de N_g e adotando-se como valor de T_d 70, obtém-se valor de N_g aproximadamente a 8 descargas/km²/ano. No entanto, se for considerada a formulação de N_g sugerida para a região de Minas Gerais (N_g=0,03T_d^{1,12}) e o mesmo valor de T_d (70), tem-se como resultado de N_g, 3,5. Valor este muito próximo do valor contabilizado por meio de sistemas de detecção e localização de descargas (4 descargas/km²/ano), segundo [22].
- Verifica-se, então, que os resultados gerados utilizando a formulação clássica de N_g são mais conservadores, maiores que os resultados

esperados para a referida região. Seu crescimento se dá em uma taxa um pouco maior que o crescimento quando se utiliza a formulação para Minas Gerais, conforme ilustrado na Figura 4-4.

• Nota-se que o crescimento de ambas as curvas não é linear.

4.4.3 – Sensibilidade à Probabilidade Cumulativa IP

Outro parâmetro de interesse prático relativo às descargas atmosféricas é a distribuição de probabilidade cumulativa para o pico de corrente $P(I \ge I_P)$, considerado pelo *Flash* de acordo com a equação (2-3). Avaliando o caso de interesse do presente trabalho (avaliação do desempenho de linha de transmissão típica de Minas Gerais), são comparados os resultados obtidos para a taxa de desligamento a partir das equações (2-3) e (2-4) para o cômputo da distribuição de probabilidade cumulativa de I_P transcritas a seguir:

P (I ≥ I_P) =
$$\frac{1}{1 + (\frac{I_P}{31})^{2.6}}$$
 (Flash 1.9 – equação (2-3))

$$P(I \ge I_P) = \frac{1}{1 + {\binom{I_P}{45}}^{4,7}}$$
 (Minas Gerais – Morro do Cachimbo – equação (2-4))

Dessa forma, a Tabela 4-4 expressa os resultados das taxas de desligamento utilizando-se como dados de entrada do programa:

i) Formulação clássica de N_g (densidade de descargas atmosféricas) e formulação da probabilidade cumulativa do pico da corrente, conforme (2-3) – caso base;

 ii) Formulação clássica de N_g e formulação da probabilidade cumulativa do pico da corrente proposta para região de Minas Gerais (2-4);

iii) Formulação de N_g proposta para o estado de Minas Gerais e formulação
 (2-3) para a probabilidade cumulativa do pico da corrente;

iv) Formulação de N_g proposta para o estado de Minas Gerais e formulação
 (2-4) para a probabilidade cumulativa do pico da corrente.

la la	N _g = 0,	04 x T _d ^{1,25}		N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}			
۱p	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total	
$P(I \ge I_P) = 1/(1 + (I_P/31)^{2,6})$	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737	
$P(I \ge I_P) = 1/(1 + (I_P/45)^{4,7})$	0,5126	0,0002	0,5127	0,2213	0,0001	0,2214	

Tabela 4-4 – Influência da Probabilidade Cumulativa, no nível das taxas de desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100 km/ano].

Pela análise da Tabela 4-4 pode-se perceber que:

- Ao considerar a mesma formulação de N_g, o número de desligamentos é menor para a expressão da probabilidade cumulativa de I_P proposta por medições realizadas no Morro do Cachimbo (2-4) (para as três taxas de desligamentos), o que acarreta um melhor desempenho da linha.
- Uma mesma proporção (cerca de três vezes) é observada para as taxas de *backflashover* e total ao se considerar as duas diferentes formulações para a probabilidade cumulativa de I_P.
- A taxa de desligamentos tende a ser maior (cerca de duas vezes) ao se considerar a formulação clássica de N_a.
- Ao se comparar os resultados utilizando as fórmulas do *Flash* com os resultados a partir das formulações propostas para a região de Minas Gerais, a taxa de desligamentos por *flashover* diminui aproximadamente 60 (sessenta) vezes e as taxas de desligamento por *backflashover* e total diminuem aproximadamente 7 (sete) vezes.
- O último item evidencia que os resultados propostos pelo *Flash* são bastante conservadores, uma vez que ao considerar ambas as formulações (N_g e probabilidade cumulativa de I_P) o desempenho total da linha diminui em 7 (sete) vezes.

Com os resultados obtidos na análise acima, surgiu a necessidade de estudar com mais detalhes a influência de $P(I \ge I_P)$ nas taxas de desempenho. Desta forma, resolveu-se analisar o seguinte caso: mesmos parâmetros de entrada descritos na seção 4.2, porém com os valores das resistências de aterramento compreendidos entre 9 e 390 Ω . Os resultados obtidos desta análise são expressos na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 - Influência da Probabilidade Cumulativa, no nível das taxas de desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100 km/ano], para outros valores de resistência de ateramento

	N _g = 0	,04 x T d ^{1,25}		N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}		
ιp	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total
$P(I \ge I_P) = 1/(1 + (I_P/31)^{2,6})$	7,8456	0,0061	7,8517	3,3871	0,0026	3,3897
$P(I \ge I_P) = 1/(1 + (I_P/45)^{4,7})$	10,3411	0,0002	10,3413	4,4644	0,0001	4,4645

Ao se comparar os resultados representados na Tabela 4-4 e na Tabela 4-5, pode-se perceber que à medida que o valor da resistência de aterramento aumenta a taxa de *backflashover* aumenta.

Ademais, com a Tabela 4-5 comprova-se que para valores altos de resistência de aterramento a taxa de *backflashover* é mais elevada para a formulação de probabilidade cumulativa para o pico de corrente $P(I \ge I_P)$ proposta pela CEMIG, para a região de Minas Gerais, quando comparada com as taxas oriundas da consideração de $P(I \ge I_P)$ clássica, utilizada pelo *Flash*.

4.4.4 – Sensibilidade à Resistência de Aterramento

Um elemento essencial para o bom desempenho de um sistema de transmissão é o seu aterramento elétrico, fornecendo assim um caminho seguro, de baixa impedância, em direção a terra para as correntes provenientes de descargas atmosféricas.

Como é sabido o aterramento é modelado no *Flash* por meio de suas resistências, que podem ser calculados por diversas fórmulas aproximadas ou obtidas por meio de medições. As distribuições estatísticas das resistências de aterramento (ou resistências de pé da torre) utilizadas no caso base estão representadas na Figura 2-16, que foram obtidas pela CEMIG por meio de medições.

Com o objetivo de se fazer uma análise da influência da resistência de aterramento no cálculo do desempenho de uma linha de transmissão, são analisados, a partir do caso base, valores com acréscimo de 100, 75, 50 e 25%, e valores com decréscimo de 25, 50 e 75%. Os resultados são expressos na Tabela 4-6 e ilustrados na Figura 4-5.

Resistências de	N _g = 0),04 x T d ^{1,25}		N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}			
Pé da Torre	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total	
100%	4,7984	0,0061	4,8045	2,0715	0,0026	2,0742	
75%	3,9075	0,0061	3,9137	1,6869	0,0026	1,6896	
50%	3,0576	0,0061	3,0637	1,3200	0,0026	1,3227	
25%	2,2661	0,0061	2,2722	0,9783	0,0026	0,9810	
Caso Base	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737	
-25%	0,9472	0,0061	0,9534	0,4089	0,0026	0,4115	
-50%	0,4729	0,0061	0,4791	0,2042	0,0026	0,2068	
-75%	0,1587	0,0061	0,1648	0,0685	0,0026	0,0712	

Tabela 4-6 – Influência das resistências de pé da torre no nível das taxas de desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/100 km/ano].



Figura 4-5 – Influência dos valores de resistência de pé da torre na taxa total de desligamento da linha.

Observando os resultados apresentados na Tabela 4-6 e na Figura 4-5, as seguintes alusões podem ser explicitadas:

- Para ambas as formulações de N_g adotadas, o aumento da resistência de aterramento provoca maior número de desligamentos totais da linha, acarretando um pior desempenho da mesma. Com o aumento do valor da resistência de aterramento, o coeficiente de reflexão na base da torre é maior (menos negativo) e, assim, a tensão refletida tem menor contribuição na diminuição da tensão na cadeia de isoladores.
- A taxa *flashover* se manteve constante ao variar a resistência de aterramento. Este resultado é esperado, pois o aterramento não influencia no *flashover*.

- O crescente aumento no valor da resistência de aterramento não conduz ao acréscimo na mesma proporção das taxas de desligamento da linha.
- Observando as formulações utilizadas para o cálculo de N_g, à medida que os valores das resistências de aterramento aumentam, verifica-se que as taxas de desligamento são maiores para a formulação clássica, conforme esperado, considerando que o N_g estabelecido por tal formulação é quase duas vezes maior que o N_g estabelecido pela formulação proposta para o ambiente de Minas Gerais.

4.4.5 – Sensibilidade à Altura da Torre

Outro importante parâmetro que deve ser considerado na análise de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas se refere à geometria da torre: sua altura. A mudança na altura da torre acarreta a alteração do seu raio da base e, consequentemente, sua impedância também se altera. Ademais, a altura da torre influencia também na altura de instalação dos cabos fase e cabos para-raios, o que afeta diretamente no cálculo da taxa de *flashover*.

A altura da torre tem influência, também, no tempo de tráfego da corrente de descarga pela mesma, o que afeta os valores de sobretensão em pontos específicos da torre (topo, braços e base).

Com o objetivo de verificar o desempenho da linha diante da alteração da altura da torre, são expressos os resultados das taxas de desligamento para alturas 100, 75, 50 e 25% maiores que o caso base (24 m) e alturas 25, 50 e 75% menores que o caso base. É importante salientar que ao diminuir e aumentar a altura da torre varia-se apenas uma parte de sua estrutura, já que a parte conhecida como cabeça da torre é fixa. Os resultados para as variações anteriormente mencionadas são apresentados na

Tabela 4-7 e na Figura 4-6.

Com tais resultados pode-se verificar que:

Para ambas as formulações de N_g adotadas, o aumento da altura da torre provoca maior número de desligamentos da linha. Com o aumento da altura da torre, o tempo de tráfego da onda de tensão na mesma aumenta e, assim, o tempo em que a onda de tensão refletida na base da torre se sobrepõe à sobretensão na cadeia de isoladores é maior. Tal fato conduz a um maior crescimento desta sobretensão. A variação na altura da torre influencia, também, a impedância de surto da mesma. Porém, como pode

ser observado na Figura 2-15 este parâmetro tem, em termos práticos, influência moderada no valor de impedância.

Altura da Torre	N _g = 0),04 x T d ^{1,25}		N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}			
[m]	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total	
35,500	2,0886	2,5273	4,6159	0,9017	1,0911	1,9928	
32,625	1,9428	1,5394	3,4822	0,8387	0,6646	1,5033	
29,750	1,8007	0,7187	2,5194	0,7774	0,3103	1,0877	
26,875	1,6726	0,2152	1,8878	0,7221	0,0929	0,8150	
24,000	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737	
21,125	1,4503	0,0000	1,4503	0,6261	0,0000	0,6261	
18,250	1,3594	0,0000	1,3594	0,5869	0,0000	0,5869	
15,375	1,3055	0,0000	1,3055	0,5636	0,0000	0,5636	

Tabela 4-7 – Influência da altura da torre no nível das taxas de desligamento por *backflashover*, *flashover* e taxa total [desligamentos/100 km/ano].



Figura 4-6 - Influência da altura da torre na taxa total de desligamento da linha.

- O aumento na taxa de *flashover* devido aos acréscimos na altura da torre acontece de forma não linear, porém obedece a mesma proporção para ambas as formulações.
- Para alturas elevadas, a taxa de *flashover* é superior à de *backflashover*.
- O crescimento não linear das taxas de *backflashover* e taxa total de desligamentos não segue a mesma proporção de crescimento da altura da torre.
- O crescimento da taxa total de desligamento é proporcional ao crescimento da taxa de *backflashover* para alturas de torres nas quais a taxa de *flashover* é nula.

 Observando as formulações utilizadas para o cálculo de N_g, à medida que a altura da torre aumenta, verifica-se que as taxas de desligamentos (*backflashover*, *flashover* e total) são maiores para a formulação clássica (N_g=0,04T_d^{1,25} adotada pelo *Flash*), conforme esperado, considerando que o N_g estabelecido pela formulação clássica é mais que duas vezes maior que o N_g calculado pela formulação de Minas Gerais.

4.4.6 – Sensibilidade ao Comprimento da Cadeia de Isoladores

A coordenação de isolamento é um importante estudo realizado num projeto de sistema elétrico. Seu objetivo é separar, por meio de distâncias elétricas seguras, mediante o uso de cadeia de isoladores, os condutores e partes aterradas, em condições normais de funcionamento (à frequência industrial) e em solicitações decorrentes de sobretensões, como impulsos injetados no sistema a partir das descargas atmosféricas. Caso o nível básico de isolamento da cadeia de isoladores de determinada torre não suporte a sobretensão causada pela injeção do surto atmosférico no sistema, ocorre, assim, o rompimento desta cadeia, causando desligamento da linha. Assim, o comprimento dos isoladores influencia no nível de isolamento, conforme mostrado na Figura 2-9. Vale frisar que, de acordo com o IEEE [5], a avaliação de suportabilidade da cadeia de isoladores baseia-se no método dos dois pontos relativos aos tempos de 2 e 6 μs.

Sabendo da importância deste parâmetro para o desempenho de linhas, diferentes valores de comprimentos das cadeias de isoladores (100, 75, 50 e 25% maiores que o caso base (2,5 m) e 25, 50 e 75% menores que o caso base) são apresentados na Tabela 4-8 e na Figura 4-7.

Pode-se constatar, então, que:

- Conforme esperado, para ambas as formulações de N_g adotadas, o aumento da cadeia de isoladores provoca menor número de desligamentos da linha, acarretando em um melhor desempenho da mesma.
- Diminuindo o comprimento da cadeia de isoladores, a taxa de *flashover* aumenta (sendo nula para casos com uma cadeia de isoladores com comprimentos grandes). Este aumento é não linear, mas obedece a mesma proporção para ambas as formulações

Comp. Cadeia	$N_g = 0.04 \times T_d^{1.25}$			N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}			
Isoladores [m]	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total	
5,000	0,2520	0,0000	0,2520	0,1088	0,0000	0,1088	
4,375	0,3536	0,0000	0,3536	0,1526	0,0000	0,1526	
3,750	0,5263	0,0000	0,5263	0,2272	0,0000	0,2272	
3,125	0,8511	0,0000	0,8511	0,3674	0,0000	0,3674	
2,500	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737	
1,875	3,4319	0,2799	3,7118	1,4816	0,1208	1,6025	
1,250	10,4212	0,9402	11,3614	4,4990	0,4059	4,9049	
0,625	50,4690	1,8187	52,8770	21,7883	0,7851	22,5735	

Tabela 4-8 – Influência do comprimento da cadeia de isoladores no nível das taxas de desligamento por *backflashover*, *flashover* e taxa total [desligamentos/ 100 km/ano].



Figura 4-7 - Influência do comprimento da cadeia de isoladores na taxa total de desligamento da linha .

- Com menor comprimento da cadeia de isoladores, a taxa de backflashover e a taxa total sofrem acréscimos não lineares, mas que obedecem a mesma proporção para ambas as formulações.
- O aumento do número de desligamentos (*backflashover*, *flashover* e total) não tem proporcionalidade com o crescimento do comprimento da cadeia de isoladores.
- Ao adotar valores diferentes para o comprimento da cadeia de isoladores, obtém-se uma mesma variação para as taxas de desligamento (*backflashover, flashover* e taxa total), utilizando a formulação de N_g clássica e a formulação de Minas Gerais.

 Verifica-se que os resultados gerados utilizando a formulação clássica de N_g são mais conservadores, sendo cerca de duas vezes maior que os resultados esperados para a referida região.

4.4.7 – Sensibilidade ao Comprimento do Vão

Mesmo considerando que a probabilidade da incidência de uma descarga atmosférica ser maior na torre que no vão (na perspectiva de modelagem adotada no *Flash*), o comprimento do vão é um parâmetro interessante para se analisar quanto a sua influência no desempenho da linha.

Uma descarga que incide no meio do vão, entre torres, pode ser capaz de provocar sobretensões entre o cabo para-raios e o cabo fase no ponto da incidência bastante superior à sobretensão resultante na cadeia de isoladores devido à incidência direta na torre (pode ultrapassar até 4 vezes segundo referência [22]).

Isto explica o interesse de análise de tal parâmetro. Para isso são analisados vãos com comprimentos maiores 25, 50, 75 e 100% que o caso base (300 m) e 25, 50 e 75% menores que o caso base.

Por meio da Tabela 4-9 e da Figura 4-8 observa-se que:

Em ambas as formulações de N_g adotadas, conforme esperado, para grandes comprimentos de vão têm-se um número maior de desligamento por *backflashover* e total, acarretando em pior desempenho da mesma. Isto ocorre porque maiores são os tempos para que as reflexões de tensão (negativas) nas torres adjacentes contribuam para a diminuição da sobretensão no topo da torre e, assim, na cadeia de isoladores.

Comp. Vão [m]	N _g = 0,04 x T _d ^{1,25}			N _g = 0,03 x T _d ^{1,12}			
	Backflashover	Flashover	Total	Backflashover	Flashover	Total	
600	3,0221	0,0000	3,0221	1,3047	0,0000	1,3047	
525	2,7010	0,0000	2,7010	1,1660	0,0000	1,1660	
450	2,3510	0,0000	2,3510	1,0150	0,0000	1,0150	
375	1,9691	0,0000	1,9691	0,8501	0,0000	0,8501	
300	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737	
225	1,2492	0,1512	1,4003	0,5393	0,0653	0,6045	
150	1,2568	0,3881	1,6448	0,5426	0,1675	0,7101	
75	1,2592	0,6368	1,8959	0,5436	0,2749	0,8185	

Tabela 4-9 – Influência do comprimento do vão no nível das taxas de desligamento por backflashover, flashover e taxa total [desligamentos/ 100 km/ano].





- Para valores pequenos de vão, a taxa de *backflashover* e a taxa total de desligamento até um determinado valor de comprimento tende a diminuir. A partir deste valor ótimo, ambas as taxas tendem a aumentar de maneira não linear, porém com a mesma taxa de crescimento para ambas as formulações. Este comportamento decorre da combinação entre os tempos de frente da corrente injetada (2 µs), de tráfego na torre e no vão, que influenciam os tempos de sobreposição das ondas de tensão refletidas nos pontos de descontinuidade de impedância.
- A taxa de *flashover* aumenta com a diminuição do comprimento do vão.
 Para valores grandes de vão esta taxa é nula.
- O aumento do número de desligamentos (backflashover, flashover e total) não segue a mesma proporção de crescimento do comprimento do vão.
- O crescimento das taxas de desligamento (*backflashover*, *flashover* e total) não é linear e obedece a mesma proporcionalidade para ambas as formulações de N_{g.}

É muito importante enfatizar que todos os resultados anteriores são decorrentes da consideração de um valor médio de T_d típico de Minas Gerais (70) para ambas as formulações de N_g, do *Flash* 1.9 e de Minas Gerais. Evidentemente, caso seja feita uma análise paramétrica similar considerando as formulações de N_g do *Flash*, para regiões com valores médios de T_d inferiores (vide Tabela 2-1 e Tabela 2-3), e N_g de Minas Gerais com T_d = 70, os resultados de desempenho são mais conservadores (maiores índices) no caso das formulações de Minas Gerais. A motivação de manter T_d fixo em todas as análises é ilustrar a importância de se

considerar parâmetros de descargas atmosféricas típicas da região onde a linha de transmissão está inserida, ao invés da utilização de estatísticas levantadas em outras regiões. Caso outro valor de T_d seja utilizado, os resultados quantitativos, evidentemente, são alterados; todavia, as análises qualitativas (sensibilidade/paramétrica) são similares às apresentadas nesta seção.

4.5 – Análise Comparativa

Neste capítulo são apresentadas algumas análises relativas ao desenvolvimento das avaliações do desempenho de linhas de transmissão quando submetidas a surtos atmosféricos.

No estudo elaborado, o parâmetro T_d (nível ceráunico) relativo às descargas atmosféricas e os parâmetros de resistências de aterramento, altura da torre, comprimento da cadeia de isoladores e comprimento do vão, relativos às linhas de transmissão, são aumentados em 100, 75, 50 e 25% e diminuídos em 25, 50 e 75% dos valores do caso base (Figura 4-2 e Figura 4-3). Estas variações são propostas para fins de comparação e análise do desempenho da linha sob diversas situações. Tais análises são executadas seguindo dois diferentes métodos para o cômputo de N_g (densidade de descarga):

i) Formulação clássica (adotada pelo Flash 1.9);

ii) Formulação proposta para região de Minas Gerais.

Ao se traçar um gráfico com diversos valores de T_d para as formulações de densidades de descargas, N_g, proposta pelo CIGRÉ – equação (2-3), utilizada no *Flash* (formulação clássica), e a proposta pela CEMIG para o estado de Minas Gerais – equação (2-4), encontra-se as seguintes curvas respresentadas na Figura 4-9.



Figura 4-9 – Curvas N_g x T_d para a formulação do CIGRÈ e da CEMIG.

Pela Figura 4-9 pode-se concluir que a formulação utilizada no *Flash,* apresenta resultados bem mais conservadores do que quando se utiliza a formulação proposta pela CEMIG, principalmente para valores altos de T_d. Observa-se então que, para um valor médio de T_d do estado de Minas Gerais (70), o resultado calculado para formulação clássica é duas vezes maior que aquele da formulação proposta pela CEMIG. Tendo em vista que o N_g medido na região mineira é de 4, constata-se evidentemente uma melhor adequação da formulação da CEMIG para estudos de desempenho de linhas de transmissão situadas no estado de Minas Gerais.

Outro parâmetro que deve ser considerado é a função distribuição de probabilidade cumulativa do pico de corrente ($P[I \ge I_P]$): normalmente, o Flash utiliza resultados de medição realizados em San Salvatore, na Suíça, por K. Berger, que indicam um valor mediano de pico de corrente de descarga atmosférica de aproximadamente 30 kA. Por outro lado, medições realizadas no Brasil, mais especificamente em Minas Gerais, na Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo, resultaram em um valor mediano de 45 kA. Com os estudos realizados, pode-se constatar que existe uma profunda relação entre a resistência de aterramento e o valor da corrente crítica da descarga atmosférica capaz de causar disrupção nas cadeias de isoladores. Após inúmeras simulações computacionais, verificou-se que para aterramentos elétricos com baixos valores de resistências, somente correntes críticas acima de aproximadamente 70 kA provocam disrupção nas cadeias de isoladores; por outro lado, em regiões que apresentam

aterramentos com valores maiores de impedância, correntes menores que 70 kA são suficientes para ocasionar disrupção.

A Figura 4-10 ilustra os comportamentos de P[I \ge I_P] para as formulações do CIGRÉ e da CEMIG.



Figura 4-10 – Comportamento das funções de distribuição de probabilidade cumulativa do pico de corrente Flash (CIGRÉ - clássica) x CEMIG (MG)

O comportamento das funções de distribuição de probabilidade cumulativa do pico de corrente utilizadas pelo *Flash* (CIGRÉ) e pela CEMIG apresentam uma transição de comportamento justamente em torno de 70 kA (Figura 4-10): abaixo de 70 kA esta função é maior para o caso das medições realizadas no Brasil e acima de 70 kA o domínio passa a ser das medições realizadas por K. Berger na Suíça. Este comportamento tem impacto direto no cálculo do desempenho final da linha, pois para correntes abaixo de 70 kA a utilização da probabilidade cumulativa levantada de medições no Brasil gera maiores taxas de desligamento, enquanto para correntes acima de 70 kA aquela oriunda das medições da Suíça apresenta taxas maiores. Portanto, considerando que a região de Minas Gerais possui um solo com resistividade elevada, valor médio de 2.400 Ω . m (atingindo, em alguns lugares, valores superiores a 10.000 Ω . m), os valores das impedâncias de aterramento determinam que correntes para causar disrupção nas cadeias de isoladores. Este fato explica os comportamentos apresentados na Tabela 4-4 e na Tabela 4-5.

Os gráficos, apresentados nas figuras seguintes, resumem as taxas de desligamento por *backflashover*, *flashover* e taxa total para diversos parâmetros. Por meio desses gráficos, é possível verificar a influência de cada um dos parâmetros nas diversas condições citadas acima.

A Figura 4-11 (a) e (b) ilustra as influências em questão sobre a taxa de backflashover.



Figura 4-11 – (a) Taxa de desligamento por *backflashover* segundo variações nos parâmetros: T_d, resistência de pé da torre, altura da torre, comprimento do vão e comprimento da cadeia de isoladores. (b) Figura 4-11-(a) em detalhe, com escala vertical ampliada.

Analisando a Figura 4-11 (a) e (b) percebe-se que:

 O parâmetro que mais influencia no cálculo do número de desligamento por *backflashover* é o comprimento da cadeia de isoladores. O aumento da cadeia de isoladores acarreta em uma baixa taxa de *backflashover* (0,1088 desligamentos/100 km/ ano).

- A diminuição da cadeia de isoladores, em contrapartida, causa uma taxa de desligamento por *backflashover* bastante elevada (21,7883 desligamentos/100 km/ano).
- Outro parâmetro de grande influência no cálculo da taxa de backflashover é a resistência de pé da torre. Para os menores valores de resistência, constata-se a menor taxa de backflashover (0,0685 desligamentos/100 km/ano).
- Dentre os parâmetros adotados para análise do desempenho de linhas neste trabalho, a altura da torre é o parâmetro de menor influência para o computo da taxa de *backflashover*. Sua variação é de apenas 0,3381 do menor para o maior valor.

A Figura 4-12 (a) e (b) mostra as análise paramétricas em relação à taxa de *flashover*. Pode-se verificar que:

- O parâmetro que mais influencia no cálculo do número de desligamento por *flashover* é a altura da torre. O aumento da altura da torre acarreta em uma alta taxa de *flashover*, e sua diminuição anula tal taxa.
- Outro parâmetro de grande influência no cálculo da taxa de *flashover* é o comprimento da cadeia de isoladores. Para menores valores de comprimentos da cadeia de isoladores constata-se maior taxa de *flashover* (0,7851 desligamentos/100 km/ano). Para comprimentos de cadeia de isoladores grandes tal taxa é nula.
- A variação dos parâmetros de T_d e de resistência de pé da torre não condicionam taxa de *flashover* nula, porém resultam nos menores valores computados para essa taxa nas diversas situações analisadas.
- Dentre os parâmetros adotados para análise do desempenho de linhas neste trabalho, a variação na resistência de pé da torre não ocasiona alteração para a taxa de *flashover*, em todas as situações analisadas.



(b)

Figura 4-12 - (a) Taxa de desligamento por *flashover* segundo variações nos parâmetros: T_d, resistência de pé da torre, altura da torre, comprimento do vão e comprimento da cadeia de isoladores. (b) Figura 4-12-(a) em detalhe, com escala vertical ampliada.

A Figura 4-13 apresenta as análises paramétricas em relação à taxa de desligamento total. Constata-se que:

 O parâmetro que mais influencia no cálculo do número total de desligamento da linha é o comprimento da cadeia de isoladores. O aumento da cadeia de isoladores acarreta um bom desempenho da linha de transmissão. Vale salientar que a diminuição da cadeia de isoladores causa uma taxa total de desligamento muito elevada (22,5735 desligamentos/100 km/ano).

- Outro parâmetro de grande influência no cálculo da taxa total de desligamento é a resistência de pé da torre. Para os menores valores de resistência constata-se o melhor desempenho da linha (0,0712 desligamentos/100 km/ano).
- Sabendo-se que a taxa total é a somatória das taxas de backflashover e de flashover, pode-se constatar uma influência mais significativa da altura da torre na taxa total, do que para a taxa de backflashover. Isto ocorre porque a taxa de flashover tem uma maior influência quando se varia o comprimento vertical da torre.





Figura 4-13 – (a) Taxa de desligamento total segundo variações nos parâmetros: T_d, resistência de pé da torre, altura da torre, comprimento do vão e comprimento da cadeia de isoladores. (b) Figura 4-13-(a) em detalhe, com escala vertical ampliada.

Para tais análises, é importante frisar que os resultados mencionados nos gráficos representados pelas Figura 4-11, Figura 4-12 e Figura 4-13, quando obtidos para a formulação clássica de N_g, possuem comportamentos similares ao caso analisado acima (N_g proposto para o ambiente de Minas Gerais).

A tendência qualitativa dos resultados apresentadas neste capítulo estão em consonância com o estudo apresentado em [147].

As mesmas análises paramétricas realizadas neste capítulo para uma linha de transmissão da CEMIG de 230 kV foram realizadas para outras linhas da CEMIG de outros níveis de tensão (69, 138, 345 e 500 kV). Os resultados qualitativos seguiram a mesma tendência dos apresentados neste capítulo.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

5.1 – Considerações Preliminares

Neste trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais pontos a serem trabalhados quando se estuda desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Inicialmente, são descritos os aspectos gerais dos pontos em questão e, em seguida, as principais aproximações realizadas no programa *Flash* versão 1.9, criado pelo IEEE. Este pacote computacional é reconhecido tanto por parte dos usuários e concessionárias de energia, como por parte dos estudiosos e pesquisadores de desempenho de linhas frente às descargas, confirmando assim, a sua intensa aplicação. Todavia, a confiabilidade de suas aproximações deve ser objeto de estudos futuros, conforme destacado no Capítulo 2 desta dissertação.

No Capítulo 2, é realizado, também, um estudo do estado da arte, seguindo a sequência de cálculos implementada no programa Flash 1.9, dos parâmetros das descargas atmosféricas e das linhas de transmissão, que são necessários para o cálculo das taxas de backflashover. de flashover е taxa total (backflashover + flashover). O cálculo da taxa de flashover baseia-se nos conceitos do modelo eletrogeométrico, que é um modelo para cômputo de exposição de estruturas às descargas atmosféricas, fundamentado no estabelecimento de uma relação entre os parâmetros elétricos das descargas e os parâmetros geométricos das estruturas. O cálculo da taxa de backflashover pauta-se no cálculo do transitório eletromagnético estabelecido na linha de transmissão, em decorrência da incidência direta da descarga atmosférica.

Com tal estudo pode-se perceber que os parâmetros adotados caracterizam o comportamento das linhas de transmissão submetidas a surtos atmosféricos e que eles causam efeitos nocivos a todo sistema elétrico.

Assim, percebe-se que um estudo para o projeto de linhas de transmissão abrange muitos parâmetros, não apenas os ligados ao projeto das linhas, tornando, na maioria das vezes, as metodologias que calculam o desempenho das linhas de transmissão bastante complexas e trabalhosas. Isto explica diversas aproximações que são utilizadas no programa *Flash* 1.9.

Com uma finalidade didática e para facilitar o manuseio, no Capítulo 3, tem-se a implementação de uma ferramenta computacional – *FLASHCEFET* – tomando como base o programa *Flash* 1.9, além do desenvolvimento de uma interface gráfica mais amigável ao usuário.

Fazendo uso da ferramenta *FLASHCEFET*, no Capítulo 4 são analisados diversos parâmetros para se obter um estudo mais detalhado para projetos de linhas de transmissão visando contribuir para o entendimento, e posterior diminuição em uma etapa futura, do número de interrupções no fornecimento de energia elétrica devido a surtos atmosféricos, e tornando, os Sistemas Elétricos de Potência mais confiáveis e eficazes. Tal ferramenta possibilita a verificação de quais parâmetros causam maiores impactos nas taxas de desempenho de linhas de transmissão, objeto dos resultados de análise de sensibilidade apresentada no Capítulo 4.

5.2 – Principais Resultados

O cálculo do desempenho de linhas de transmissão proposto neste trabalho utiliza diversos parâmetros relacionados tanto com as descargas atmosféricas quanto com as linhas de transmissão. E esses parâmetros possuem maior ou menor influência no cálculo do número de desligamentos de linha de transmissão.

Ao se considerar o número de desligamentos causados por *backflashover*, pode-se destacar a tamanha influência do comprimento da cadeia de isoladores. Isso é justificável uma vez que o tamanho da cadeia de isoladores determina o valor máximo de sobretensão suportada por esta coordenação de isolamento [5]. Para um baixo valor de comprimento da cadeia de isoladores, a sobretensão que esta suporta é baixa, aumentando a probabilidade de desligamento da linha. Outro parâmetro que influencia significativamente na taxa de *backflashover* é a resistência de aterramento (resistência de pé da torre). O aumento do valor da resistência de aterramento faz com que o coeficiente de reflexão na base da torre seja maior (menos negativo) e, assim, a tensão refletida tem menor contribuição na diminuição da tensão na cadeia de isoladores. Logo, para menores valores de resistências de aterramento melhor o desempenho da linha. Os demais parâmetros possuem uma influência moderada na taxa de *backflashover*, seguindo tal ordem: nível ceráunico, comprimento do vão e altura da torre.

Analisando a de *flashover* a altura da torre é o parâmetro com maior influência no cálculo desta taxa. Alterando-a, toda a geometria da linha é alterada, afetando no

cálculo do modelo eletrogeométrico que está diretamente ligado ao cômputo de desligamentos por *flashover*. Seguido da altura da torre, o comprimento da cadeia de isoladores influencia no cálculo desta taxa, prosseguido do comprimento do vão. O nível ceráunico exerce pouca influência sobre o cálculo desta taxa e a resistência de aterramento não influencia, mantendo seu valor constante. A baixa taxa de *flashover* se deve ao uso de 2 (dois) cabos para-raios, bem posicionados. No entanto, para torres com apenas 1 (um) cabo para-raios ou sem cabos para-raios a taxa de *flashover* se torna mais expressiva no cômputo do desempenho da linha [144-146]

Considerando, então, o número de desligamentos totais (taxa total) na linha, percebe-se que os parâmetros de maior ou menor influência em seu cômputo seguem a tendência da análise feita para a taxa de desligamentos por *backflashover*. Porém pode-se destacar um aumento da influência do parâmetro altura da torre. Isto ocorre devido ao fato deste parâmetro afetar mais expressivamente a taxa de *flashover*. Para os demais parâmetros a influência da taxa de falha de blindagem na taxa total é bem menos expressiva.

Outro parâmetro, relativo às descargas atmosféricas, com elevada expressão na influência do desempenho de linhas, que deve ser analisado de acordo com cada região, é a probabilidade cumulativa do pico de corrente, I_P, uma vez que o valor de pico da corrente da descarga atmosférica varia de região para região [1,3,8,11-13,22,35-44]. Percebe-se que os valores da corrente crítica determinam qual função de probabilidade de pico de corrente (CIGRÉ X CEMIG) será mais conservativa nas respostas das taxas de desligamento das linhas, em função da resistência de aterramento.

Estas análises mostram que é de fundamental importância conhecer as principais grandezas físicas que promovem maior impacto no desempenho das linhas e que para se obter resultados mais condizentes com os reais no cálculo desse desempenho, é imprescindível a utilização de expressões e parâmetros das descargas atmosféricas típicas da região onde a linha analisada está instalada.

Finalmente, é oportuno salientar que, com estudos dos diversos parâmetros que influenciam no cálculo do desempenho de uma linha de transmissão se consegue atingir um número de desligamentos da linha que seja aceitável econômica e seguramente. Deste modo, é importante conciliar os melhores índices de desempenho com um projeto economicamente viável e que obedeça aos padrões estipulados pelas normas locais em vigência.

5.3 – Publicações

As seguintes publicações têm como base este trabalho de dissertação:

- M. M. S. Andrade, C. G. A. Cosentino, M. A. O. Schroeder, "Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas", XII Encontro de Modelagem Computacional (XII EMC), Rio de Janeiro, 2009.
- C. G. A. Cosentino, M. A. O. Schroeder, M. M. S. Andrade, U. C. Resende, S. C. Assis, "Computational Tool for Performance of Transmission Lines against Lightning", International Conference of Electrical and Computer Engineering (ICECE) - World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), Rome, 2010.
- C. G. A. Cosentino, M. A. O. Schroeder, M. M. S. Andrade, U. C. Resende, A. G. Pedrosa, "Computational Tool for Performance Analysis of Transmission Lines front to Atmospheric Discharges: Based on Flash Software", *The International Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS)*. Búzios, 2010.

5.4 – Propostas de Continuidade

O desenvolvimento alcançado nesta pesquisa possibilita diversas discussões, indicando as possibilidades e necessidades de trabalhos futuros.

Ao tomar como base a análise crítica dos cálculos efetuados no programa *Flash* 1.9, pode-se citar, com vista à busca da melhoria contínua do desempenho das linhas de transmissão frente a surtos atmosféricos, as seguintes propostas de análises futuras:

- Consideração de incidência de descargas não apenas verticalmente;
- Utilização do método de Monte Carlo para incidência estatística ao longo do vão ao invés da utilização de incidência determinística;
- Realização de um estudo para considerar no cálculo de desempenho, linhas de transmissão que possam ter mais de 2 (dois) cabos para-raios;
- Investigação da validade de instalação de equipamentos para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores;

- Consideração do canal de conexão ascendente e do ponto de conexão entre os canais descendente e ascendente;
- Consideração da impedância finita do canal de descarga atmosférica;
- Investigação do comportamento de outras funções matemáticas para a representação da corrente de uma descarga;
- Desenvolvimento de uma interface com o ATP (*Alternative Transients Program*) para cálculo do transitório eletromagnético completo estabelecido na linha de transmissão;
- Consideração de descargas atmosféricas incidentes no meio do vão;
- Utilização das funções log-normal dos parâmetros característicos das ondas de corrente de descargas atmosféricas típicas;
- Substituição das resistências de aterramento por suas impedâncias impulsivas;
- Verificação do efeito do solo nos valores das impedâncias de surto própria e mútua dos cabos fase e para-raios;
- Consideração da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência;
- Consideração de diferentes tipos de relevo.

Referências Bibliográficas

- A. Soares, Jr., M. A. O. Schroeder and S. Visacro Filho, "Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, No. 2, pp. 1447-1452, Apr. 2005.
- A. Soares, Jr. "Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2001.
- J. C. Salari Filho. "Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência", Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), UFRJ, 2006.
- F. H. Silveira, "Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2006.
- Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, Electric Power Research Institute EPRI, Second Edition, California, 1982.
- A. D'Ajuz, C. S. Fonseca, F. M. S. Carvalho, J. A. Filho, L. E. N. Dias, M. P. Pereira, P. C. V. Esmeraldo, R. Vaisman, S. O. Frontini. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão*, Editora Universitária EDUFF, 1987.
- 7. L. C. L. Chechiglia, A. C. G. Bezerra, R. L. Markiewicz, L. S. do Carmo, A. M. Carvalho e G. E. S. Amorim. "Otimização de Sistema Computacional para Estimativa do Desempenho de LT's Sob a Ação de Descargas Atmosféricas e sua Aplicação para Melhoria do Desempenho de LT's da CEMIG", VII Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ, Argentina, 1997.
- M. A. O. Schroeder, "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.
- Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. Working Group 33.01 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination) - CIGRE, 1991.
- 10. *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1997.
- S. Visacro Filho, A. Soares, Jr., M. A. O. Schroeder, L. C. L. Chechiglia and V. J. Souza, "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, D01105, doi:10.1029/2003JD003662, 2004.
- K. Berger, R. B. Anderson and H. Kröninger, "Parameters of Lightning Flashes", *Electra*, no. 41, pp. 23-37, 1975.

- R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Application", *Electra*, no. 69, pp. 65-102, 1980.
- G. W. Brown, "Lightning Performance I Shielding Failures Simplified", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-97, no. 1, pp.33-38, 1978.
- G. W. Brown, "Lightning Performance II Updating Backflash Calculations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 1, pp.39-52, jan./fev. 1978.
- I. S. Grant, J. G. Anderson, A. R. Hileman, "A Simplified Method For Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932, Apr. 1985.
- J. G. Anderson, R. Clayton, H. Elahit et. al., "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267, July 1993.
- M. A. Sargent and M. Darveniza, "The Calculation of Double Circuit Outage Rate of Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, no. 6, pp. 665-678, 1967.
- M. A. Sargent and M. Darveniza, "Lightning Performance of Double Circuit Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 5/6, pp. 913-925, 1969.
- J. R. Currie, L. A. Choy and M. Darveniza, "Monte Carlo Determination of the Frequency of Lightning Strokes and Shielding Failures on Transmission Lines", *IEEE Winter Power Meeting*, 1970.
- 21. P. Chowdhuri, S. Mehairjan, "Alternative Monte Carlo Method for the Estimation Lightning Incidence to Overhead Lines", *IEEE Proceeding in Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 2, 1997.
- 22. S. Visacro Filho, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*, Ed. Artliber, São Paulo, 2005.
- 23. V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003.
- 24. A. F. C. Aquino, A. G. Massaud e D. N. Gonçalves, "Utilização do Religamento Automático Tripolar Lento em Linhas de Transmissão do SIN – Sistema Interligado Nacional: Uma Experiência Bem Sucedida", XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), 2009.
- 25. NBR 5419 Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005.
- 26. R. N. Dias, "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, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2006.

- C. R. Mesquita, "Nova Metodologia para Calibração de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2006.
- A. M. N. Teixieira, "Sistemas para Medição de Correntes de Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento e Resultados Preliminares", Dissertação de Mestrado, Programa de Pósgraduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2010.
- G. M. Correa, "Medição e Análise de Campos Elétricos Associados à Correntes de Descargas Atmosféricas," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2010.
- R. Z. Oliveira, "Sistema Para Medição de Parâmetros de Canais Ascendentes De Descargas Atmosféricas Na Estação de Pesquisa do Morro Do Cachimbo," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2007.
- S. Visacro. M. H. M.Vale. A. N. Teixeira. G. M. Correa, "The early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes", *Journal of Geophysical Research*, vol.115, D16104, doi:10.1029/2010JD014097, 2010, p:1-11.
- S. Visacro, "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke," Geophys. Res. Lett., vol.31, L07112, doi:10.1029/2004.GL019642, Apr. 2004.
- 33.A. De Conti and S. Visacro, "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol.49, No.2, May 2007.
- F. Heidler, J. M. Cvetic, B. V. Stanic. *Calculation of Lightning Current Parameters*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n°2, pp. 399-404, April 1999.
- 35. A Method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. AIEE Transactions, pt. II, v. 69, pp. 1187-1196, 1950.
- F. Popolansky, "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents", Electra, n. 22, pp. 139-147, May 1972.
- M. A.Sargent, "The Frequency Distribution of Current Magnitude of Lightning Strokes to Tall Structures", *IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems*, pp. 2224-2229, Sep./Oct. 1972.
- J. G. Anderson, "Lightning Performance of EHV-UHV Lines", *Electric Power Research Institute*, California, United States of America, Fred Weidner & Son Printers, 1975.
- A. J. Eriksson, "The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, n. 3, pp. 859-870, July 1987.
- R. B. Anderson, A. J. Eriksson, "A Summary of Lightning Parameters for Engineering Applications", *Proceedings of the CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, n. 33-06, Paris, France, 1980.
- 41. R. Cortina, E. Garbagnati, "Some Aspects of the Evaluation of the Lightning Performance of Electrical Systems", *Proceedings of the CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, n. 33-13, Paris, France, 1980.

- 42. J. H. Diniz, A. M. Carvalho, L. C. L. Cherchiglia, "Lightning Research Carried out by Companhia Energética de Minas Gerais", *Proceedings of the CIGRE International Workshop on Line Surge Arresters and Lightning*, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.
- 43. J. C. Chai, J. L. Montegut, S. D. de Russy, "Survey of CGLSS/SLC40 Lightning Data and Retest Criteria", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 391-396, Austin, United States of America, 1997.
- T. Narita, T. Yamada, A. Mochizuki, "Observation of Current Waveshapes of Lightning Strokes on Transmission Towers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, n. 1, pp. 429-435, Jan. 2000.
- J. Franco. Curso sobre Para-raios: Aplicação em Redes de Distribuição, Subestações e Linhas de Transmissão. Franco Engenharia – Projeto, Consultoria e Treinamento. CEMIG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Ago. 2008.
- 46. A. J. Eriksson, "An Improved Electrogeometric Model for Transmission Lines Shielding Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, n. 3, pp. 871-886, July 1987.
- P. Chowdhuri, A. K., Kotapalli, "Significant Parameters in Estimating the Striking Distance of Lightning Strokes to Overhead Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, n. 3, pp. 1970-1981, July 1989.
- L. Dellera, E. Garbagnati, "Lightning Stroke Simulation by Means of the Leader Progression Model, Part I and II", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n. 4, pp. 2009-2029, Oct. 1990.
- 49. F. A. M. Rizk, "Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n. 4, pp. 1983-1997, Oct. 1990.
- 50. C. F. Wagner, G. D. McCann, G. L. MaClane, "Shielding of Transmission Lines", *Transactions AIEE*, vol. 60, pp. 313-328, 1941.
- 51. C. F. Wagner, A. R. Hileman, "The Lightning Stroke; Part II", *AIEE Transactions*, pp. 622-642, Oct. 1961.
- 52. C. F. Wagner, "Relation Between Stroke Current and the Velocity of the Return Stroke", *IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems*, vol.82, pp. 609-617, 1963.
- 53. F. S. Young, J. M. Clayton, A. R. Hileman, "Shielding of Transmission Lines", *AIEE Transactions on Power Apparaturs Systems*, vol. 82, pp. 132-154, 1964.
- H. R. Armstrong, E. R. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding", *IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems*, vol. 87, n. 1, pp. 270-281, Jan. 1968.
- G. W. Brown, E. R. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding", *IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems*, vol. 88, n. 5, pp. 617-626, May 1969.
- 56. A. J. Eriksson, "Lightning and Tall Structures", *Transactions South African Institute of Electrical Engineering*, vol. 69, p.8, Aug. 1978.
- 57. C. M. J. C. M. Portela, "Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas, Towers and Buildings Methodological Aspects", *Proceedings of the IEEE 1998*

International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 1018-1023, Denver, United States of America, 1988.

- 58. C. M. J. C. M. Portela, "Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas and Radar Towers - Practical Application Examples", *Proceedings of the IEEE* 1998 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 259-264, Denver, United States of America, 1998.
- 59. M. G. Rodrigues, C. M. J. C. M. Portela, "Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in High Objects", *Proceedings of the International Conference on Grounding and Earthing (GROUND)*, pp. 35-40, Belo Horizonte, Brazil, June 2000.
- D. W. Gilman, E. R. Whitehead, "The Mechanism of Lightning Flashover on High-Voltage and Extra-High-Voltage Transmission Lines", *Electra*, n. 27, pp. 65-96, March 1973.
- 61. E. R. Whitehead, "Survey of the Lightning Performance of Extra-High-Voltage Transmission Lines", *Electra*, n. 33, March 1974.
- 62. M. Darveniza, F. Popolanshy, E. R. Whitehead, "Lightning Protection of UHV Transmission Lines", *Electra*, n. 41, pp. 39-69, July 1975.
- 63. A. Greenwood. *Electrical Transients in Power Systems*. Ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- L. C. J. Zanetta, Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, Edusp, São Paulo, 2003.
- A. E. A. Araújo e W. L. A. Neves, Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia, Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- 66. H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program (EMTP theory book)*, Bonneville Power Administration, 1986.
- 67. CanAm Users Group, ATP Rule Book, ATP/EMTP, 1995.
- 68. EMTP/ATP, www.empt.org.
- 69. M. A. O. Schroeder, A. Soares, S. Visacro, "An Integrated approach for calculation of electromagnetic transients in transmission lines", *ICLP International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002.
- 70. M. A. O. Schroeder, A. Soares, S. Visacro, "An interactive computational code for simulation of transient behavior of electric system components for lightning currents", ICLP -International Conference on Lightning Protection, Cracow, 2002.
- 71. M. A. O. Schroeder, A. Soares, S. Visacro, "Application of an electromagnetic model for calculation of transient voltages in transmission tower", *ICLP International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002.
- 72. M. A. O. Schroeder, A. Soares, S. Visacro, "Calculation of Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Lightning - Combined Electromagnetic Modeling for Tower, Grounding and Aerial Cables, *IEEE/PES T&D Latin America*, São Paulo, 2002.
- M. A. O. Schroeder, A. Soares, S. Visacro, F. H. Silveira, M. H. M. Vale, C. R. Mesquita, "Performance of guyed towers concerning lightning overvoltage stresses over transmission line insulators", *ICLP - International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002.

- 74. S. Visacro and A. Soares J., "HEM: A model for simulation of lightning related engineering problems," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1206-1208, Apr. 2005.
- 75. S. Visacro, "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines", *Journal* of Lightning Research, vol. 1, pp. 60-68, 2007.
- 76. S. Visacro, "Modelagem de Aterramentos Elétricos", Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 1992.
- 77. A. Soares, "Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas", Dissertação de Mestrado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG),1996.
- 78. S. Visacro. Aterramentos Elétricos. Artliber, São Paulo, 2002.
- 79. R. S. Alipio, "Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPGMMC/CEFET-MG), 2008.
- 80. Pedrosa, A. G., "Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e Permissividade de Solos Típicos com a Frequência", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPGEL/UFSJ/CEFET-MG), 2010.
- 81. L. C. Rocha, "Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UAT Frente a Descargas Atmosférica: Influência da Ruptura a Meio de Vão", Dissertação de Mestrado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), 2009.
- 82.M. T. Correia de Barros, J. Festas, H. Milheiras, N. Felizardo, M. Fernandes, J. Sousa,
 "Methodologies for Evaluating the Lightning Performance of Transmission Lines", *ICOLIM*'98

 International Conference on Live Maintenance, Lisboa, Set.1998.
- 83. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std. 80-2000, New York, 2000.
- Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner), NBR 7117 NB716, Dez.1981.
- 85. A. B. F. Francisco, "Estudo de Caso: Análise Técnico-Econômica para Melhoria de Desempenho da Linha de Transmissão de 138 kV Taquaril-Mariana1 Sob a Ótica de Análise de Investimento e de Geração de Valor ao Acionista", Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica – Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), 2004.

- S. Visacro, R. N. Dias, C. R. Mesquita, "Novel Approach for Determining Spots of Critical Lightning Performance Along Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1459-1464, Apr. 2005.
- 87. D. C. Miranda, L. V. Cunha, S. Visacro, R. N. Dias, C. R. Mesquita, "Resultados da Aplicação de Metodologia Inovadora para Melhoria de Desempenho da LT Guilman Amorim-Ipatinga 1, 230 kV, Frente a Descargas Atmosféricas", *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Rio de Janeiro, Out. 2007.
- M.A.O. Schroeder, S. Visacro, A. Soares, L. C. L. Cherchiglia, V. J. Souza, "Lightning current statistical analysis: measurements of Morro do Cachimbo station", *ICLP* -*International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002.
- Silveira, F.H., De Conti, A., Visacro, S., "Lightning Overvoltage Due to First Strokes Considering a Realistic Current Representation", *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol.52, no.4, pp.929-935, Nov. 2010.
- M.A.O. Schroeder, A. Soares, S. Visacro, "Contamination of lightning current waves for short towers: electromagnetic model versus TEM approaches", *ICLP - International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002.
- J. C. Salari, C. Portela, "A Methodology for Electromagnetic Transients Calculation An Application for the Calculation of Lightning Propagation in Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 527-536, 2007.
- J. C. Salari, C. Portela, "Grounding Systems Modeling Including Soil Ionization". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no 4, pp. 1939–1945, 2008.
- 93. S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 381-386, 2007.
- 94. R. S. Alípio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, "Computer Analysis of Electromagnetic Transients in Grounding Systems", Proc. of 17th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), Florianópolis, 2009.
- 95. R. S. Alípio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, T. A. S. Oliveira, "Electromagnetic Fields of Buried Conductors", Proc. of International Conference on Grounding and Earthing (GROUND), pp. 399-402, Florianópolis, 2008.
- 96. R. S. Alípio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, T. A. S. Oliveira, "The Influence of the Soil Parameters Dependence with Frequency on Impulse Grounding Behavior", Proc. of International Symposium of Lightning Protection (SIPDA), Curitiba, 2009.
- 97. R. S. Alípio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, T. A. S. Oliveira, "Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos de Alta Frequência e Comparação com Resultados Experimentais", SBA Controle & Automação, Junho 2010.
- 98. A. G. Pedrosa, R. S. Alípio, M. A. O. Schroeder, R. K. Oliveira, "Estudo comparativo entre Formulações de Medição de Variação da Condutividade e da Permissividade de Solos Típicos com a Frequência", XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Recife, 2009.

- 99. A. G. Pedrosa, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, "Influência dos Parâmetros Eletromagnéticos Dependentes da Frequência de Solos Típicos na Resposta Harmônica de Aterramentos Elétricos", XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Bonito, 2010.
- 100. A. G. Pedrosa, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, T. A. S. Oliveira, S. C. Assis, A. R. Braga, "Transient Response of Grounding Electrodes for the Frequency-Dependence of Soil Parameters", *IEEE/PES Transmission & Distribution Latin America*, São Paulo, 2010.
- 101. J. L. C. Lima, "Avaliação Experimental Sobre O Efeito de Ionização do Solo Devido À Injeção de Correntes Impulsivas", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2008.
- 102. J. L. C. Lima, S. Visacro, "Soil Ionization: New Findings", in Proc. 6th International Conference on Grounding and Earthing and Int. Conf. on Lightning Physics and Effects – (GROUND), Florianopolis, 2008.
- 103. S.Visacro, C. Portela, "Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems", *in Proc.* 1987 Int. Symp. High Voltage Engineering, n.93.06, pp.1-4, Germany.
- 104. João Clavio Salari and Carlos Portela, Grounding Systems Modeling Including Soil Ionization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp.1939-1945, Oct. 2008.
- 105. S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 381-386, Jan. 2007.
- 106. S. Visacro, R.I Alipio, M. H. M. Vale, and C. Pereira, "The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity", *Digital Object Identifier*. 10.1109/TEMC.2011.2106790, 2011.
- 107. C. Portela. Sobretensões e Coordenação de Isolamento. v. 1, 2 e 3, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.
- 108. H. X. F. Silva, "Distribuição Probabilística das Sobretensões de Origem Atmosférica Incidentes em uma Subestação a Partir de Linhas de Transmissão", Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), UFRJ, 1895.
- 109. W. A. Chisholm, "The IEEE Flash Program: A Structure for Evaluation of Transmission Lightning Performance", *T. IEE Japan*, vol. 121-B, no. 8, pp. 914-917, 2001.
- T. Ito, T. Ueda, H. Watanabe, T. Funabashi, A. Ametani, "Lightning Flashovers on 77-kV Systems: Observed Voltage Bias Effects and Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 545-550, Apr. 2003.
- 111. T. Udo, "Multiline Simultaneous Faults on Transmission Lines Due to Winter Lightning", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 248-254, Jan. 2004.
- 112. T. Udo, "Study of the Winter Lightning Ground Flash Density Investigated by the Lightning Location Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1613-1619, July 2006.
- 113. J. Takami, S. Okabe, "Characteristics of Direct Lightning Strokes to Phase Conductors of UHV Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 537-546, Jan. 2007.
- 114. S. Taniguchi, S. Okabe, T. Takahashi, T. Shindo, "Air-Gap Discharge Characteristics in Foggy Conditions Relevant to Lightning Shielding of Transmission Lines", *IEEE Transactions* on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 2409-2416, Oct. 2008.
- 115. H. Motoyama, Y. Kinoshita, K. Nonaka, "Experimental Study on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower With Overhead Lines" *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2488-2495, Oct. 2008.
- 116. T. Miyazaki, S. Okabe, S. Sekioka, "An Experimental Validation of Lightning Performance in Distribution Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2182-2190, Oct. 2008.
- 117. H. Motoyama, Y. Kinoshita, K. Nonaka, "Experimental Study on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower With Overhead Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2488-2495, Oct. 2008.
- 118. T. Miyazaki, S. Okabe, "Experimental Investigation to Calculate the Lightning Outage Rate of a Distribution System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2913-2922, Oct. 2010.
- M. S. Savic, "Medium Voltage Distribution Systems Lightning Performance Estimation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, pp. 910-914, July 2003.
- 120. R. Lambert, E. Tarasiewicz, A. Xémard, G. Fleury, "Probabilistic Evaluation of Lightning-Related Failure Rate of Power System Apparatus", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 579-586, Apr. 2003.
- 121. D. Chanda, N. K. Kishore, A. K. Sinha, "A Wavelet Multiresolution-Based Analysis for Location of the Point of Strike of a Lightning Overvoltage on a Transmission Line", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1727-1733, Oct. 2004.
- 122. A. Ametani, T. Kawamura, "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 867-875, Apr. 2005.
- 123. J. He, Y. Tu, R. Zeng, J. B. Lee, S. H. Chang, Z. Guan, "Numerical Analysis Model for Shielding Failure of Transmission Line Under Lightning Stroke", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 815-822, Apr. 2005.
- 124. B. Vahidi, M. Yahyaabadi, M. R. B. Tavakoli, S. M. Ahadi, "Leader Progression Analysis Model for Shielding Failure Computation by Using the Charge Simulation Method", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2201-2206, Oct. 2008.
- 125. P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Interception Probability and Shielding Against Lightning", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 863-873, Apr. 2009.
- 126. W. Nowak, R. Tarko, "Computer Modelling and Analysis of Lightning Surges in HV Substations due to Shielding Failure", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 1138-1145, Apr. 2010.
- 127. M. R. B. Tavakoli, B. Vahidi, "Transmission-Lines Shielding Failure-Rate Calculation by Means of 3-D Leader Progression Models", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010.

- 128. P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Interception Probability and Proximity Effects: Implications in Shielding Design Against Lightning", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1940-1951, July 2010.
- 129. V. L. Coelho, A. Raizer, J. O. S. Paulino, "Analysis of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1706-1712, July 2010.
- P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Estimation of Lightning Incidence to Overhead Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1855-1865, July 2010.
- F. A. M. Rizk, "Exposure of Overhead Conductors to Direct Lightning Strikes: Modeling of Positive Streamer Inhibition", *IEEE Transactions on Power DeliveryI*, 2010.
- 132. L. Grcev, F. Rachidi, "On Tower Impedances for Transient Analysis", *IEEE Transactions* on *Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1238-1244, July 2004.
- S. Visacro, A. Soares, "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nº2, pp. 1206–1207, 2005.
- 134. Parameters of Lightning Strokes: A Review, Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee IEEE, Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 346-358, Jan. 2005.
- 135. A. R. Conti, "Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMG, 2006.
- 136. M. Rahman, J. A. Gillespi, M. Darveniza, T. K. Saha, "Transmission Line Performance Against Lightning Investigated Using FLASH 1.81", *IEEE Xplore*, March 2009.
- 137. F. J. de Souza, "Coordenação de Isolamento e Cálculo de Desempenho Utilizando o FLASH/IEEE em Linhas de Transmissão submetidas a Surtos Atmosféricos", Trabalho de Graduação (TG), Departamento de Engenharia Industrial Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, (DEE/CEFET-MG), 2008.
- 138. http://ewh.ieee.org/soc/pes/lpdl, Software Flash 1.9 em C , acesso em Jan., 2010.
- 139. M. M. S. Andrade, "Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas", Relatório Final de Iniciação Científica – CNPq: Ciclo 2008-2009, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, (DEE/CEFET-MG), 2009.
- 140. T. E. McDermott, "A New Version of the IEEE Flash Program", IEEE website, Aug. 2010.
- 141. http://www.mathworks.com, Software MatLab, acesso em Jan., 2010.
- 142. F. F. F. Campos, *Introdução ao MATLAB*, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) Departamento de Ciência da Computação (DCC) do Instituto de Ciências Exatas de Naturais (ICEx), Belo Horizonte, 2000.
- 143. www.mg.gov.br, Governo de Minas Gerais, acesso em Jan., 2011.

- 144. M. M. S. Andrade, C. G. A. Cosentino, M. A. O. Schroeder, "Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas", XII Encontro de Modelagem Computacional (XII EMC), Rio de Janeiro, Dez. 2009.
- 145. C. G. A. Cosentino, M. A. O. Schroeder, M. M. S. Andrade, U. C. Resende, S. C. Assis, "Computational Tool for Performance of Transmission Lines against Lightning", *International Conference of Electrical and Computer Engineering (ICECE) - World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)*, Roma, Apr. 2010.
- 146. C. G. A. Cosentino, M. A. O. Schroeder, M. M. S. Andrade, U. C. Resende, A. G. Pedrosa, "Computational Tool for Performance Analysis of Transmission Lines front to Atmospheric Discharges: Based on Flash Software", *The International Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS),* Armação de Búzios, May 2010.
- 147. L. A. Choy and M. Darveniza, "A Sensitivity Analysis of Lightning Performance Calculations for Transmission Lines". *Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Group for presentation at the IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference*, May 1970.